

Norberto Corrêa da Silva Moura

**Segurança, eficiência energética e conforto
visual em emboques de túneis rodoviários:
soluções arquitetônicas**

**Tese apresentada à Faculdade de Arquitetura e
Urbanismo da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Doutor em Arquitetura e
Urbanismo.**

Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Márcia Peinado Alucci

São Paulo

2007



Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

ASSINATURA:

E-MAIL: norbertomoura@terra.com.br

M929s Moura, Norberto Corrêa da Silva
Segurança, eficiência energética e conforto visual em emboques de túneis rodoviários: soluções arquitetônicas / Norberto Corrêa da Silva Moura. --São Paulo, 2007.
381 p. : il.

Tese (Doutorado - Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura) - FAUUSP.
Orientadora: Márcia Peinado Alucci

1. Iluminação natural 2. Energia (Eficiência) 3. Túneis (Segurança)
I. Título

CDU 628.92

FOLHA DE APROVAÇÃO

Norberto Corrêa da Silva Moura

**Segurança, eficiência energética e conforto
visual em emboques de túneis rodoviários:
soluções arquitetônicas**

Tese apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
da Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Doutor em Arquitetura e Urbanismo.
Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

**Aos meus pais Orville e Marina
...saudades e eterna gratidão.**

AGRADECIMENTOS

Contei com o apoio e colaboração de diversas pessoas e instituições, a quem quero expressar meu sincero reconhecimento:

À Professora Márcia Peinado Alucci, que orientou o trabalho e, além da precisão e competência técnica, contribuiu com sua amizade e rara intuição.

Aos professores Anésia Barros Frota, Ettore José Bottura, Fernando Oscar Ruttkay Pereira e Sylvio Barros Sawaya pelas críticas, sugestões e contribuição ao trabalho.

À Denise Duarte e Joana Gonçalves, professoras do Departamento de Tecnologia da FAUUSP, pelo apoio e amizade, e aos colegas do Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética LABAUT-FAUUSP. A lista aqui é bastante extensa, mas quero mencionar alguns pela maior proximidade no período de desenvolvimento da pesquisa: Anarrita Buoro, Daniel Cóstola, Rafael Brandão, Anna Christina Miana, Luciana Ferreira, Bruna Luz, Alessandra Prata, Dimas Bertolotti, Daniela Pereira, Marcos Yamanaka, Mônica Marcondes, Cíntia Figueiredo, José Ovídio Ramos e Cecília Mueller. Em especial, agradeço a Leonardo Marques Monteiro, por suas oportunas observações e comentários em todo o trabalho.

Pela sorte de ter, entre meus familiares, pessoas capazes em diversas áreas do conhecimento, pude dispor da valiosa contribuição de Heloisa Corrêa da Silva Moura Robles, irmã cuidadosa e paciente, revisando todo o texto e sempre presente em meus embates com a linguagem, de Maurício Corrêa da Silva Moura, ajustando meus atrevimentos em análise econômica, de Léo Tadeu Robles, pelas breves sugestões durante a pesquisa e de Maria do Carmo Ricardo, companheira em grande parte deste trabalho, com efetiva participação em certos momentos.

À DERSA – Desenvolvimento Rodoviário S. A. pelo fornecimento de documentação técnica e autorização para levantamentos e medições no trecho Oeste do Rodoanel Mário Covas, em especial ao Eng. Kiyoshi Suda, motivador das primeiras investidas que delinearam o objeto da pesquisa, e ao Eng. Mario Rodrigues Junior, diretor de engenharia. O auxílio prestado pelos funcionários da Biblioteca da DERSA,

selecionando alguns artigos relacionados ao tema de estudo, também foi primordial para complementação dos dados.

Aos professores, que forneceram o conhecimento introdutório nesta área do conhecimento, e aos colegas do curso CECACE 1/ FUPAM, despertando meu interesse e marcando o início de todo este processo.

Ao IEEUSP, especialmente ao Eng. José Gil Oliveira do pelo empréstimo dos equipamentos.

À PROTECOM pela segurança e a Fernando Barbière dos Santos pelo auxílio técnico nas medições dos túneis.

Ao Eng. Luiz Antonio G. Fonseca, assessor da diretoria da TERWAN, pela entrevista sobre aspectos relevantes da obra de instalações elétricas (trecho Oeste do Rodoanel Mário Covas), bem como a Marcos Spalding, que possibilitou este contato.

Aos professores e colegas das disciplinas cursadas.

À Biblioteca da CET – Companhia de Engenharia de Tráfego e ao ILUME - Departamento de Iluminação pública da Prefeitura de São Paulo pelo fornecimento de informações técnicas sobre a iluminação de túneis na Cidade de São Paulo.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior pelo apoio financeiro.

RESUMO

MOURA, Norberto Corrêa da Silva. **Segurança, Eficiência Energética e Conforto Visual em Emboques de Túneis Rodoviários: Soluções Arquitetônicas**. 2007. 381 p. Tese (Doutorado), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007

Para atenuar o impacto visual, que acomete o motorista ao ingressar em túneis rodoviários durante o período diurno, utiliza-se a luz artificial, com alto nível inicial e gradual diminuição para o interior do túnel. Tal solução apresenta dois inconvenientes imediatos, relacionados ao consumo de energia e à segurança. Devido à radiação solar direta, as imediações da entrada do túnel tornam-se fontes de ofuscamento de elevada intensidade e a iluminação deve estar dimensionada para permitir, ao motorista que se aproxima da entrada do túnel, a visualização de seu interior, implicando em elevado consumo de energia para uma tarefa com pouco requisito visual. Quanto à segurança, na hipótese de falta de energia aumenta-se a probabilidade de acidentes, pois o reflexo do motorista pode ser frear. As soluções arquitetônicas, objeto da pesquisa, correspondem a um **Sistema para Adaptação Visual (SAV)**, implantado no trecho de rodovia aberta anterior à entrada do túnel, que, por um lado, atua nos elementos causadores do problema e, por outro, fornece a iluminação necessária no interior do túnel através das fontes de luz natural (Sol e céu). Para sua concepção, são propostas cinco estratégias. O desempenho do **SAV**, assim constituído, foi testado em uma aplicação prática nos túneis do trecho Oeste do Rodoanel Mário Covas, sem apresentar os inconvenientes identificados na solução convencional (iluminação artificial). A segurança no ponto crítico ficou garantida por característica intrínseca do sistema. Além de reduzir o consumo, a energia para o período noturno pôde ser gerada pelo próprio **SAV**, se incorporados módulos fotovoltaicos, e a sazonalidade característica da luz natural é acompanhada pelo sistema, favorecendo o conforto visual por diminuir a faixa em que ocorre o processo de adaptação visual.

Palavras-chave: iluminação de túneis rodoviários, iluminação natural, abertura zenital, telas à prova de penetração solar, adaptação visual, segurança em túneis rodoviários, eficiência energética, conforto visual, ofuscamento desabilitador, luminância de véu equivalente.

ABSTRACT

MOURA, Norberto Corrêa da Silva. **Safety, Power Efficiency and Visual Comfort at the Access Zone of Highway Tunnels: Architectural Solutions**. 2007. 381 p. Thesis (Doctoral), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007

The usual adopted solution to defuse the driver's visual impact at the highway tunnel entrance during the daytime, has been the use of electric lighting, with high initial level and gradual reduction towards the internal side of the tunnel. This brings two immediate problems, concerning energy consumption and security. Direct sunlight causes high intensity glare sources around the tunnel entrance, and the lighting level should be enough to allow the interior visibility, when the driver approaches the tunnel, entailing high energy consumption to a low accurate task. Security-wise, in case of power supply failure, collisions possibility increases, due to the driver's instinctive reaction to brake suddenly. Architectural solutions, this research object, are related to a **Visual Adaptation System (VAS)** positioned on the open road before the tunnel entrance, which, on the one hand, acts into the problem causes, and, on the other, provides the necessary lighting inside the tunnel by natural light sources (Sun and sky). Five strategies are proposed designing the VAS. A practical application on Metropolitan Area Ring Road Mario Covas – West segment tunnels – checked the so-built VAS performance, not presenting the identified deficiencies in the conventional solution (artificial lighting). The intrinsic system feature assured the critical point security. Besides the consumption reduction, the energy supply for nighttime could be generated by the VAS, if photovoltaic modules are added, and the natural light seasonal feature is followed by the system, favoring the visual comfort by decreasing the visual adaptation process range.

Key-words: highway tunnel lighting, daylighting, skylight, sun proof screens, visual adaptation, highway tunnel security, power efficiency, visual comfort, disability glare, equivalent veiling luminance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ILUSTRAÇÃO 1 – MODELO DA PESQUISA	4
ILUSTRAÇÃO 2 - ESTRUTURA DA PESQUISA	6
ILUSTRAÇÃO 3 – O OLHO HUMANO	8
ILUSTRAÇÃO 4 – LUMINÂNCIA DE ADAPTAÇÃO: L INICIAL = 8.000 CD/M ²	13
ILUSTRAÇÃO 5 - LUMINÂNCIA DE ADAPTAÇÃO L(0) INICIAL ENTRE 25 E 8.000 CD/M ²	13
ILUSTRAÇÃO 6 - LUMINÂNCIA DE ADAPTAÇÃO: MESMA LUMINÂNCIA INICIAL RELATIVA L(0).....	14
ILUSTRAÇÃO 7 – (A) INTENSIDADE LUMINOSA; (B) FLUXO LUMINOSO E ILUMINÂNCIA.....	18
ILUSTRAÇÃO 8 – (A) MODELO 1; (B) MODELO 2	19
ILUSTRAÇÃO 9 – MODELO 3.....	20
ILUSTRAÇÃO 10 – MODELO 4.....	21
ILUSTRAÇÃO 11 – LEI DE LAMBERT	22
ILUSTRAÇÃO 12 – MODELO 5.....	22
ILUSTRAÇÃO 13 – MODELO 3A	24
ILUSTRAÇÃO 14 – MODELO 3A: PLANO ILUMINADO POR FONTES PONTUAIS ISOTRÓPICAS	25
ILUSTRAÇÃO 15 – MODELO 3A: MÓDULO BASE E MÓDULO EQUIVALENTE.....	25
ILUSTRAÇÃO 16 – ILUMINAÇÃO DE SUPERFÍCIE INFINITESIMAL	26
ILUSTRAÇÃO 17 – ILUMINAÇÃO DE FONTE PONTUAL	28
ILUSTRAÇÃO 18 – INTENSIDADE E SUPERFÍCIE APARENTE EM DETERMINADA DIREÇÃO.	29
ILUSTRAÇÃO 19 – ELEMENTOS FUNDAMENTAIS: (A) ESFERA TERRESTRE; (B) ESFERA CELESTE	35
ILUSTRAÇÃO 20 – RELÓGIO DE SOL : DIAGRAMA LAT. 23°30'S	37
ILUSTRAÇÃO 21 – RELÓGIO DE SOL : CONSTRUÇÃO E APLICAÇÃO	37
ILUSTRAÇÃO 22 – ÂNGULOS PARA CÁLCULO DA LUMINÂNCIA DO CÉU	47
ILUSTRAÇÃO 23 – DISTRIBUIÇÃO DA LUZ EM SUPERFÍCIES OPACAS	53
ILUSTRAÇÃO 24 – DISTRIBUIÇÃO DA LUZ EM SUPERFÍCIES TRANSPARENTES	54
ILUSTRAÇÃO 25 – DISTRIBUIÇÃO BIDIRECIONAL DA LUZ	55
ILUSTRAÇÃO 26 – REFLEXÃO TOTAL DA LUZ.....	57
ILUSTRAÇÃO 27 – ÂNGULO DE INCIDÊNCIA X COEFICIENTES DE REFLEXÃO E TRANSMISSÃO.....	58
ILUSTRAÇÃO 28 – AS TRÊS COMPONENTES DO FLD.....	63
ILUSTRAÇÃO 29 – APLICAÇÃO DO DIAGRAMA DE WALDRAM PARA ABERTURA LATERAL	65
ILUSTRAÇÃO 30 – MÉTODO DE PLEIJEL E MOORE.....	65
ILUSTRAÇÃO 31 – DIAGRAMAS DE PLEIJEL: (A) COMPONENTE Z; (B) COMPONENTE Y.....	66
ILUSTRAÇÃO 32 – TRAÇADO DE MÁSCARAS DE <i>BRISE</i> HORIZONTAL: ÂNGULO VERTICAL AV = 40° ..	68
ILUSTRAÇÃO 33 – MÉTODO ABNT: DETERMINAÇÃO DA COMPONENTE CELESTE	70
ILUSTRAÇÃO 34 – MÉTODO BRE: TRANSFERIDOR PARA ABERTURA VERTICAL (CÉU ENCOBERTO) ...	71
ILUSTRAÇÃO 35 – MÉTODO BRE: EXEMPLO DE APLICAÇÃO PARA ABERTURA VERTICAL.....	73
ILUSTRAÇÃO 36 – PRINCÍPIO DO FLUXO DIVIDIDO	76
ILUSTRAÇÃO 37 – ÁBACO BRE: CRI PARA ABERTURAS VERTICAIS	79

ILUSTRAÇÃO 38 – TRANSFERÊNCIA DE FLUXO TIPO 1.....	81
ILUSTRAÇÃO 39 – PLANO FONTE DE LUZ.....	82
ILUSTRAÇÃO 40 – MÉTODO DO HEMISFÉRIO UNITÁRIO.....	84
ILUSTRAÇÃO 41 – IGREJA RIOLA (ÁLVAR AALTO): (A) MODELO FÍSICO; (B) ESPAÇO REAL.....	96
ILUSTRAÇÃO 42 – POSICIONAMENTO DO SENSOR EM MODELO FÍSICO.....	97
ILUSTRAÇÃO 43 – MODELO FÍSICO DE SALA DE AULA.....	97
ILUSTRAÇÃO 44 – CORTE DE JUSTIÇA.....	98
ILUSTRAÇÃO 45 – ESQUEMA DE JANELA ELETROCRÔMICA.....	102
ILUSTRAÇÃO 46 – ESQUEMA DE UMA SUPERJANELA.....	102
ILUSTRAÇÃO 47 – PAINEL PRISMÁTICO.....	102
ILUSTRAÇÃO 48 – PAINEL CORTADO A LASER.....	102
ILUSTRAÇÃO 49 – PAINEL PRISMÁTICO MÓVEL.....	103
ILUSTRAÇÃO 50 – SUBSISTEMA COLETOR: HELIOSTATO.....	104
ILUSTRAÇÃO 51 – DUTO DE LUZ.....	104
ILUSTRAÇÃO 52 – GRELHA DE MICRO-LAMELAS:.....	104
ILUSTRAÇÃO 53 – RETROPERSIANA: LUZ SOLAR.....	105
ILUSTRAÇÃO 54 – RETROPERSIANA: LUZ ARTIFICIAL.....	105
ILUSTRAÇÃO 55 – DISPOSITIVO ZENITAL COM SELEÇÃO ANGULAR: (A) INVERO; (B) VERÃO.....	105
ILUSTRAÇÃO 56 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE IMPRENSA.....	108
ILUSTRAÇÃO 57 – MINISTÉRIO DE EDUCAÇÃO E CULTURA.....	109
ILUSTRAÇÃO 58 – RESIDÊNCIA MILTON GUPER.....	109
ILUSTRAÇÃO 59 – CASA DE CAMPO COUNT RAUL CRESPI.....	110
ILUSTRAÇÃO 60 – RESIDÊNCIA ARGEMIRO HUNGRIA MACHADO.....	110
ILUSTRAÇÃO 61 – RESIDÊNCIA JOÃO PAULO DE MIRANDA NETO.....	111
ILUSTRAÇÃO 62 – EDIFÍCIO DAS SEGURADORAS.....	112
ILUSTRAÇÃO 63 – EDIFÍCIO DAS SEGURADORAS: DETALHE ABERTURAS.....	112
ILUSTRAÇÃO 64 – REFORMA DE RESIDÊNCIA PACAEMBU.....	113
ILUSTRAÇÃO 65 – BIBLIOTECA VIIPURI.....	114
ILUSTRAÇÃO 66 – EDIFÍCIO COMERCIAL RAUTATALO.....	114
ILUSTRAÇÃO 67 – INSTITUTO FINLANDÊS DAS APOSENTADORIAS POPULARES: BIBLIOTECA.....	115
ILUSTRAÇÃO 68 – INSTITUTO FINLANDÊS DAS APOSENTADORIAS POPULARES: VESTÍBULO.....	115
ILUSTRAÇÃO 69 – VILLA MAIREA: DETALHE CAIXILHOS.....	116
ILUSTRAÇÃO 70 – VILLA MAIREA: FACHADA ESTE.....	116
ILUSTRAÇÃO 71 – TÚNEL LIBERTY, PITTSBURGH, 1939.....	122
ILUSTRAÇÃO 72 – TÚNEL QUEEN CREEK, PITTSBURGH, 1952.....	122
ILUSTRAÇÃO 73 – TERMINOLOGIA: CORTE LONGITUDINAL.....	123
ILUSTRAÇÃO 74 – EXPERIMENTO 1: SISTEMA ASSIMÉTRICO PRÓ-FLUXO.....	131
ILUSTRAÇÃO 75 – EXPERIMENTO 2: SISTEMA SIMÉTRICO.....	131

ILUSTRAÇÃO 76 – EXPERIMENTO 3: SISTEMA ASSIMÉTRICO CONTRAFLUXO	131
ILUSTRAÇÃO 77–TÚNEL THOROLD: VISTA DO PORTAL	133
ILUSTRAÇÃO 78–TÚNEL HÔNE: VISTA DO PORTAL	134
ILUSTRAÇÃO 79 – TÚNEL SCHIPHOL: VISTA DO EMBOQUE SUL	135
ILUSTRAÇÃO 80 – TÚNEL SCHIPHOL: ILUMINÂNCIA E LUMINÂNCIA NA PISTA.	135
ILUSTRAÇÃO 81 – TÚNEL COEN: VISTA DO EMBOQUE	136
ILUSTRAÇÃO 82 – TÚNEL COEN: ILUMINÂNCIA E LUMINÂNCIA NA PISTA	136
ILUSTRAÇÃO 83 – TÚNEL VELSEN: VISTA DO EMBOQUE SUL.....	137
ILUSTRAÇÃO 84 – TÚNEL VELSEN: ILUMINÂNCIA E LUMINÂNCIA NA PISTA.....	137
ILUSTRAÇÃO 85 – REMOÇÃO PARCIAL DA TELA PARA MELHORAR SUA TRANSMISSÃO	138
ILUSTRAÇÃO 86 – TÚNEL NIJMEGEN: VISTA DO EMBOQUE OESTE.....	138
ILUSTRAÇÃO 87 – TÚNEL NIJMEGEN: ILUMINÂNCIA E LUMINÂNCIA NA PISTA	139
ILUSTRAÇÃO 88 – TÚNEL 9 ARÁBIA SAUDITA	140
ILUSTRAÇÃO 89 – CENAS PROVÁVEIS DOS EMBOQUES	144
ILUSTRAÇÃO 90 – DIAGRAMA POLAR DO MÉTODO L_{SEQ}.....	145
ILUSTRAÇÃO 91 – CONTRASTE C E SRN EM FUNÇÃO DA LUMINÂNCIA.....	149
ILUSTRAÇÃO 92 – RELAÇÃO ENTRE SRN E CONTRASTE.....	149
ILUSTRAÇÃO 93 – PASSAGEM INFERIOR ZERBINI: EMBOQUE COM PÉRGOLA.....	160
ILUSTRAÇÃO 94 – TÚNEIS DE SÃO PAULO: ARRANJO DAS LUMINÁRIAS	162
ILUSTRAÇÃO 95 – TÚNEL DA RODOVIA DOS IMIGRANTES (2005)	163
ILUSTRAÇÃO 96 – TÚNEL MARIA MALUF: ANCHIETA/IMIG	164
ILUSTRAÇÃO 97 – TÚNEL MAX FEFFER: CENTRO/BAIRRO.....	164
ILUSTRAÇÃO 98 – TÚNEL AYRTON SENNA: CENTRO/BAIRRO	164
ILUSTRAÇÃO 99 – TÚNEL JÂNIO QUADROS: VISTA GERAL	164
ILUSTRAÇÃO 100 – TÚNEL JÂNIO QUADROS: DETALHE DO EMBOQUE.....	165
ILUSTRAÇÃO 101 – TÚNEIS DA VIA EXPRESSA SUL.....	166
ILUSTRAÇÃO 102 – TÚNEL MORRO DO BOI (S/ INSOLAÇÃO).....	167
ILUSTRAÇÃO 103 – TÚNEL MORRO DO BOI (C/ INSOLAÇÃO)	167
ILUSTRAÇÃO 104 – TÚNEL TEODORO SAMPAIO	168
ILUSTRAÇÃO 105 – TÚNEL DA LAGOINHA.....	168
ILUSTRAÇÃO 106 – TÚNEL SANTA BÁRBARA	168
ILUSTRAÇÃO 107 – RODOANEL MÁRIO COVAS: LOCALIZAÇÃO	171
ILUSTRAÇÃO 108 – VISTA DAS FAIXAS INTERDITADAS NO INTERIOR DO TÚNEL (TE-2).....	174
ILUSTRAÇÃO 109 – EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS PARA AS MEDIÇÕES NOS TÚNEIS	175
ILUSTRAÇÃO 110 – PR-2: MEDIÇÕES COM “LMT L 1003”	176
ILUSTRAÇÃO 111 – PR-2: MEDIÇÕES COM “LS-110”	176
ILUSTRAÇÃO 112 – GABARITO. (A) ILUMINÂNCIA HORIZONTAL. (B) ILUMINÂNCIA VERTICAL.	177
ILUSTRAÇÃO 113 – GRADE DE PONTOS PARA ANÁLISE DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO.....	178

ILUSTRAÇÃO 114 – PR-1: MEDIÇÃO DA LUMINÂNCIA DO PAVIMENTO (TE-2)	179
ILUSTRAÇÃO 115 – PR-1: MEDIÇÃO DE EH (TE-2).....	179
ILUSTRAÇÃO 116 - MEDIÇÃO DE EV (TE-2).....	179
ILUSTRAÇÃO 117 - VISTA DA ZONA INTERIOR PARA A ZONA LIMAR (TE-2)	182
ILUSTRAÇÃO 118 – REFLETÂNCIAS DA PISTA: MEDIÇÕES.....	182
ILUSTRAÇÃO 119 – REFLETÂNCIAS DA PISTA: REFERÊNCIA	182
ILUSTRAÇÃO 120 - DIAGRAMA POLAR DO MÉTODO L_{SEQ} : IDENTIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS	185
ILUSTRAÇÃO 121– MÉTODO L_{SEQ} : TABELA-EXEMPLO DE CÁLCULO.....	186
ILUSTRAÇÃO 122 – EMBOQUE JESUS (TE-1): MÉTODO L_{SEQ}	187
ILUSTRAÇÃO 123 – EMBOQUE ITAHYÊ (TI-1): MÉTODO L_{SEQ}	188
ILUSTRAÇÃO 124 – EMBOQUE PARQUE IMPERIAL (TE-2): MÉTODO L_{SEQ}.....	189
ILUSTRAÇÃO 125 – EMBOQUE TAMBORÉ (TI-2): MÉTODO L_{SEQ}.....	190
ILUSTRAÇÃO 126 – EMBOQUE GRAMADO (TE-3): MÉTODO L_{SEQ}	191
ILUSTRAÇÃO 127 – EMBOQUE VISTA ALEGRE (TI-3): MÉTODO L_{SEQ}	192
ILUSTRAÇÃO 128 – EMBOQUE PARQUE IMPERIAL (TE-2): MÉTODO L_{20}	193
ILUSTRAÇÃO 129 – MÁSCARA TE-1: PL. VERTICAL (45°NE).....	196
ILUSTRAÇÃO 130 – MÁSCARA TI-1: PL. VERTICAL (30°SO)	196
ILUSTRAÇÃO 131 – MÁSCARA TE-2: PL. VERTICAL (20°NE).....	196
ILUSTRAÇÃO 132 – MÁSCARA TI-2: PL. VERTICAL (40°SO).....	196
ILUSTRAÇÃO 133 – MÁSCARA TE-3: PL. VERTICAL (20°NE).....	196
ILUSTRAÇÃO 134 – MÁSCARA TI-3: PL. VERTICAL (0°S)	196
ILUSTRAÇÃO 135 – POSICIONAMENTO DO DAV: CORTE LONGITUDINAL.....	201
ILUSTRAÇÃO 136 - TIPOLOGIA 1: TRAÇADO DE MÁSCARAS	204
ILUSTRAÇÃO 137 – TIPOLOGIA 1A: DIMENSIONAMENTO (PESPECTIVA ISOMÉTRICA).....	205
ILUSTRAÇÃO 138 – TIPOLOGIA 1A: SIMULAÇÃO RADIANCE/ECOTECT (PLANTA)	206
ILUSTRAÇÃO 139 – TIPOLOGIA 1A: SIMULAÇÃO RADIANCE/ECOTECT (VISTA LATERAL)	206
ILUSTRAÇÃO 140 – TIPOLOGIA 1B: DIMENSIONAMENTO (PESPECTIVA ISOMÉTRICA).....	207
ILUSTRAÇÃO 141 – TIPOLOGIA 1B: SIMULAÇÃO RADIANCE/ECOTECT (PLANTA)	208
ILUSTRAÇÃO 142 - TIPOLOGIA 1B: SIMULAÇÃO RADIANCE/ECOTECT (VISTA LATERAL)	208
ILUSTRAÇÃO 143 – TIPOLOGIA 1A: (A) CORTE ESQUEMÁTICO; (B) MÁSCARA DAS OBSTRUÇÕES ...	210
ILUSTRAÇÃO 144 – TIPOLOGIA 1B: (A) CORTE ESQUEMÁTICO; (B) MÁSCARA DAS OBSTRUÇÕES ...	211
ILUSTRAÇÃO 145 – DIAGRAMA PARA DETERMINAÇÃO DA TELA À PROVA DE SOL: LAT. 52°N	212
ILUSTRAÇÃO 146 - BIBLIOTECA VIIPURI: ESTUDO DE ILUMINAÇÃO NATURAL	212
ILUSTRAÇÃO 147 – PLANO EQUIVALENTE À PROVA DE PENETRAÇÃO SOLAR	214
ILUSTRAÇÃO 148 – DIAGRAMAS SOBREPOSTOS: $A_i=10^\circ$	215
ILUSTRAÇÃO 149 – DIAGRAMAS SOBREPOSTOS: $A_i=20^\circ$	215
ILUSTRAÇÃO 150 – DIAGRAMAS SOBREPOSTOS: $A_i=30^\circ$	215
ILUSTRAÇÃO 151 – DIAGRAMAS SOBREPOSTOS: $A_i=35^\circ$	215

ILUSTRAÇÃO 152 – DIAGRAMAS SOBREPOSTOS: $A_i=40^\circ$	215
ILUSTRAÇÃO 153 – DIAGRAMAS SOBREPOSTOS: $A_i=45^\circ$	215
ILUSTRAÇÃO 154 – DIAGRAMAS SOBREPOSTOS: $A_i=50^\circ$	216
ILUSTRAÇÃO 155 – DIAGRAMAS SOBREPOSTOS: $A_i=55^\circ$	216
ILUSTRAÇÃO 156 – DIAGRAMAS SOBREPOSTOS: $A_i=60^\circ$	216
ILUSTRAÇÃO 157 – DIAGRAMAS SOBREPOSTOS: $A_i=65^\circ$	216
ILUSTRAÇÃO 158– TIPOLOGIA 2. CÉLULA DE BASE QUADRADA: ELEMENTOS DE CÁLCULO	217
ILUSTRAÇÃO 159 – TIPOLOGIA 2A: SIMULAÇÃO RADIANCE/ECOTECH (PLANTA).....	219
ILUSTRAÇÃO 160 - TIPOLOGIA 2A: SIMULAÇÃO RADIANCE/ECOTECH (VISTA LATERAL)	219
ILUSTRAÇÃO 161 – TIPOLOGIA 2B: SIMULAÇÃO RADIANCE/ECOTECH (PLANTA).....	220
ILUSTRAÇÃO 162 - TIPOLOGIA 2B: SIMULAÇÃO RADIANCE/ECOTECH (VISTA LATERAL)	220
ILUSTRAÇÃO 163 – MÁSCARA DAS OBSTRUÇÕES DA TIPOLOGIA 2A ($A_i=35^\circ$).....	221
ILUSTRAÇÃO 164 – MÁSCARA DAS OBSTRUÇÕES PELOS PONTOS NOTÁVEIS ($A_i=35^\circ$)	222
ILUSTRAÇÃO 165 – CÉLULA DE BASE-PARALELOGRAMO: ELEMENTOS DE CÁLCULO.....	223
ILUSTRAÇÃO 166 – FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA (PERÍODO ANUAL).....	225
ILUSTRAÇÃO 167 – TIPOLOGIA 3: SIMULAÇÃO A - ILUMINÂNCIAS (PLANTA).....	226
ILUSTRAÇÃO 168 - TIPOLOGIA 3: SIMULAÇÃO A - ILUMINÂNCIAS (VISTA LATERAL)	226
ILUSTRAÇÃO 169 – TIPOLOGIA 3: SIMULAÇÃO B - ILUMINÂNCIAS (PLANTA).....	227
ILUSTRAÇÃO 170 - TIPOLOGIA 3: SIMULAÇÃO B - ILUMINÂNCIAS (VISTA LATERAL)	227
ILUSTRAÇÃO 171 – TIPOLOGIA 3: SIMULAÇÃO C - ILUMINÂNCIAS (PLANTA).....	228
ILUSTRAÇÃO 172 - TIPOLOGIA 3: SIMULAÇÃO C - ILUMINÂNCIAS (VISTA LATERAL)	228
ILUSTRAÇÃO 173 – TIPOLOGIA 3: SIMULAÇÃO D - ILUMINÂNCIAS (PLANTA)	229
ILUSTRAÇÃO 174 - TIPOLOGIA 3: SIMULAÇÃO D - ILUMINÂNCIAS (VISTA LATERAL).....	229
ILUSTRAÇÃO 175 – TIPOLOGIA 3: SIMULAÇÃO D - FATOR DE LUZ DIURNA (PLANTA)	230
ILUSTRAÇÃO 176 - TIPOLOGIA 3: SIMULAÇÃO D - FATOR DE LUZ DIURNA (VISTA LATERAL)	230
ILUSTRAÇÃO 177 – MODELO ELETRÔNICO PARA VERIFICAÇÃO DA PENETRAÇÃO SOLAR	232
ILUSTRAÇÃO 178 – PENETRAÇÃO SOLAR NO SOLSTÍCIO DE VERÃO: (11:00H)	233
ILUSTRAÇÃO 179 – TIPOLOGIA 1A: MÁSCARA X DCRL.....	234
ILUSTRAÇÃO 180 – TIPOLOGIA 1B: MÁSCARA X DCRL.....	234
ILUSTRAÇÃO 181 – TIPOLOGIA 2A: MÁSCARA X DCRL.....	235
ILUSTRAÇÃO 182 - TIPOLOGIA 2B: MÁSCARA X DCRL	235
ILUSTRAÇÃO 183 - TIPOLOGIA 3: MÁSCARA X DCRL.....	235
ILUSTRAÇÃO 184 – TIPOLOGIAS 2 E 3: CORTE TÍPICO	236
ILUSTRAÇÃO 185 – FLUXOGRAMA PARA AJUSTE DE L_{TH}	243
ILUSTRAÇÃO 186 – DIAGRAMA POLAR X CENAS DOS EMBOQUES.....	245
ILUSTRAÇÃO 187 – PONTO DE ADAPTAÇÃO	246
ILUSTRAÇÃO 188 – ZONA DE TRANSIÇÃO: ÁBACO PARA DETERMINAÇÃO DE L_{TR} E C_{TR}	248
ILUSTRAÇÃO 189 – GRADE CAIXA-DE-OVO: ÁBACO DO FATOR DE TRANSMISSÃO DA LUZ DIFUSA ..	253

ILUSTRAÇÃO 190 – TÚNEL THOROLD: VISTA GERAL DO EMBOQUE OESTE	259
ILUSTRAÇÃO 191 – FICHA RESUMO MODELO	262
ILUSTRAÇÃO 192 – ESTRATÉGIA 1. TI-3 VISTA ALEGRE: MÉTODO L_{seq}.....	265
ILUSTRAÇÃO 193 – ESTRATÉGIA 2: (A) TRAÇADO DE MÁSCARAS ; (B) DIMENSÕES DO MÓDULO ...	267
ILUSTRAÇÃO 194 – ESTRATÉGIA 2. TI-3 VISTA ALEGRE: ELEVAÇÃO FRONTAL	267
ILUSTRAÇÃO 195 – ESTRATÉGIA 2: FATOR DE TRANSMISSÃO DA LUZ DIFUSA.....	269
ILUSTRAÇÃO 196 – ESTRATÉGIA 2. TI-3 VISTA ALEGRE: SIMULAÇÃO RADIANCE (ISOLINHAS)	271
ILUSTRAÇÃO 197 – ESTRATÉGIAS 1 E 2. TI-3 VISTA ALEGRE: MÉTODO L_{seq}.....	272
ILUSTRAÇÃO 198 – TI-3 VISTA ALEGRE: (A) EXISTENTE; (B) ESTRATÉGIAS 1 E 2	273
ILUSTRAÇÃO 199 – ESTRATÉGIAS 1 E 2. TI-3 V. ALEGRE: EXTENSÃO DA Z. TRANSIÇÃO	274
ILUSTRAÇÃO 200 – ESTRATÉGIAS 3. TI-2 TAMBORÉ: TRAÇADO DE MÁSCARAS	276
ILUSTRAÇÃO 201 – ESTRATÉGIA 3. TI-2 TAMBORÉ: PLANTA, VISTA, CORTE E DETALHE	278
ILUSTRAÇÃO 202 – ESTRATÉGIA 3. TI-2 TAMBORÉ: PERSPECTIVA ISOMÉTRICA.....	278
ILUSTRAÇÃO 203 – ESTRATÉGIA 3: SIMULAÇÃO E3-A. (CÉU CLARO)	279
ILUSTRAÇÃO 204 – ESTRATÉGIA 3: SIMULAÇÃO E3-B (CÉU ENCOBERTO)	280
ILUSTRAÇÃO 205 – SIMULAÇÃO E3-A. (CÉU CLARO): (A) OLHO HUMANO; (B) FALSA COR	281
ILUSTRAÇÃO 206 – ESTRATÉGIAS 1, 2 E 3. TI-2 TAMBORÉ: MÉTODO L_{seq}	282
ILUSTRAÇÃO 207 – TI-2 TAMBORÉ: (A) EXISTENTE; (B) ESTRATÉGIAS 1, 2 E 3.....	283
ILUSTRAÇÃO 208 – ESTRATÉGIAS 1, 2 E 3. TI-2 TAMBORÉ: EXTENSÃO DA Z. TRANSIÇÃO	284
ILUSTRAÇÃO 209 – VISTA DO TE-3 GRAMADO	286
ILUSTRAÇÃO 210 – ESTRATÉGIAS 1 E 2. TE-3 GRAMADO: MÉTODO L_{seq}.....	287
ILUSTRAÇÃO 211 – TE-3 GRAMADO: (A) EXISTENTE; (B) ESTRATÉGIAS 1 E 2.....	290
ILUSTRAÇÃO 212 – ESTRATÉGIAS 1 E 2. TE-3 GRAMADO: EXTENSÃO DA Z. TRANSIÇÃO	290
ILUSTRAÇÃO 213– ESTRATÉGIA 4. TE-3 GRAMADO: DIMENSÕES DO DAV.....	291
ILUSTRAÇÃO 214– ESTRATÉGIA 4: CORTE TRANSVERSAL	293
ILUSTRAÇÃO 215– ESTRATÉGIA 4: ELEVAÇÃO DO PORTAL DE ENTRADA.....	293
ILUSTRAÇÃO 216– ESTRATÉGIA 4. TE-3 GRAMADO: VISTA GERAL DO DAV	294
ILUSTRAÇÃO 217– ESTRATÉGIA 4. TE-3 GRAMADO: VISTA FRONTAL DO DAV	295
ILUSTRAÇÃO 218 – ESTRATÉGIA 4: SOLSTÍCIO DE VERÃO CÉU CLARO 12H	295
ILUSTRAÇÃO 219 – ESTRATÉGIA 4: EQUINÓCIO DE OUTONO CÉU CLARO 12H	296
ILUSTRAÇÃO 220 – ESTRATÉGIA 4: SOLSTÍCIO DE INVERNO CÉU CLARO 12H	296
ILUSTRAÇÃO 221 – ESTRATÉGIA 4: SOLSTÍCIO DE INVERNO CÉU ENCOBERTO 12H	297
ILUSTRAÇÃO 222 – ESTRATÉGIA 4: FATOR DE LUZ DIURNA (FLD)	297
ILUSTRAÇÃO 223 – ESTRATÉGIAS 4 E 5 INTEGRADAS. (A) PLANTA; (B) VISTA ISOMÉTRICA.....	301
ILUSTRAÇÃO 224 – ESTRATÉGIA 4: FATOR DE LUZ DIURNA (FLD)	302
ILUSTRAÇÃO 225 – ESTRATÉGIAS 4 E 5 SOBREPOSTAS: (A) PLANTA; (B) VISTA ISOMÉTRICA	302
ILUSTRAÇÃO 226 – AJUSTE DA CÉLULA. (A) CÉLULA EM PLANTA (B) TELA EM PLANTA	303
ILUSTRAÇÃO 227 – ESTRATÉGIAS 4 E 5 AJUSTADAS: (A) PLANTA (B) VISTA ISOMÉTRICA	305

ILUSTRAÇÃO 228 – TE-1: (A) ILUMINAÇÃO TOTAL 17:00H; (B) ILUMINAÇÃO PARCIAL 17:10H....	311
ILUSTRAÇÃO 229 – TE-3: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS SISTEMAS.....	313
ILUSTRAÇÃO 230 – CASA BATLÓ: POÇO DE ILUMINAÇÃO.....	320
ILUSTRAÇÃO 231 – TE-2 EMBOQUE PARQUE IMPERIAL: VISTA PRÓXIMA AO PORTAL.....	320
ILUSTRAÇÃO 232 – ADAPTAÇÕES DA ILUMINAÇÃO ZENITAL.....	325
ILUSTRAÇÃO 233 – VARIAÇÕES DA LUZ DIFUSA COM A INCLINAÇÃO DA CÉLULA.....	327

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CONSTANTES DE DISPONIBILIDADE DE ILUMINAÇÃO NATURAL	45
TABELA 2 – COEFICIENTE C_1 EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE OBSTRUÇÃO	76
TABELA 3 – TIPOS DE TRANSFERÊNCIA DE FLUXO.....	80
TABELA 4 – TÚNEIS COM TÚNEL FALSO	139
TABELA 5 – CUSTOS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICO E DIESEL (20 ANOS)	140
TABELA 6 – ANSI/IESNA: VELOCIDADE X DISTÂNCIA SEGURA DE FRENAGEM.....	142
TABELA 7 – LUMINÂNCIA MÉDIA L_{TH} PARA A ZONA LIMIAR	144
TABELA 8 – ÂNGULOS PARA CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA POLAR.....	145
TABELA 9 – SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DA ILUMINAÇÃO	146
TABELA 10 – CRITÉRIO SUBJETIVO DE AVALIAÇÃO	147
TABELA 11 – RAZÃO RECOMENDADA L_{TH} / L_{SEQ}	148
TABELA 12 – ANÁLISE COMPARATIVA: CIE; BSI; ANSI/IESNA; ABNT	152
TABELA 13 – LUMINÂNCIAS DE VÉU DA ATMOSFERA E DO PÁRA-BRISA.....	158
TABELA 14 – ORIENTAÇÕES DOS EMBOQUES DOS TÚNEIS DO RODOANEL	172
TABELA 15 – ILUMINAÇÃO DOS TÚNEIS DO RODOANEL: CONSUMO MENSAL	172
TABELA 16 – TE-2 FAIXA 3: SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DA ILUMINAÇÃO.....	180
TABELA 17 – TE-2 FAIXA 4: SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DA ILUMINAÇÃO.....	180
TABELA 18 – REFLETÂNCIAS DA PISTA	182
TABELA 19 – EMBOQUE JESUS (TE-1): CÁLCULO DE L_{TH} (MÉTODO L_{SEQ}).....	187
TABELA 20 – EMBOQUE ITAHYÊ (TI-1): CÁLCULO DE L_{TH} (MÉTODO L_{SEQ}).....	188
TABELA 21 – EMBOQUE P. IMPERIAL (TE-2): CÁLCULO DE L_{TH} (MÉTODO L_{SEQ}).....	189
TABELA 22 – EMBOQUE TAMBORÉ (TI-2): CÁLCULO DE L_{TH} (MÉTODO L_{SEQ})	190
TABELA 23 – EMBOQUE GRAMADO (TE-3): CÁLCULO DE L_{TH} (MÉTODO L_{SEQ}).....	191
TABELA 24 – EMBOQUE VISTA ALEGRE (TI-3): CÁLCULO DE L_{TH} (MÉTODO L_{SEQ}).....	192
TABELA 25 – EMBOQUE P. IMPERIAL (TE-2): CÁLCULO DE L_{TH} (MÉTODO L_{20}).....	193
TABELA 26 – MÉTODO L_{SEQ} : RESUMO DOS RESULTADOS	194
TABELA 27 – TIPOLOGIA 1: PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES	204
TABELA 28 – CÁLCULO DAS ARESTAS DA CÉLULA DE BASE QUADRADA	217
TABELA 29 – TIPOLOGIA 2: PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES	218
TABELA 30 – CÁLCULO DAS ARESTAS DA CÉLULA DE BASE-PARALELOGRAMO	223
TABELA 31 – TIPOLOGIA 3: PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES A, B, C E D	225
TABELA 32 – TIPOLOGIAS 1, 2 E 3: RESUMO DOS RESULTADOS	231
TABELA 33 – TIPOLOGIAS 1, 2 E 3: PARCELA DE CÉU VISÍVEL.....	236
TABELA 34 – TIPOLOGIAS 1, 2 E 3: TRANSMISSÃO DA LUZ	237
TABELA 35 – VOLUME DE TRÁFEGO.....	242
TABELA 36 – DISTÂNCIA SEGURA DE FRENAGEM (DSF)	243
TABELA 37 – LUMINÂNCIA NA ZONA INTERIOR (L_{IN})	249

TABELA 38 – LUMINÂNCIAS TÍPICAS NAS IMEDIAÇÕES DO PORTAL	254
TABELA 39 – ESTRATÉGIA 1. TI-3 VISTA ALEGRE: MÉTODO L_{SEQ}	265
TABELA 40 – ESTRATÉGIAS 1 E 2. TI-3 VISTA ALEGRE: MÉTODO L_{SEQ}	272
TABELA 41 – ESTRATÉGIAS 1 E 2. TI-3 VISTA ALEGRE: RESULTADOS.....	273
TABELA 42 – ESTRATÉGIAS 1 E 2. TI-3 VISTA ALEGRE: FICHA RESUMO	275
TABELA 43 – ESTRATÉGIA 3. TI-2 TAMBORÉ: PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES	279
TABELA 44 – ESTRATÉGIAS 1, 2 E 3. TI-2 TAMBORÉ: MÉTODO L_{SEQ}	282
TABELA 45 – ESTRATÉGIAS 1, 2 E 3. TI-2 TAMBORÉ: RESULTADOS	283
TABELA 46 – ESTRATÉGIAS 1, 2 E 3. TI-2 TAMBORÉ: FICHA RESUMO	285
TABELA 47 – ESTRATÉGIA 1. TE-3 GRAMADO: MÉTODO L_{SEQ}	288
TABELA 48 – ESTRATÉGIA 2. TE-3 GRAMADO: MÉTODO L_{SEQ}	288
TABELA 49 – ESTRATÉGIAS 1 E 2. TE-3 GRAMADO: MÉTODO L_{SEQ}	289
TABELA 50 – ESTRATÉGIAS 1 E 2. TE-3 GRAMADO: RESULTADOS	289
TABELA 51 – ESTRATÉGIA 4: ESTÁGIOS DE ILUMINAÇÃO	294
TABELA 52 – ESTRATÉGIA 4: ILUMINÂNCIAS NOS MÓDULOS TÍPICOS DOS ESTÁGIOS (IL.220)	299
TABELA 53 – ESTRATÉGIAS 1, 2, 3 E 4. TE-3 GRAMADO: FICHA RESUMO	300
TABELA 54 – TÚNEL 3: ALTERAÇÃO NO CONSUMO (ESTRATÉGIAS 1, 2, 3 E 4).....	306
TABELA 55 – ESTRATÉGIA 5: CÁLCULO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	306
TABELA 56 – ESTRATÉGIAS 1, 2, 3, 4 E 5. GRAMADO (TE-3): FICHA RESUMO	308
TABELA 57 – TE-3: ANÁLISE DO DESEMPENHO CUMULATIVO DAS ESTRATÉGIAS.....	312
TABELA 58 – ANÁLISE COMPARATIVA: ALTERNATIVA A X ALTERNATIVA B.....	315
TABELA 59 – ANÁLISE DO CUSTO DA ILUMINAÇÃO DA ZONA LIMAR	349

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
BRDF	<i>Bidirectional Reflectance Distribution Function</i>
BRE	<i>British Research Establishment</i>
BSI	<i>British Standards Institution</i>
BTDF	<i>Bidirectional Transmittance Distribution Function</i>
CC	Componente Celeste;
CIE	<i>Comission Internationale d'Éclerage</i>
CRE	Componente de Reflexão Externa;
CRI	Componente de Reflexão Interna.
DAV	Dispositivo para Adaptação Visual
DCRL	Diagrama de Contribuição Relativa de Luz
DERSA	Desenvolvimento Rodoviário S. A.
DF	<i>Daylight Factor</i>
DLN	Disponibilidade de Luz natural
DSF	Distância Segura de Frenagem
FLD	Fator de luz do dia
FPL	Fator de Perda de Luz
IDMP	<i>International Daylight Measurement Programme</i>
IES	<i>Illuminating Engineering Society</i>
IESNA	<i>Illuminating Engineering Society of North America</i>
MAVD	Média Anual de Veículos por Dia
NBR	Normas Brasileiras
PSALI	<i>Permanent Supplementary Artificial Lighting of Interiors</i>
SAV	Sistema para Adaptação Visual
SC	Sistema Convencional
SRN	<i>Safety Rating Number.</i>

SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO.....	II
--------------------------------	-----------

AGRADECIMENTOS	VII
-----------------------------	------------

RESUMO	IX
---------------------	-----------

ABSTRACT	XI
-----------------------	-----------

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	XIII
-----------------------------------	-------------

LISTA DE TABELAS	XXI
-------------------------------	------------

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XXIII
--	--------------

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	1
------------------------------------	----------

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
---	----------

2.1 VISÃO: EXIGÊNCIAS HUMANAS.....	7
2.1.1 O OLHO HUMANO.....	7
2.1.1.1 ESTRUTURA E FUNCIONAMENTO DO OLHO HUMANO.....	8
2.1.1.2 CAMPO VISUAL	9
2.1.1.3 VISÃO FOTÓPICA, ESCOTÓPICA E MESÓPICA	10
2.1.2 SENSIBILIDADE VISUAL	11
2.1.2.1 ACOMODAÇÃO.....	11
2.1.2.2 ADAPTAÇÃO	11
2.1.2.3 OFUSCAMENTO.....	14
2.2 FUNDAMENTOS DA FOTOMETRIA	16
2.2.1 GRANDEZAS, UNIDADES E RELAÇÕES FOTOMÉTRICAS.....	17
2.2.2 PROPOSTA DE MODELO ELEMENTAR INCORPORANDO A LUMINÂNCIA	23
2.3 ILUMINAÇÃO NATURAL E INSOLAÇÃO.....	31
2.3.1 O SOL E O CÉU COMO FONTES DE LUZ	38
2.3.1.1 LUZ DO SOL	40
2.3.1.2 LUZ DO CÉU	42
2.4 CONTROLE ÓPTICO	52

CAPÍTULO 3: MÉTODOS, FERRAMENTAS DE CÁLCULO E SISTEMAS DE CONTROLE APLICADOS À LUZ NATURAL..... 59

3.1	MÉTODO DOS LUMENS	60
3.1.1	ILUMINAÇÃO ZENITAL	61
3.1.2	ILUMINAÇÃO LATERAL.....	61
3.2	MÉTODO DO FATOR DE LUZ DIURNA (FLD).....	62
3.2.1	COMPONENTE CELESTE (CC): MÉTODO DE WALDRAM	64
3.2.2	COMPONENTE CELESTE (CC): DIAGRAMAS DE PONTOS PLEIJEL E MOORE	65
3.2.3	COMPONENTE CELESTE (CC): MÉTODO ABNT.....	69
3.2.4	COMPONENTE CELESTE (CC): MÉTODO BRE.....	71
3.2.5	COMPONENTE DE REFLEXÃO EXTERNA – CRE.....	74
3.2.6	COMPONENTE DE REFLEXÃO INTERNA – CRI.....	75
3.3	MÉTODO DA TRANSFERÊNCIA DE FLUXO.....	80
3.3.1	FATOR DE CONFIGURAÇÃO	81
3.3.2	FATOR DE FORMA	85
3.3.3	INTER-REFLEXÃO DA LUZ.....	87
3.4	MODELOS COMPUTACIONAIS	88
3.5	MODELOS FÍSICOS EM ESCALA REDUZIDA.....	95
3.6	CONTROLE DA LUZ NATURAL: SISTEMAS E MECANISMOS	97
3.6.1	SISTEMAS CONVENCIONAIS	99
3.6.2	SISTEMAS INOVADORES.....	101
3.6.3	SOLUÇÕES DE SOMBREAMENTO NA ARQUITETURA MODERNISTA BRASILEIRA.....	106
3.6.4	A LUZ NATURAL NAS OBRAS DE ALVAR AALTO.....	114
3.7	CONSIDERAÇÕES COMPLEMENTARES	116

CAPÍTULO 4: ILUMINAÇÃO DE TÚNEIS RODOVIÁRIOS: CONTEXTUALIZAÇÃO..... 119

4.1	TERMINOLOGIA.....	123
4.2	PROBLEMÁTICA ENVOLVIDA NA ILUMINAÇÃO DE TÚNEIS: RETROSPECTIVA	126
4.3	EXEMPLOS DE SISTEMAS PARA ADAPTAÇÃO VISUAL (SAV)	132
4.3.1	TRATAMENTO DO PORTAL	133
4.3.2	TÚNEL FALSO.....	134
4.3.3	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	140
4.4	NORMAS E RECOMENDAÇÕES	141
4.4.1	CLASSIFICAÇÃO DOS TÚNEIS	141
4.4.2	NÍVEIS DE ILUMINAÇÃO NO INTERIOR DO TÚNEL	143
4.4.2.1	ABNT	143
4.4.2.2	ANSI/IESNA, CIE E BSI.....	144
4.4.3	PONTO DE ADAPTAÇÃO.....	149
4.4.4	EXTENSÕES DAS ZONAS.....	150
4.4.5	INTERMITÊNCIA.....	151
4.4.6	UNIFORMIDADE	151
4.4.7	ANÁLISE COMPARATIVA: TABELA RESUMO	152
4.4.8	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS RECENTES EDIÇÕES CIE E ANSI/IESNA.....	157
4.5	A PRÁTICA BRASILEIRA.....	159

CAPÍTULO 5: BASE EMPÍRICA E CÁLCULO DA LUMINÂNCIA NA ZONA LIMAR (L_{TH})... 169

5.1	DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS	170
5.2	LEVANTAMENTOS E MEDIÇÕES.....	173
5.2.1	PLANEJAMENTO	173
5.2.2	EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS	175
5.2.3	PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO1 (PR-1).....	177
5.2.4	PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO 2 (PR-2)	181

5.2.5	PROCEDIMENTOS COMPLEMENTARES	181
5.3	CÁLCULO DA LUMINÂNCIA NA ZONA LIMIAR	183
5.3.1	DESCRIÇÃO DO MÉTODO L_{SEQ} (MÉTODO DE LUMINÂNCIA DE VÉU EQUIVALENTE)	183
5.3.2	PROCEDIMENTO DE CÁLCULO	184
5.3.3	MÉTODO L_{SEQ} : TÚNEL 1 - ANHANGUERA: EMBOQUE JESUS (TE-1)	187
5.3.4	MÉTODO L_{SEQ} : TÚNEL 1 - ANHANGUERA: EMBOQUE ITAHYÊ (TI-1)	188
5.3.5	MÉTODO L_{SEQ} : TÚNEL 2 - TAMBORÉ: EMBOQUE PARQUE IMPERIAL (TE-2)	189
5.3.6	MÉTODO L_{SEQ} : TÚNEL 2 - TAMBORÉ: EMBOQUE TAMBORÉ (TI-2)	190
5.3.7	MÉTODO L_{SEQ} : TÚNEL 3 - R. BITTENCOURT: EMBOQUE GRAMADO (TE-3)	191
5.3.8	MÉTODO L_{SEQ} : TÚNEL 3 - R. BITTENCOURT: EMBOQUE V. ALEGRE (TI-3)	192
5.3.9	MÉTODO L_{20} : TÚNEL 2 - TAMBORÉ: EMBOQUE PARQUE IMPERIAL (TE-2)	193
5.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	194

CAPÍTULO 6: DISPOSITIVO PARA ADAPTAÇÃO VISUAL (DAV) 201

6.1	TIPOLOGIA 1: ABERTURA ZENITAL EM <i>SHED</i>	203
6.2	REVISÃO DO PROCEDIMENTO DE CÁLCULO	210
6.2.1	O MÉTODO DE SWIERSTRA	211
6.2.2	ADAPTAÇÃO DO MÉTODO DE SWIERSTRA PARA QUALQUER LATITUDE	213
6.3	TIPOLOGIA 2: CÉLULA-PRISMA DE BASE QUADRADA.....	216
6.4	APRIMORAMENTO DA ADAPTAÇÃO DO MÉTODO DE SWIERSTRA.....	221
6.5	TIPOLOGIA 3: CÉLULA-PRISMA DE BASE-PARALELOGRAMO	222
6.5.1	TIPOLOGIA 3: SIMULAÇÕES RADIANCE / ECOTECT	224
6.5.2	TIPOLOGIA 3: VERIFICAÇÃO DA PENETRAÇÃO SOLAR	232
6.6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	233

CAPÍTULO 7: DIRETRIZES PARA PROJETO E DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA PARA ADAPTAÇÃO VISUAL (SAV) 241

7.1	PARÂMETROS DE PROJETO, CÁLCULO E DIMENSIONAMENTO.....	241
7.1.1	DADOS DO TÚNEL.....	242
7.1.2	DADOS DO TRÁFEGO	242
7.1.3	CLASSIFICAÇÃO DO TÚNEL	243
7.1.4	CLASSIFICAÇÃO DO EMBOQUE DE ENTRADA	243
7.1.5	ZONA LIMIAR	246
7.1.5.1	PONTO DE ADAPTAÇÃO.....	246
7.1.5.2	COMPRIMENTO (C_{TH})	247
7.1.5.3	LUMINÂNCIA DA ZONA LIMIAR (L_{TH})	247
7.1.6	ZONA DE TRANSIÇÃO	247
7.1.7	ZONA INTERIOR	248
7.1.8	ZONA DE SAÍDA	249
7.1.9	INTERMITÊNCIA E UNIFORMIDADE	250
7.2	ESTRATÉGIAS PARA COMPOSIÇÃO DO SAV.....	250
7.2.1	ESTRATÉGIA 1: TRATAMENTO SUPERFICIAL	251
7.2.2	ESTRATÉGIA 2: ELEMENTOS DE CONTROLE DA LUZ	252
7.2.3	ESTRATÉGIA 3: DESENHO DO PORTAL	255
7.2.4	ESTRATÉGIA 4: TÚNEL FALSO (DAV)	256
7.2.5	ESTRATÉGIA 5: MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	257
7.3	PROJETO ARQUITETÔNICO	258
7.4	FICHA RESUMO: DADOS, PARÂMETROS E RESULTADOS	261

CAPÍTULO 8: SAV - SISTEMA PARA ADAPTAÇÃO VISUAL APLICADO AOS TÚNEIS DO RODOANEL MÁRIO COVAS 263

8.1	ESTRATÉGIAS 1 E 2: TI-3 VISTA ALEGRE.....	264
	8.1.1 ESTRATÉGIA 1: TRATAMENTO SUPERFICIAL (PISTA)	264
	8.1.2 ESTRATÉGIA 2: CONTROLE DA LUZ (GRADE TIPO CAIXA-DE-OVO E PAISAGISMO).....	266
	8.1.3 ESTRATÉGIAS 1 E 2: ANÁLISE DOS RESULTADOS	273
8.2	ESTRATÉGIA 3 (DESENHO DO PORTAL): TI-2 TAMBORÉ	276
	8.2.1 VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO LUMINOSO	279
	8.2.2 ESTRATÉGIA 3: ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	283
8.3	ESTRATÉGIA 4 (DAV): TE-3 GRAMADO	286
	8.3.1 PROCEDIMENTOS PRELIMINARES: ESTRATÉGIAS 1 E 2.....	287
	8.3.2 ESTRATÉGIA 4: ESTUDO PRELIMINAR	291
	8.3.3 ESTRATÉGIA 4: SIMULAÇÕES	295
	8.3.4 ESTRATÉGIA 4: ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	298
8.4	ESTRATÉGIA 5 (MÓDULOS FOTOVOLTAICOS): TE-3 GRAMADO	301
	8.4.1 AJUSTE DA CÉLULA (ESTRATÉGIA 4) PARA SUPORTE DA ESTRATÉGIA 5	303
	8.4.2 ESTRATÉGIA 5: CÁLCULO E DIMENSIONAMENTO	305
	8.4.3 ESTRATÉGIA 5: ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	307

CAPÍTULO 9: CONSIDERAÇÕES FINAIS 309

9.1	SEGURANÇA.....	310
9.2	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	311
9.3	ARQUITETURA E CONFORTO VISUAL.....	317
9.4	CONCLUSÕES E PROPOSTA DE PESQUISAS PARA DESENVOLVIMENTO FUTURO	321

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 329

GLOSSÁRIO 341

APÊNDICE A – ANÁLISE SIMPLIFICADA COMPARATIVA DE CUSTOS: DAV X SC..... 349

ANEXO A – RODOANEL MÁRIO COVAS: DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA (DERSA)..... 353

ANEXO B – CONVERSÃO DE UNIDADES 381

NOTA: Sobreposto ao verso da capa posterior está inserido um encarte contendo a síntese das intervenções arquitetônicas propostas.

Capítulo 1: INTRODUÇÃO

O propósito da iluminação de túneis rodoviários é garantir ao motorista o ingresso seguro de acordo com uma velocidade preestabelecida. Assim, ocupa uma posição especial na iluminação pública, pois, no período diurno, quando a iluminação artificial não está normalmente em uso, é que surgem os problemas, em decorrência de três causas:

- A grande diferença entre o nível de iluminação exterior e interior do túnel;
- As propriedades do olho humano (adaptação);
- O elevado consumo de energia.

Em geral, analisam-se dois fenômenos distintos para o projeto luminotécnico. O primeiro se refere ao ofuscamento, conhecido como **Efeito Buraco Negro**. Este fenômeno, provocado pelo alto brilho do entorno do portal, ocorre quando o motorista se aproxima do emboque do túnel. Se o primeiro trecho do túnel não tiver iluminação suficiente, o interior do túnel pode ser visto como um buraco escuro, impossibilitando a visão de detalhes no seu interior. O segundo fenômeno está relacionado à adaptação temporal da visão do motorista, quando ocorre uma gradual redução no nível de iluminação em um curto espaço de tempo, para fazer a transição entre o nível máximo do primeiro trecho e o nível mínimo necessário no interior do túnel. Aqui, a característica dinâmica é importante na análise.

A iluminação deve permitir identificar facilmente, a uma distância segura, qualquer objeto que ofereça perigo ao tráfego e, se não houver qualquer obstáculo à sua frente, o motorista precisa estar seguro de que a rodovia está livre.

Além dos aspectos quantitativos, ao se ingressar no túnel, alteram-se as condições acústicas e toda a ambiência, implicando em uma rápida adaptação física e mental. Entretanto, como dirigir é uma tarefa predominantemente visual, uma boa iluminação pode assegurar que outros aspectos não sejam tão importantes (SCHREUDER In: BOER, 1967, p.157).

A solução normalmente adotada tem sido o emprego de luz artificial, mas esta apresenta alguns inconvenientes. O nível exterior de iluminação pode atingir altos valores (acima de 100.000 lx em plano horizontal com incidência direta do Sol). Pela

recomendação brasileira, a luz artificial é projetada para quatro estágios, cuja extensão varia de acordo com a velocidade permitida, adotando os seguintes níveis de iluminação: 2.700, 900, 300 e 100 lx. Estima-se, para o primeiro estágio, uma potência de alimentação da ordem de 70 kW. Considerando o período aproximado de 12 horas de funcionamento e a área atingida em torno de 1.000 m², pode-se ter uma idéia do consumo, correspondente à iluminação diurna, apenas neste trecho (28,8 kWh / m² mês). Para se ter uma idéia de grandeza, nos estudos de Roméro (1994, cap.5, p.20) em edifícios de ensino superior na Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira, observou-se um consumo médio de 5,3 kWh / m² mês. Este valor representou 50% do consumo médio de estabelecimentos de ensino franceses. Tal diferença foi atribuída à necessidade de aquecimento no inverno e condicionamento durante o verão. Esses valores comparados ao consumo para iluminação diurna, no trecho inicial de túneis rodoviários, induzem à possibilidade de algum contra-senso em relação ao uso da energia.

Outro inconveniente está relacionado à segurança. No caso de falta de energia, o sistema pode ficar desguarnecido, e o reflexo do motorista, acometido de uma cegueira temporária, pode ser frear. Embora possam ser utilizados geradores, existem diversos fatores, na eventualidade de um colapso energético, que comprometem a eficiência e dificultam sua aplicação.

O fenômeno submete a visão do motorista a condições extremas de exigência, sendo impraticável atingir as condições de conforto pelo sistema de iluminação artificial. Este é dimensionado para a situação crítica, quando a luz solar direta incide nas imediações da entrada do túnel. Entretanto, a faixa de variação da luz natural é ampla, incorrendo no desajuste do sistema, na maior parte do período diurno, com implicações no conforto e na eficiência energética.

O objetivo deste trabalho é a concepção de um **Sistema para Adaptação Visual (SAV)**, utilizando a luz natural como alternativa para atender aos requisitos necessários para iluminação de túneis. O desempenho que se pretende atingir com o **SAV** não deverá apresentar os inconvenientes identificados no **Sistema Convencional (SC)**, constituído pela iluminação artificial. No quesito **segurança**, o **SAV** independe do fornecimento de energia. Conseqüentemente, o **consumo de energia elétrica** deverá apresentar significativa diminuição, como também se esperam vantagens em relação à manutenção e operação do sistema. Por fim, a

sazonalidade, própria da iluminação natural, será acompanhada no interior do sistema, proporcionando maior **conforto visual**.

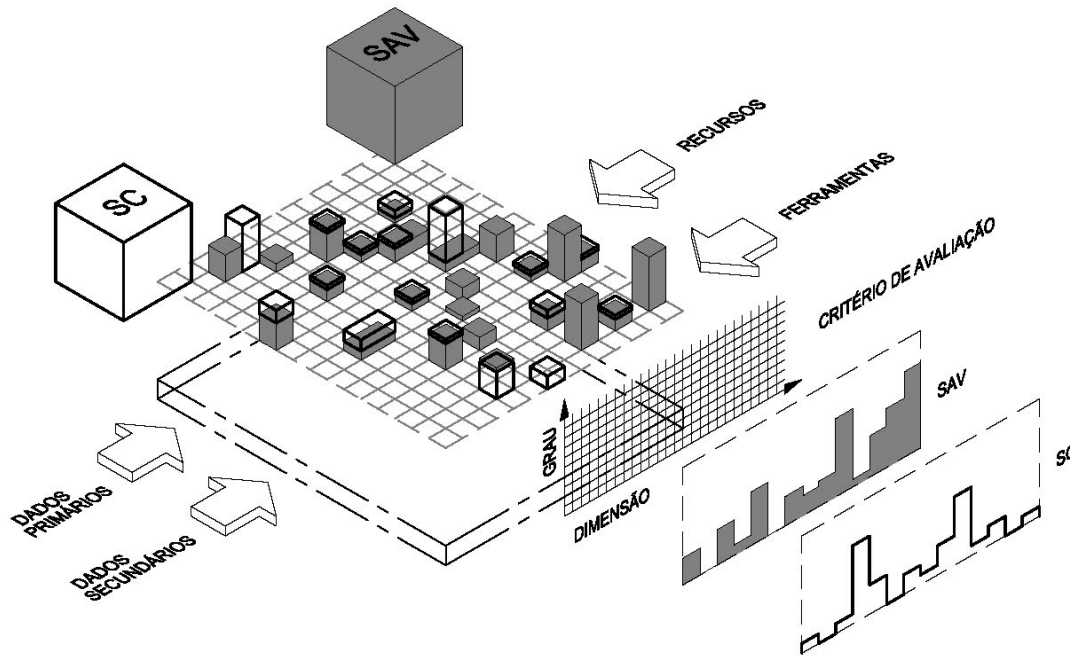
Relacionando o **SAV** ao tratamento, aproveitamento e transformação da luz natural proporcionados através da arquitetura, formulou-se a seguinte hipótese:

“Na iluminação diurna de túneis rodoviários, soluções arquitetônicas são recursos para atender às exigências de segurança, eficiência energética e conforto visual.”

O **SAV** poderá apresentar impropriedades que são inexistentes no **SC** e vice-versa. Portanto, deverá ser feita uma avaliação comparativa para pôr à prova os resultados, pois cada sistema irá atender a um conjunto diferente de elementos da problemática, com graus de eficiência também diferenciados, sendo necessário estabelecer critérios de avaliação, que permitirão confrontar os resultados.

Na IL.1, os sistemas estão indicados em dois cubos. A problemática corresponde a um plano reticulado, em que cada quadrícula, ou conjunto de quadrículas, representa seus elementos. Podem-se identificar as regiões atendidas por cada sistema, que são representadas em fundo cinza / linha fina para o **SAV**, e fundo branco / linha grossa para o **SC**. A altura das quadrículas significa o grau de eficiência de cada sistema para determinado elemento. Nota-se que algumas áreas da problemática podem permanecer sem preenchimento, ou seja, não foram atendidas por nenhum dos sistemas.

Ao projetarmos o somatório dos blocos elementares da eficiência de cada sistema em um plano perpendicular ao plano da problemática, forma-se um gráfico que permite estimar o desempenho dos sistemas. O eixo das abscissas representa a dimensão dos elementos, e o das ordenadas, o grau de eficiência dos sistemas, ambos definidos em função de um Critério de Avaliação. O desempenho é obtido pela área definida no gráfico. Nesta representação, comprova-se a hipótese da pesquisa, se a área definida pelo **SAV** for maior que a definida pelo **SC**.



Sistema para Adaptação Visual (SAV)

- Túnel Falso
- Dispositivo de Sombreamento
- Placas Difusoras
- Placas Refletoras
- Painéis Fotovoltaicos
- Refletância
- Geometria do Portal

Problemática

- Segurança
- Conforto
- Exigências Visuais Humanas
- Consumo Energético
- Tecnologia
- Ventilação
- Espaço
- Estética
- Impacto Ambiental
- Custo
- Manutenção
- Operação
- Geometria da Insolação
- Sistemas Construtivos
- Qualidade
- Recursos

Fenômeno

1. Ofuscamento
2. Adaptação Visual

Sistema Convencional (SC)

- Pérgola
- Iluminação Artificial
- Lâmpadas Eficientes
- Sensores
- Gerador de Emergência
- Automação

CrITÉrios de Avaliação

- Redução do Consumo
- Atendimento às Exigências de Iluminação
- Autonomia

ILUSTRAÇÃO 1 – Modelo da Pesquisa

O Perfil Epistemológico proposto por Bachelard (1984) mostra como um conhecimento consolidado no senso comum, aquilo que se acredita evidente, pode obscurecer o conhecimento científico. Nas primeiras investigações sobre o **SAV**, o pensamento comum, no meio especializado consultado, conduzia à inexistência de experiências anteriores. Entretanto, uma primeira busca criteriosa conseguiu localizar quatro obras executadas com sistemas alternativos para iluminação de túneis (GRAAFF In: BOER, 1967, p.649-65), o que serviu para um diagnóstico preliminar das possibilidades e viabilidade do objeto de estudo.

A IL.2 apresenta um diagrama da Estrutura da Pesquisa. A Base Teórica está distribuída nos Capítulos 2, 3 e 4, sendo que, nos dois primeiros, estão questões gerais relacionadas ao tema. O Capítulo 2 discorre sobre a visão humana, os fundamentos da fotometria e as características peculiares da luz natural. O Capítulo 3 apresenta os recursos para predição e manipulação da luz natural no ambiente construído, incluindo métodos e procedimentos de cálculo, sistemas de controle e exemplos de aplicação, utilizados por alguns arquitetos modernistas. No Capítulo 4, são tratados aspectos específicos, mostrando em detalhes a terminologia e problemática envolvidas na iluminação de túneis rodoviários, incluindo uma discussão sobre as instruções normativas nacionais e internacionais, que dará os subsídios para concepção do **SAV**.

A Base Empírica concentra-se no Capítulo 5, contendo os levantamentos e medições nos túneis do trecho Oeste do Rodoanel Mário Covas. Estes dados são utilizados em um método de cálculo específico (Método L_{seq}), que possibilita estimar a iluminação necessária no interior do túnel para evitar o **Efeito Buraco Negro**. A descrição e aplicação do Método L_{seq} , em todos os emboques, também consta neste capítulo.

A partir do Capítulo 6, inicia-se a fase propositiva do trabalho, que se estende até o Capítulo 8. **O Dispositivo para Adaptação Visual (DAV)**, que consta no Capítulo 6, configurou o elemento de maior complexidade e potencial dentro do **SAV**, e por isso foi tratado de maneira diferenciada. Tanto na proposta de Suda (1993) como nas obras selecionadas por Graaff (1967), o sistema é constituído exclusivamente por este dispositivo, o que reforça sua importância na pesquisa.

O Capítulo 7 fornece as diretrizes para concepção do **SAV**, recomendando os parâmetros a serem adotados – resultado da análise das instruções normativas discutidas no Capítulo 4 – e propondo Cinco Estratégias para compor o sistema.

As Estratégias são aplicadas no Capítulo 8, selecionando alguns emboques dos túneis do Rodoanel Mário Covas. Adotaram-se procedimentos práticos, incluindo uma Ficha Resumo para organização e apresentação dos dados e resultados. A cada aplicação, os resultados foram identificados e analisados, permitindo estimar o desempenho isolado e também acumulado das diversas Estratégias.

Formaram-se, assim, duas vertentes: a primeira, contendo o Objeto Modelo, e a segunda, os recursos para avaliar os resultados, que são confrontados no Capítulo 9, verificando seu rebatimento nas três condicionantes do projeto luminotécnico, tomadas *a priori*: **segurança, eficiência energética e conforto visual**. Constam, neste último capítulo, algumas sugestões para desenvolvimento futuro da pesquisa, incluindo desdobramentos identificados no decorrer do trabalho com possibilidade de ampliar os resultados obtidos para todo o ambiente construído.

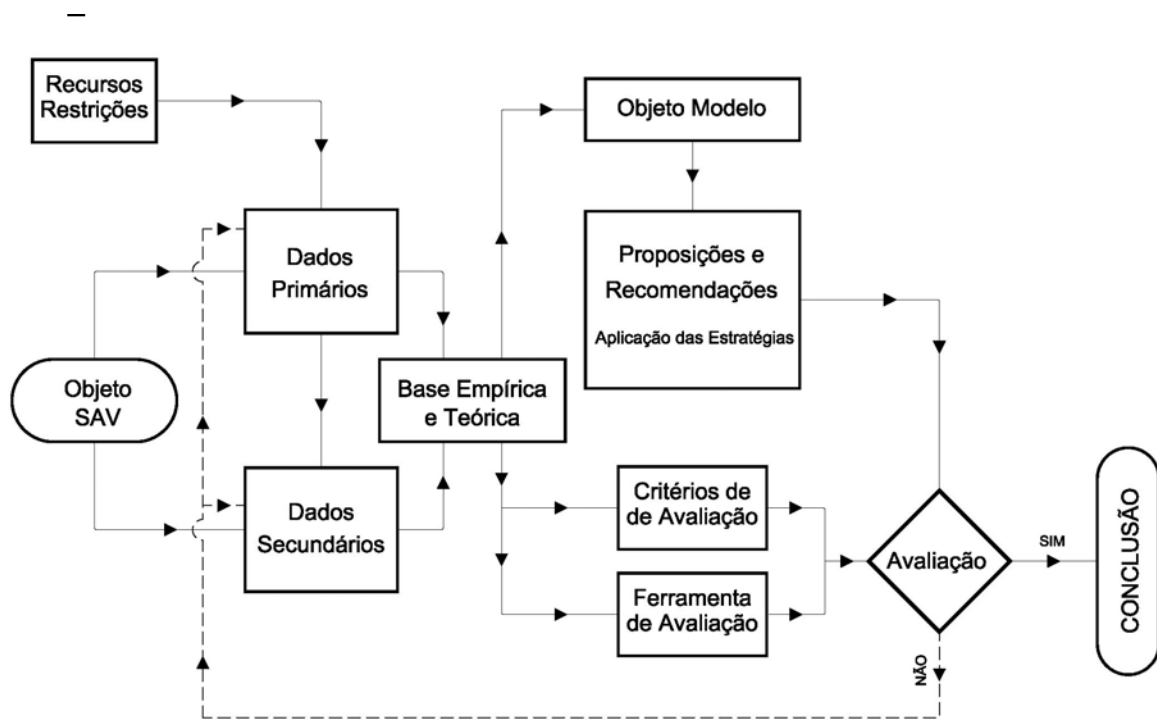


ILUSTRAÇÃO 2 - Estrutura da Pesquisa

Capítulo 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 VISÃO: EXIGÊNCIAS HUMANAS

A iluminação deve proporcionar qualidade visual e, portanto, relaciona-se com a sensação de bem-estar da visão. Outros fatores podem influenciar nesta sensação, mas a luz como elemento revelador do espaço cumpre função determinante, além de sua estreita relação com as outras áreas do conforto ambiental. A regra de que visão depende da luz pode ser verdadeira, mas não garante a qualidade.

O comportamento humano é um fenômeno complexo e individual que envolve diversas áreas do conhecimento, com características culturais e regionais. Entretanto, compreender como a iluminação produz um estímulo visual que, portanto, afeta e se relaciona ao comportamento humano, pode favorecer o projeto luminotécnico, no sentido de atender às expectativas de sua competência.

Importa entender a interação do homem com o meio e a percepção que tem de seu entorno, para buscar a solução adequada às suas necessidades. Neste processo, as avaliações pós-ocupação cumprem importante função, permitindo tanto ajustar os resultados como rever os conceitos, teoria e técnica, para uma melhor resposta futura.

Não é objeto desta seção o aprofundamento detalhado da teoria da visão, mas um estudo sobre o mecanismo da visão relacionado, principalmente, ao objeto da pesquisa, no intuito de identificar elementos significativos que possam contribuir, indicar novas diretrizes ou consolidar os fundamentos para sua aplicação.

2.1.1 O OLHO HUMANO

“A fisiologia dos órgãos sensíveis trata principalmente do fato que todo aparelho periférico é um especial transformador de uma dada energia externa em um processo neural.” (PAVLOV apud MESHCOV, 1981, p.55).

Pode-se considerar o olho humano como um sistema óptico que focaliza a imagem em uma superfície sensível à luz. A luz é refletida ou emitida pelos objetos, penetra nos olhos, passando por vários meios transparentes que focalizam a imagem nesta superfície: a Retina. A imagem formada na Retina é invertida e muito reduzida. É um órgão extremamente adaptável e pode perceber luminâncias entre $3 \times 10^{-6} \text{ cd/m}^2$ e 10^5 cd/m^2 (SCHREUDER In: BOER, 1967, p.167).

A transmitância do olho é função do comprimento de onda da radiação e da idade. O olho transmite melhor a radiação de comprimento de onda longo. Portanto, a radiação infravermelha penetra com facilidade e pode ser prejudicial para a retina, devendo-se evitar olhar diretamente fontes onde esta radiação é significativa. Com a idade, há uma diminuição geral na transmitância do olho, com significativa redução na faixa de ondas curtas.

2.1.1.1 ESTRUTURA E FUNCIONAMENTO DO OLHO HUMANO

O olho humano é um detector sofisticado de radiação. A IL.3 é uma representação simplificada da seção horizontal do olho direito.

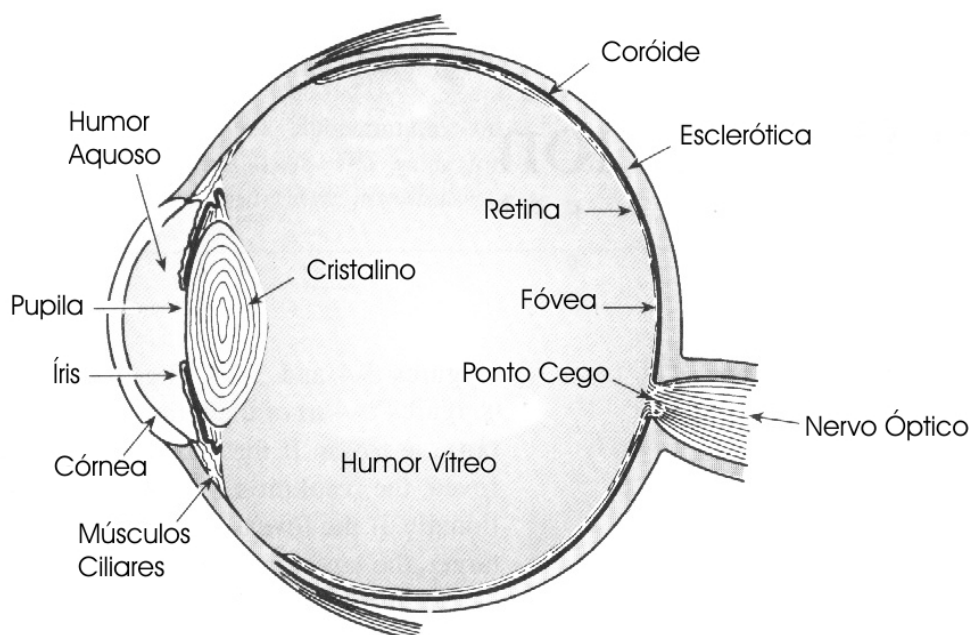


ILUSTRAÇÃO 3 – O Olho Humano

FONTE – IESNA, 2000, cap. 3, p. 2, tradução nossa

O primeiro componente óptico é a lágrima, uma fina camada líquida que serve para limpar a superfície do olho e retirar pequenas imperfeições da córnea, além de iniciar a refração da luz, processo necessário para focar a imagem na retina. Aproximadamente 70% deste processo é feito pela córnea e por esta primeira camada líquida, sendo que o cristalino é responsável pela maior parte dos 30% restantes. Os músculos ciliares fazem o ajuste do foco em função da distância do objeto, alterando a curvatura do cristalino. O humor aquoso e o humor vítreo ajudam a manter a forma do globo ocular (IESNA, 2000, cap.3, p.3-4).

Uma peculiaridade do funcionamento do olho é que as imagens não são focadas, normalmente, no eixo óptico, mas ligeiramente desviadas deste eixo, em

uma pequena depressão em forma oval denominada fóvea. Esta região é responsável pela percepção de pequenos detalhes (MOON, 1936. p.397).

A retina é uma fina camada transparente com espessura de 0.2mm que cobre quase toda a superfície interna do olho, onde existe um labirinto de fibras e terminações nervosas, destacando-se dois tipos responsáveis pela sensação visual: os cones e bastonetes. Os cones, responsáveis pelo discernimento de detalhes, são praticamente insensíveis à luz fraca, mas são sensíveis às cores com altos níveis de iluminação, enquanto os bastonetes são muito sensíveis à luz e pouco sensíveis às cores.

Não existem bastonetes na fóvea, onde concentram-se cones de pequeno diâmetro e muito próximos. A fóvea subtende um ângulo de 1° mas a área livre de bastonetes corresponde aproximadamente a 2° . Ao redor da fóvea os cones passam a ser intercalados pelos bastonetes e, à medida que nos afastamos, aumenta a proporção de bastonetes em relação aos cones. A máxima concentração dos bastonetes ocorre, aproximadamente, a uma excentricidade de 20° , passando a decrescer na direção das bordas da retina.

Os cones e bastonetes são receptores sensíveis à luz, mas que se diferem por sua morfologia e pela sensibilidade espectral dos fotopigmentos que eles contêm. Os bastonetes possuem sempre o mesmo fotopigmento, mas os cones são divididos em três classes caracterizadas pelo fotopigmento. Esta diferença nos cones é que torna possível a distinção de cores.

2.1.1.2 CAMPO VISUAL

Considera-se que o campo visual total coberto pelos dois olhos abrange um ângulo horizontal de aproximadamente 180° e um ângulo vertical superior e inferior de 50° e 70° respectivamente, totalizando 120° . A percepção varia significativamente dentro do campo visual, pois existe uma relação direta do ângulo observado com a área sensibilizada da retina. O **campo visual central** corresponde ao ângulo aproximado de 0.75° ao redor da linha de visão, que irá sensibilizar a área da retina próxima à fóvea, onde há a maior concentração de cones e não existem bastonetes. Esta é a região de maior acuidade, com a melhor percepção de detalhes possível. Assim como a proporção entre cones e bastonetes diminui ao se afastar da fóvea, a percepção visual também se altera gradualmente, ao se afastar do campo visual central e ingressar no entorno, diminuindo proporcionalmente a capacidade de identificar cores e detalhes, pois passa a predominar a ação dos bastonetes.

Na análise comportamental do motorista, adotam-se a **visão acurada**, a **visão sensitiva** e a **visão periférica**. A **visão acurada** está limitada por um cone de 3° a 5° com eixo na linha de visão, no qual as imagens são claras, com percepção de mínimos detalhes, e as cores são bem definidas. A área de **visão sensitiva** abrange um cone de 10° a 12°, apresentando um nível satisfatório de percepção de detalhes. A sinalização do tráfego deve estar posicionada dentro desta área. O cone que envolve a região da **visão periférica** pode chegar a 160°, onde as imagens não são claras e não há identificação de cores. Entretanto, esta área é sensível a um movimento anormal ou a um brilho que chame a atenção do motorista, que busca intuitivamente direcionar a **visão acurada** para o objeto em questão (BOTTURA, 2004, p.103-6).

2.1.1.3 VISÃO FOTÓPICA, ESCOTÓPICA E MESÓPICA

O comportamento diferenciado dos cones e bastonetes levou à classificação da visão segundo as condições de iluminação. Definem-se três classes de visão em função da luminância¹:

- Visão fotópica – Considerada para os olhos adaptados a luminâncias superiores a 3,4 cd/m². Os cones são os receptores principais, possibilitando identificar cores e detalhes (IESNA, 2000, p.G-25);
- Visão escotópica – Ocorre em luminâncias abaixo de 0,034 cd/m². Quando os olhos se encontram adaptados a estas condições, os bastonetes são os principais elementos ativos, não havendo detecção de detalhes e cores. O campo visual se torna mais homogêneo, pois não existe a ação dos cones, mesmo no campo visual central (IESNA, 2000, p.G-30);
- Visão mesópica – Visão para o olhos adaptados a luminâncias entre 0,034 e 3,4 cd/m², ou seja, entre as condições de visão fotópica e escotópica (IESNA, 2000, p.G-23).

Purkinje (1787-1869) observou que, na faixa entre 0.01 e 10cd/m², superfícies de mesma luminância e cores diferentes aparentam brilho diferente. O azul parece mais brilhante que o vermelho nesta faixa, embora na mesma condição de

¹ Originalmente, os valores que determinam as classes de visão foram estipulados em footlambert (fL), unidade considerada obsoleta por diversos autores. Como 1 fL equivale a 3,4 cd/m², este número aparece como fator de conversão entre as unidades.

luminância. O **Efeito Purkinje** como ficou conhecido, levou à conclusão que nossa percepção das cores sofre um desvio na curva de visibilidade nestas condições (MESHKOV, 1981. p. 77).

Na Zona Interior de Túneis, as normas e recomendações indicam a faixa de luminância muito próxima à faixa em que ocorre o **Efeito Purkinje**. Esta constatação poderá favorecer a visibilidade neste trecho, apenas pela adequada escolha da cor de certos elementos, ou pelo reforço do contraste.

2.1.2 SENSIBILIDADE VISUAL

O olho humano é um sofisticado aparelho que está preparado para responder automaticamente a uma variedade de solicitações. Mesmo em atividades triviais, uma pessoa pode sujeitar seus olhos a situações extremas pelo simples fato de olhar por uma janela, entrar em um cinema no período diurno ou observar diretamente uma fonte de luz. O olho fará o possível para proporcionar a melhor visão ajustando o foco, regulando a entrada de radiação e ativando seus componentes mais adequados para enviar a mensagem visual ao cérebro. Entretanto, este processo tem seus limites e pode levar certo tempo para completar suas operações.

2.1.2.1 ACOMODAÇÃO

Para que a imagem esteja bem definida na retina, é necessário ajustar o poder de refração do olho em função da distância entre o observador e o objeto. A acomodação é esta capacidade do olho em alterar a curvatura do cristalino, proporcionando o ajuste focal da imagem pela contração ou distensão dos músculos ciliares. Esta capacidade decresce rapidamente com a idade, sendo comum, aos quarenta anos, o uso de óculos para tarefas comuns a pequena distância e, aos sessenta anos, poucas pessoas ainda apresentam esta função.

2.1.2.2 ADAPTAÇÃO

O olho humano consegue processar a informação em uma extensa faixa de luminâncias e o sistema visual altera sua sensibilidade à luz, de acordo com a maior ou menor iluminação do objeto. Esta mudança de sensibilidade à luz proporcionada pelo sistema é chamada adaptação e envolve três operações principais: ajuste do tamanho da pupila, adaptação fotoquímica, adaptação neural.

O ajuste da pupila é proporcionado pela contração e dilatação da íris. A contração diminui a iluminação na retina, ocorrendo em torno de 0.3 s. A dilatação é mais lenta, aproximadamente 1.5 s e aumenta a iluminação na retina.

Para enviar a mensagem ao cérebro, a luz passa pela retina, atinge os cones e bastonetes e provoca uma reação fotoquímica. As alterações nos fotopigmentos dos cones e bastonetes é um processo dinâmico de equilíbrio e desequilíbrio. Na escuridão, os fotopigmentos estão regenerados, prontos para receberem a luz. A sensibilidade à luz é, em grande parte, função da porcentagem de fotopigmentos que não estão em atividade. Em condições estáveis de brilho, todo o sistema está em equilíbrio. Quando estas condições se alteram, os fotopigmentos são descoloridos ou regenerados para restabelecer o equilíbrio. A adaptação fotoquímica é mais rápida nos cones, mesmo quando expostos a alto nível de brilho. Estes levam entre 10 e 12 minutos, enquanto os bastonetes requerem 60 minutos, ou mais, para completa adaptação à escuridão.

A adaptação neural dura menos de 1 s e ocorre, normalmente, na faixa de luminância abaixo de 600 cd/m^2 . Esta faixa é normalmente encontrada em ambientes internos iluminados artificialmente. Mesmo com um nível de iluminação constante, os ambientes normalmente apresentam grande variedade de luminâncias. Como a adaptação neural é bastante rápida e opera em níveis moderados de iluminação, o sistema é bem ajustado e possibilita bom resultado em interiores (IESNA, 2000, cap.3, p.8-9).

Quando o campo visual passa por situações transitórias e é exposto a uma luminância alta ou baixa em relação à tarefa, a visibilidade é reduzida. Este fato pode ocorrer mesmo em ambientes internos, quando passamos os olhos por uma janela ou miramos diretamente uma fonte de luz. Se a recuperação ocorrer rapidamente, a adaptação neural foi ativada, mas, se for lenta, significa que foram necessárias reações fotoquímicas.

A iluminação de túneis rodoviários está diretamente relacionada às adaptações neural e fotoquímica e também ao ajuste da pupila. Para o período diurno com radiação solar direta, em consequência dos altos níveis de luminância, deve ser considerada a adaptação fotoquímica. Entretanto, mesmo se admitirmos apenas os cones no processo, parece inviável atingir a adaptação completa, pois seriam necessários entre 10 e 12 min. Com o intuito de obter dados para a aplicação prática em iluminação de túneis, pesquisadores fizeram estudos experimentais para

avaliar o tempo de adaptação em função do decréscimo da luminância, identificando como o maior problema a formação de imagens negativas posteriores que confundem o campo visual da estrada.

A IL.4 apresenta a curva de redução da luminância, mantendo a visibilidade de um objeto-crítico com contraste de 20%, para o valor inicial de 8.000 cd/m² (SCHREUDER, 1967)². Um estudo similar foi elaborado por Kabayama (1963), variando a luminância inicial entre 25 e 8.000 cd/m². Na IL.5, as curvas de 1 a 6 referem-se aos estudos de Kabayama e as linhas tracejadas (7 e 8) aos estudos de Schreuder, considerando respectivamente a satisfação de 75% e 50% dos observadores.

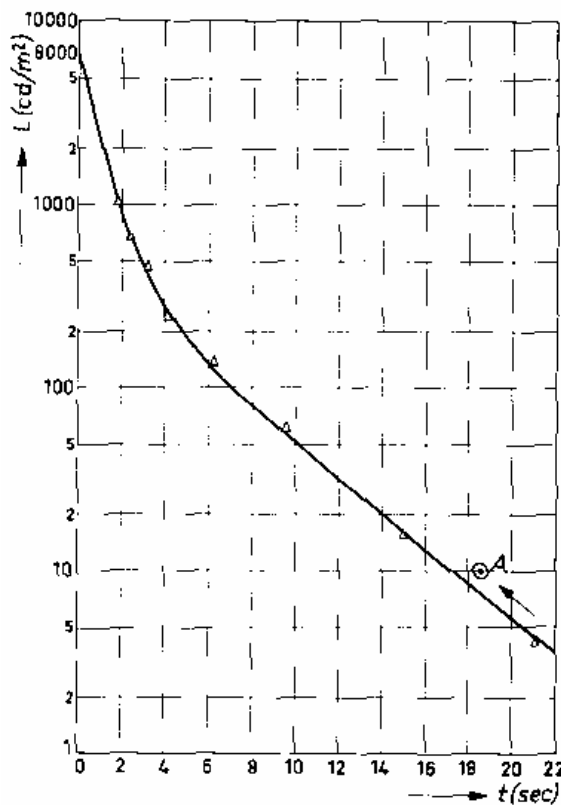


ILUSTRAÇÃO 4 - Luminância de Adaptação: L inicial = 8.000 cd/m²
FONTE - SCHREUDER, 1967, p.168

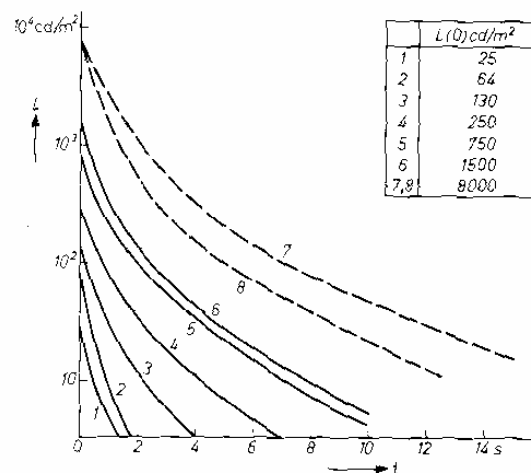


ILUSTRAÇÃO 5 - Luminância de Adaptação L(0) inicial entre 25 e 8.000 cd/m²
FONTE - KABAYAMA apud SCHREUDER, 1967, p.168

Adotando a mesma luminância inicial relativa, todas as curvas foram transportadas para o mesmo gráfico (IL.6). Observa-se que os resultados são

² Objeto-crítico ou objeto-alvo: objeto de 20 x 20cm que foi identificado a 100m de distância em 75% dos casos estudados por Schreuder (1964, p. 65), considerando o contraste de 20% entre o objeto e o fundo. A CIE (2004, p.6) adota a nomenclatura obstáculo de referência para este objeto, referindo-se a um cubo com 20cm de aresta e refletância $\rho = 0.2$.

bastante próximos, e a variação da luminância de adaptação praticamente independe do valor inicial.

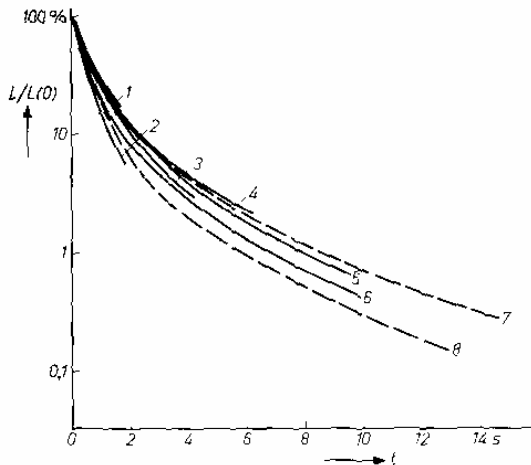


ILUSTRAÇÃO 6 - Luminância de Adaptação: mesma luminância inicial relativa $L(0)$
FONTE - SCREUDER In: DE BOER, 1967. p.168

Em outros estudos experimentais, (WEINSTEIN; HOBSON; DOWLING, 1967, p. 134-8 apud ADRIAN, 1982, p.153) demonstrou-se que, com a redução da intensidade luminosa até a escuridão, mesmo partindo de níveis elevados, embora não haja a regeneração completa dos fotopigmentos, ocorre inicialmente um processo neural incrementando a sensibilidade visual. Este processo resulta em uma rápida adaptação visual, possibilitando a adequada percepção em uma faixa de luminâncias entre 1,5 e 2 unidades logarítmicas. Schreuder (1988, p.2) admite que, para um sistema visual adaptado em uma condição estável de luminâncias entre 30 e 3.000 cd/m^2 , a adaptação visual para outro valor dentro desta faixa ocorre quase instantaneamente.

Sem a influência do processo neural em altos níveis de iluminação, a adaptação visual diurna em túneis rodoviários seria inviável, devido ao tempo necessário no processo fotoquímico. Cabe destacar que as principais normas e recomendações atuais para iluminação de túneis indicam, na Zona de Transição³, curvas semelhantes às determinadas por Schreuder e Kabayama.

2.1.2.3 OFUSCAMENTO

A visão depende da luz, mas isto não significa que exista uma relação de proporção direta entre as duas. A luz pode prejudicar a visão, se não estiver

³ Ver glossário.

adequadamente posicionada ou dimensionada. O ofuscamento resulta da presença de regiões com brilho excessivo que invadem o campo visual.

A CIE (1983, p.1, tradução e grifo nossos) define dois tipos de ofuscamento:

Ofuscamento de desconforto – É o ofuscamento que causa desconforto, sem necessariamente prejudicar a visão dos objetos;

Ofuscamento desabilitador (Efeito de véu) – É o ofuscamento que prejudica a visão dos objetos, sem necessariamente causar desconforto.

A frase grifada na segunda definição pode parecer paradoxal. Como considerar um ofuscamento que prejudique a visão dos objetos, sem causar desconforto? A IESNA (2000, cap.3, p.30) esclarece a questão ao afirmar que, normalmente, o ofuscamento desabilitador também provoca desconforto, mas é possível que ocorra sem causar desconforto quando a fonte de ofuscamento é grande. Assim, um quadro próximo a uma janela é mais bem observado se cobrirmos a interferência desta janela no campo visual. Da mesma forma, na fachada de um edifício que recebe luz solar direta, é difícil visualizar, por uma abertura, o espaço interior. Apenas se o ponto de interesse for o quadro próximo à janela ou o ambiente interno do edifício, o ofuscamento desabilitador causará desconforto. Portanto, principalmente em espaços exteriores onde o ofuscamento desabilitador é mais comum, pode haver diversas situações em que a ocorrência do fenômeno nem é percebida, pois não interfere no objeto de interesse.

A causa do ofuscamento desabilitador é mais bem conhecida. Relaciona-se à perda de contraste ocasionada, quando a luz intra-ocular, que deveria revelar a imagem principal, é dispersa para as áreas adjacentes ou vice-versa, provocando um efeito de véu na imagem. É um fenômeno fisiológico, enquanto o ofuscamento de desconforto é um fenômeno expresso em forma de sensação visual e, portanto, sujeito a uma avaliação subjetiva. Embora não haja necessariamente uma redução direta da capacidade visual, a presença de fontes com alto brilho no campo de visão produz uma sensação incômoda. A penetração solar no ambiente, as fontes de luz artificial malposicionadas ou a proximidade de uma abertura do plano da tarefa podem provocar o ofuscamento de desconforto e, embora por definição não prejudiquem necessariamente a visão do objeto de interesse, interferem na atividade humana, com possibilidade ainda de causar diversos distúrbios físicos.

O ofuscamento desabilitador é um fenômeno determinante no projeto luminotécnico de túneis rodoviários. Durante o dia, quando o motorista se aproxima da entrada do túnel, o entorno do portal invade o campo visual, que tem sua componente central normalmente direcionada para a rodovia dentro do túnel. O entorno funciona como superfícies que emitem luz no sentido contrário, podendo atingir níveis de luminância entre 3.000 e 8.000 cd/m^2 (PHILIPS, 1981, p.153). Se a iluminação no primeiro trecho interior do túnel não for suficiente, produz-se o efeito de véu, reduzindo ou impedindo a visão de um objeto-crítico sobre a via.

2.2 FUNDAMENTOS DA FOTOMETRIA

O objetivo deste capítulo não é apenas apresentar os fundamentos da fotometria, mas uma revisão e aprofundamento dos conceitos normalmente encontrados na literatura. Também serão consideradas as fórmulas básicas utilizadas no cálculo luminotécnico, buscando identificar sua origem e dedução para uma melhor compreensão da inter-relação das grandezas.

A Fotometria é a parte da Física Aplicada que (Fundada por Lambert em 1760) trata da intensidade das luzes emitidas pelas fontes e considera os efeitos de iluminação que elas produzem sobre os corpos. (PRADO, 1961. p. 27^A).

A luz era um conceito intuitivo, e sua análise feita empiricamente, pela observação dos resultados obtidos em experiências com velas. Mesmo com esta falta de recursos, os cientistas foram capazes de estabelecer as leis do inverso do quadrado da distância e a lei do co-seno. Curiosamente, tais conceitos permanecem inalterados até a atualidade.

Embora a explicação de cada grandeza fotométrica seja relativamente simples, sua compreensão é bastante complexa. Quando refletimos sobre o significado do comprimento de um objeto, somos normalmente levados a uma operação física para a compreensão da grandeza envolvida (BRIDGMAN, apud MOON, p.536). Entretanto, pode ser imprudente afirmar a “verdade” de uma noção pelo método operacional. Tal procedimento pode ser bem sucedido em algumas áreas da ciência, mas em física era severamente questionado (MOON, 1936. p. 536). De qualquer forma, parece ser satisfatório para o entendimento de algumas grandezas e suas derivações.

O mesmo não ocorre com as grandezas fotométricas. Aqui não se trata apenas de um conceito físico, mas agrega-se o elemento fisiológico da percepção

visual. São os aspectos físicos da luz e subjetivos de sua percepção. Os primeiros podem ser avaliados por aparelhos, já os segundos relacionam-se à sensação. Por não ser a luz matéria palpável, mesmo os aspectos físicos têm sua compreensão dificultada.

A sensação é incomensurável, mas pode estar relacionada ao aspecto físico e desta pode-se obter um resultado válido (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975. p.369). A distinção entre os dois aspectos é fundamental para avaliar os resultados em um projeto de iluminação, podendo ainda ser acrescentado o aspecto psicológico envolvido.

As metodologias existentes para o cálculo de iluminação, principalmente para iluminação artificial, atendem aos casos comuns e dispensam um aprofundamento nesses conceitos. Entretanto, para casos específicos que fogem de procedimentos-padrão, é fundamental o entendimento das grandezas para o controle do comportamento da luz e aproveitamento de seus recursos.

Em uma parte significativa da literatura disponível sobre o assunto, podemos encontrar conceitos e esquemas que induzam a uma falsa conclusão sobre determinado fenômeno. Foram incluídos alguns destes exemplos identificados para elucidação e reflexão sobre seu entendimento.

2.2.1 GRANDEZAS, UNIDADES E RELAÇÕES FOTOMÉTRICAS

A luz é um fluxo de energia radiante que, assim como as ondas de rádio, televisão, raios X, ultravioleta e infravermelho, ocupa uma parte do espectro eletromagnético. Definida como energia radiante dentro do espectro visível, a luz abrange a faixa entre 380 e 780 nanômetros, tendo como limítrofes o ultravioleta e o infravermelho. Por estar fundamentada na resposta e percepção do olho humano, possui seu próprio sistema de unidades, pois não existe uma relação direta entre a distribuição espectral da radiação e a visão, e sua conexão com outras unidades, como o Watt, é obtida por procedimentos matemáticos (TREGENZA; LOE; 2004, p.3). Existem quatro grandezas fundamentais para quantificar a luz:

- **Intensidade Luminosa** I
- **Fluxo Luminoso** Φ
- **Iluminância** E
- **Luminância** L

A primeira grandeza a ser analisada é a intensidade luminosa I , cuja unidade é a candela [cd]. É um conceito intuitivo, relacionado a um vetor que representa o raio de luz partindo de uma fonte pontual numa única direção, e desta grandeza derivam as demais: fluxo luminoso Φ , iluminância E e luminância L^4 .

O fluxo luminoso pode ser explicado por analogia com a água (MURDOCH, 1985, p. 23-4). Imagina-se uma esfera, com minúsculos furos uniformemente distribuídos em sua superfície, conectada a uma torneira através de uma mangueira. Quando a torneira é aberta, a esfera passa a esguichar água em todas as direções. Desprezando o efeito da gravidade, filetes de água emergem igualmente para fora da superfície da esfera de forma radial. Se compararmos a esfera perfurada com uma fonte de luz pontual isotrópica, o fluxo luminoso desta corresponde ao fluxo de água que emana daquela. No Sistema Internacional, a unidade de medida do fluxo luminoso é lúmen [lm], que corresponde à energia luminosa radiante com intensidade de uma candela [cd] dentro do ângulo sólido de um esferorradiano [sr].

Para que a luz produza algum efeito, não é suficiente um único vetor de intensidade luminosa, mas um conjunto de vetores que formem um fluxo e possibilitem banhar determinada região. A iluminância resulta do fluxo luminoso que incide em uma superfície. Sua unidade é lux [lx], que equivale a lúmen por metro quadrado [lm / m²]. A IL.7 representa essas três grandezas, fornecendo uma visualização preliminar de sua correlação.

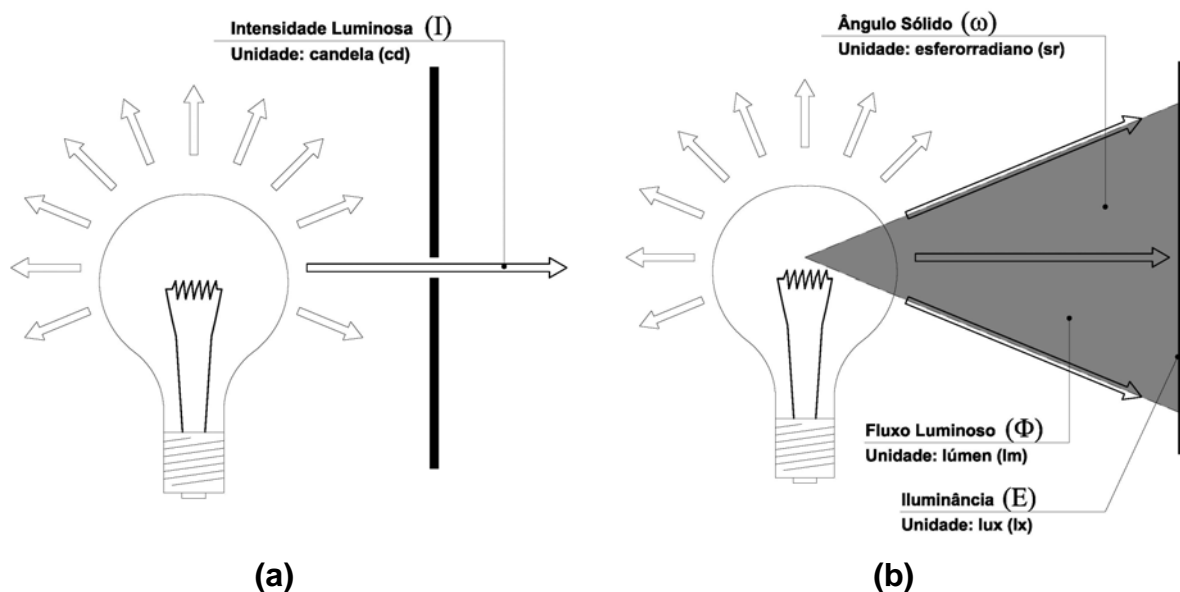


ILUSTRAÇÃO 7 - (a) Intensidade Luminosa; (b) Fluxo Luminoso e Iluminância.

⁴ Nesta análise utilizou-se o Sistema Internacional de Unidades (SI).

No estudo do ofuscamento, a principal grandeza fotométrica envolvida é a luminância. Entretanto, nos modelos hipotéticos que definem as grandezas fotométricas, a luminância é normalmente omitida, dificultando o seu entendimento e inter-relação com as outras grandezas. O Modelo 1 (IL.8a) explica a unidade de iluminância [lx] em função do fluxo luminoso [lm] e da área [m²] atingida.

O Modelo 2 (IL.8b) é mais completo e preciso que o anterior. A intensidade luminosa [cd], emitida por uma fonte pontual origina o fluxo luminoso [lm] e a iluminância [lx] em função da área atingida [m²]. O ângulo sólido está mais bem representado, além de fornecer a visualização gráfica da Lei do Inverso do Quadrado da Distância, conforme a equação (1):

$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{I_{\theta}}{d^2} \tag{1}$$

Onde:

- S* Superfície em que a luz incide;
- E* Iluminância na superfície *S*;
- Φ Fluxo Luminoso;
- I*_θ Intensidade Luminosa na direção *θ*, normal à superfície *S*;
- d* Distância entre a fonte e a superfície *S*.

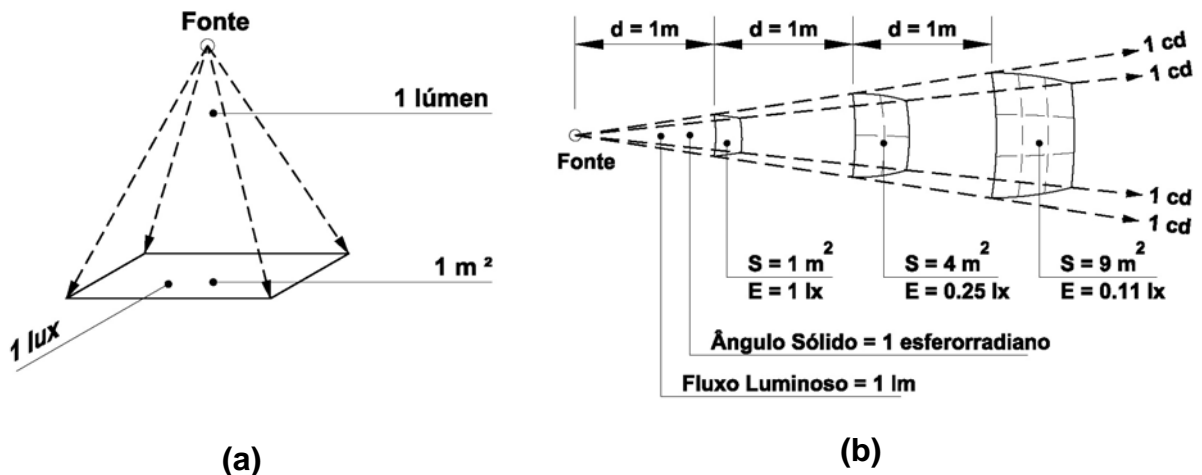


ILUSTRAÇÃO 8 – (a) Modelo 1; (b) Modelo 2
 FONTE – (a) TABOADA, 1975, p.73; (b) IESNA, 2000, cap.2, p.3, tradução nossa

Na IL.9, o Modelo 3 representa com exatidão a intensidade luminosa, o fluxo luminoso e a iluminância. O ângulo sólido, embora de forma incorreta para facilitar o entendimento da área iluminada, evidencia a inter-relação das grandezas e a dependência da iluminância com o raio da esfera, o que não ocorre nem com a

intensidade luminosa nem com o fluxo luminoso, pois estas não dependem do raio da esfera. Em relação à luminância, cabe considerar o seguinte comentário:

Outra importante grandeza luminosa é a luminância. Esta grandeza é mais difícil de compreender e o modelo da esfera não pode ser utilizado para este propósito. (IESNA, 2000, cap.2, p.3, tradução nossa).

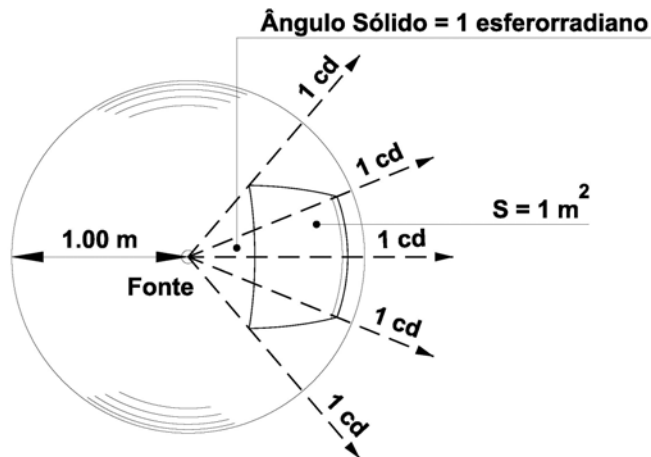


ILUSTRAÇÃO 9 – Modelo 3

FONTE – IESNA, 2000, cap.2, p.2, adaptação nossa

Conforme já observado, a luminância é omitida nos três modelos identificados. Seu estudo é feito separadamente, relacionando a Superfície Luminosa e a Superfície Aparente.

A luminância é a grandeza que produz no órgão visual a sensação de claridade, pois a luz não é visível até ser refletida pelos corpos. A maior ou menor claridade com que vemos os objetos igualmente iluminados depende de sua luminância. (TABOADA, 1975, p.74, tradução nossa).

Dois modelos foram identificados para explicar a luminância (IL.10 e 12). A IL.10 ilustra a adaptação de alguns modelos similares encontrados em manuais de iluminação para representar a grandeza. Nota-se a relação geométrica que determina a luminância em função da superfície aparente e da intensidade luminosa em direção ao observador, mas as outras grandezas fotométricas são omitidas.

Pela equação (2) determina-se a luminância na direção θ :

$$L_{\theta} = \frac{I_{\theta}}{S \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

Onde:

- L_{θ} Luminância na direção θ ;
- I_{θ} Intensidade Luminosa na direção θ ;
- S Superfície Luminosa;
- $S \cdot \cos \theta$ Superfície Aparente.

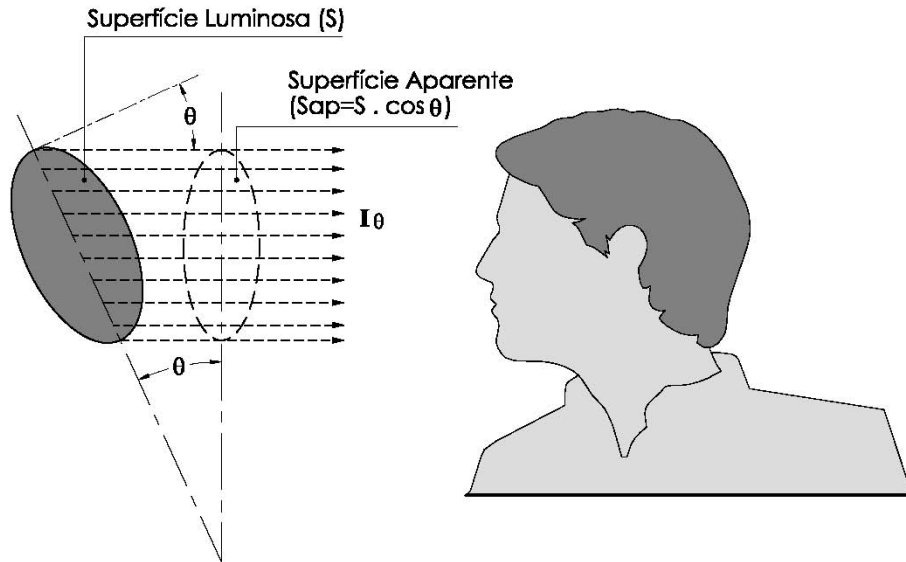


ILUSTRAÇÃO 10 – Modelo 4

Embora o Modelo 4 elucide quanto ao entendimento da superfície aparente de uma superfície luminosa, é um modelo incompleto e pode levar a conclusões imprecisas ou infundadas, como a seguinte afirmação:

A luminância será máxima quando o olho se encontrar na perpendicular à superfície luminosa, pois o ângulo θ é igual a zero, cujo co-seno é 1, correspondendo a superfície aparente à real. (TABOADA, 1975, p.74. tradução nossa).

Tal afirmação contradiz a equação (2), pois a luminância é inversamente proporcional ao co-seno θ . Portanto, será mínima, e não máxima, para θ igual a 0, se considerarmos apenas o ângulo de observação e se a intensidade fosse constante em qualquer direção. Entretanto, assim como a superfície aparente, a intensidade luminosa também varia com o ângulo observado, sendo necessário definir as propriedades da superfície refletora.

Adotando uma superfície lambertiana (difusor perfeito), temos pela Lei de Lambert (IL.11):

$$I_{\theta} = I_0 \cos \theta \tag{3}$$

Onde:

I_0 Intensidade Luminosa perpendicular à Superfície;

I_θ Intensidade Luminosa na direção θ ;

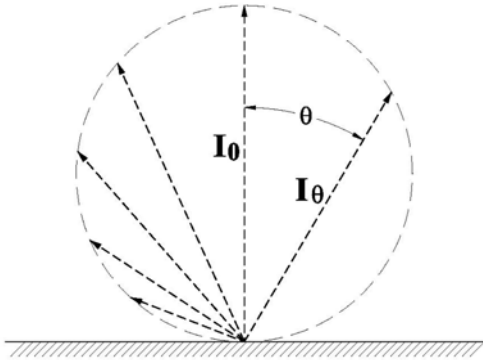


ILUSTRAÇÃO 11 - Lei de Lambert

Substituindo (3) em (2), temos:

$$L_\theta = \frac{I_0 \cos \theta}{S \cos \theta}$$

$$L_\theta = \frac{I_0}{S}$$

(4)

Logo, a luminância é constante em qualquer direção para um difusor perfeito, contrariando a afirmação de TABOADA, pois depende principalmente das propriedades da superfície emissora ou refletora, e não apenas do ângulo entre a superfície e a linha de visão.⁵

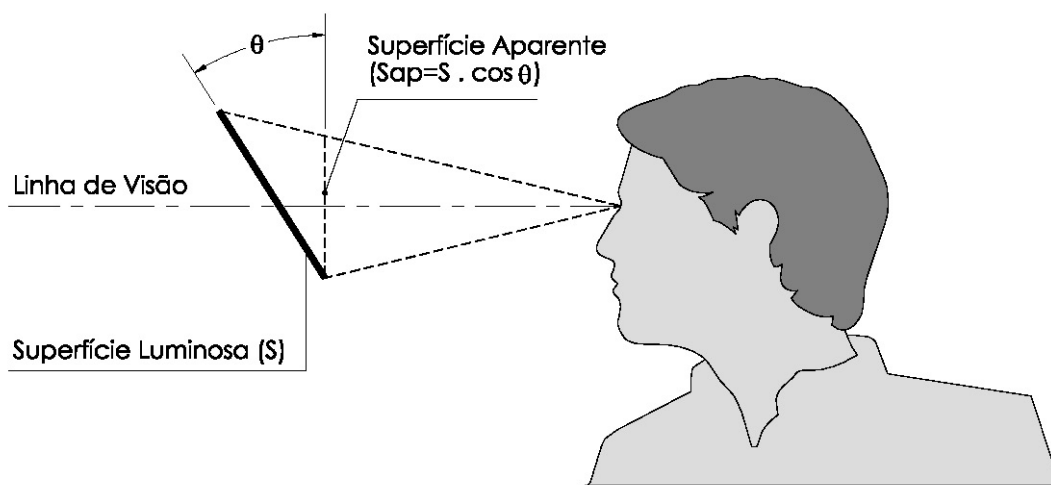


ILUSTRAÇÃO 12 - Modelo 5

⁵ Esta observação crítica não invalida a importância do referido manual como literatura básica sobre o assunto.

O Modelo 5 é semelhante ao Modelo 4. Embora, para determinar a luminância deste modelo, a intensidade deva ser considerada paralela à linha de visão do observador, a ilustração mostra um ângulo sólido formado pelo perímetro da superfície real e o olho do observador, induzindo a uma visualização equivocada do fenômeno, pois a superfície aparente não corresponde ao indicado na IL.12 ($S_{ap} = S \cdot \cos \theta$).

Se a compreensão das grandezas já é complexa, essas distorções dificultam ainda mais seu entendimento. Devido à importância da luminância para o objeto da pesquisa e à falta de um modelo integrando as quatro grandezas fundamentais da luz, identificaram-se novos elementos que auxiliassem na construção de um novo modelo.

2.2.2 PROPOSTA DE MODELO ELEMENTAR INCORPORANDO A LUMINÂNCIA

O primeiro elemento encontrado foi a equação (5), que relaciona luminância L em função da iluminância E e da Refletância ρ (TREGENZA; LOE; 2004, p.7).

$$L = \frac{\rho E}{\pi} \quad (5)$$

Ao interpretar a equação, parece evidente a multiplicação da refletância ρ pela iluminância E . Mas, por que a divisão por π ?

Verificou-se, a partir desta equação, outro elemento relacionado: o Sistema de Unidades de Iluminação Equivalente (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975, p.699). Esse sistema define uma unidade para a luminância L_{se} que permite a relação entre luminância e iluminância pela equação(6)⁶:

$$L_{se} = \rho E \quad (6)$$

As unidades do sistema são:

- Foot-Lambert (ft-L) ou Foot-candle equivalente (e.f.c.) **$1/\pi$ cd/ft²**
- Lambert (L) = **$1/\pi$ cd/cm² ou stilb (sb)**
- Blondel ou apostilb **$1/\pi$ cd/m² ou nit (nt)**

⁶ Adotou-se neste trabalho L_{se} para designar a Luminância do Sistema de Unidades de Iluminação Equivalente.

Nota-se que as unidades do Sistema de Unidades de Iluminação Equivalente correspondem à multiplicação por π das unidades no sistema convencional ($L_{se} = L\pi$). Portanto, o sistema é uma aplicação da equação (5).

Incorporando a equação (5) ao Modelo 3 chega-se à seguinte adaptação, resultando na proposta do Modelo 3a (IL.13).

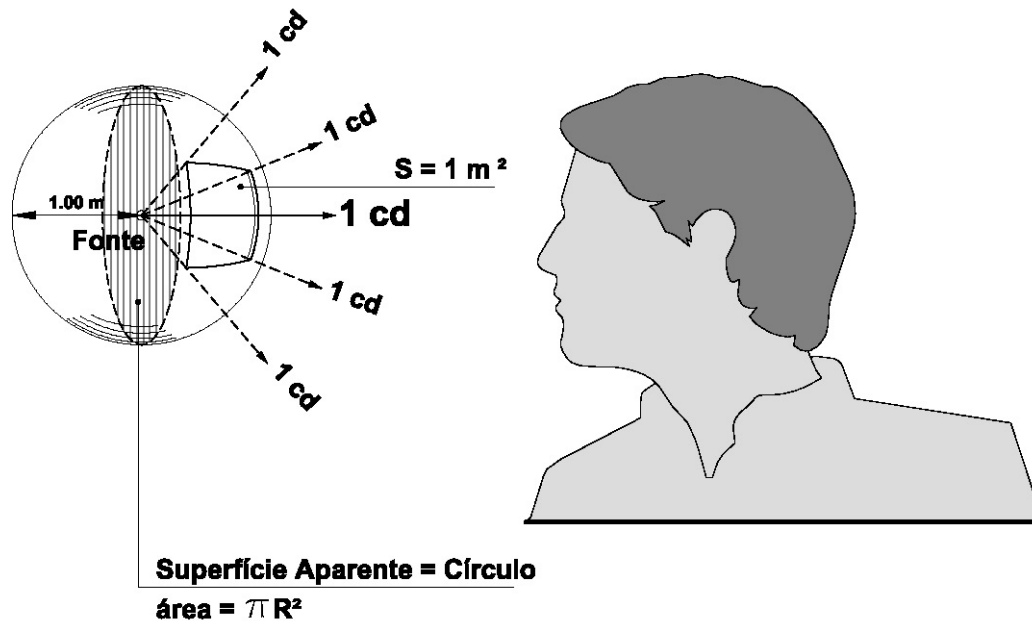


ILUSTRAÇÃO 13 – Modelo 3a

Apenas a intensidade de 1cd é direcionada para o observador da esfera. A superfície aparente da esfera corresponde a um círculo de área πm^2 , pois o raio deste círculo é 1 e, portanto, a luminância é $1/\pi \text{ cd}/m^2$. Cabe esclarecer que, no Modelo 3a proposto, a iluminância E deve ser substituída pela exitância M , grandezas que são homogêneas. “A diferença é que, na primeira, trata-se de luz incidente e, na segunda, de luz irradiada” (PRADO, 1961, p.34). A refletância também deve ser substituída pela transmitância, considerada na esfera ideal como 1.⁷

Para facilitar a compreensão do Modelo 3a, consideremos várias esferas de raio unitário tangentes entre si e a um plano de referência, com uma fonte isotrópica de intensidade 1cd no centro de cada uma. As esferas assim dispostas formam um painel semelhante aos painéis eletrônicos com lâmpadas LED⁸. Cada esfera define no plano um módulo quadrado cujo lado é igual ao diâmetro da esfera. A iluminância

⁷ Raciocínio semelhante é apresentado por Murdoch (1985, p.25). Entretanto, por considerar sua aplicação válida apenas para o difusor perfeito, o autor não adota como modelo genérico.

⁸ LED: *Light-Emitting Diodes* (Diodos Emissores de Luz).

em cada módulo do plano é 1lux e a luminância na direção ortogonal ao plano é $1/\pi$ cd/m². Observam-se regiões que sobram entre os círculos, determinadas em cada módulo pela projeção da esfera no plano e também devido ao ângulo sólido definido pelo fluxo luminoso de 1 lúmen. Portanto, a distribuição não é uniforme em toda superfície da placa (IL.14).

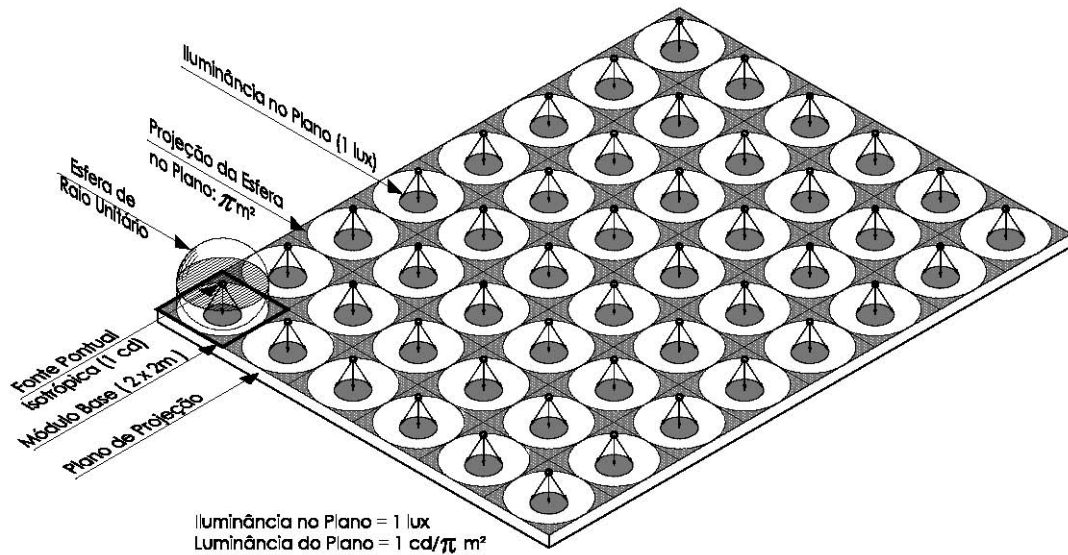


ILUSTRAÇÃO 14 – Modelo 3a: Plano Iluminado por Fontes Pontuais Isotrópicas

Substituindo a fonte inicial de intensidade 1cd por quatro fontes equivalentes de 0,25 cd, o módulo permanece com a mesma iluminância, mantendo também a luminância em cada módulo, mas a distribuição torna-se mais homogênea (IL.15).

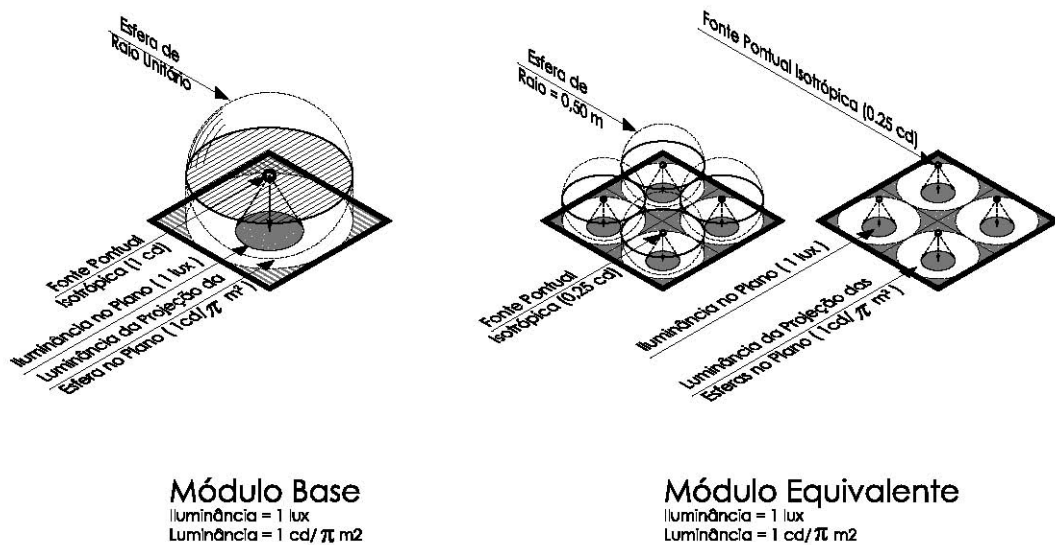


ILUSTRAÇÃO 15 – Modelo 3a: Módulo Base e Módulo Equivalente

Repetindo esta operação indefinidamente, as fontes infinitesimais abrangem todo o módulo sem alterar a iluminância e a luminância, respectivamente de 1 lux e

$1/\pi$ cd/m². Assim, todo o plano passa a apresentar estes valores e os vazios desaparecem na placa.

Este exemplo é apenas um artifício para ajudar a visualização do fenômeno. Matematicamente, a soma das áreas remanescentes, entre a projeção da esfera e os limites de cada módulo, permanece a mesma nas subdivisões, mas, ao ser distribuída infinitamente, torna-se insignificante.

Foram encontradas duas deduções que relacionam exitância e luminância. Na primeira (MOON, 1936, p.256–8), uma superfície fonte O emite um fluxo luminoso de acordo com a lei de Lambert (difusor perfeito).

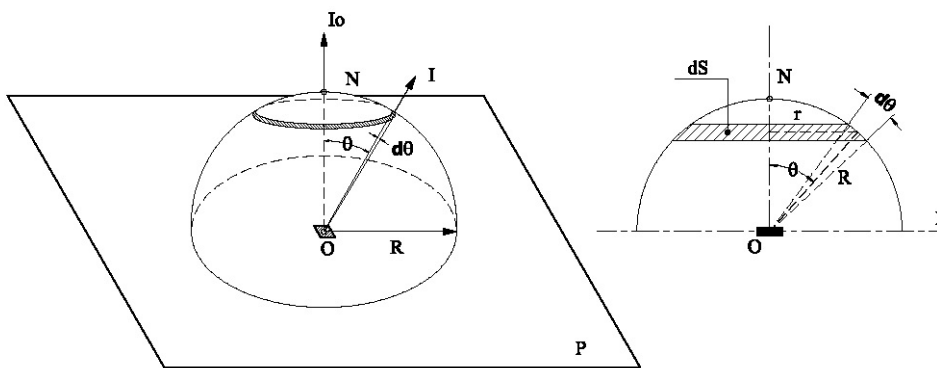


ILUSTRAÇÃO 16 - Iluminação de Superfície Infinitesimal
FONTE - MOON, 1936, p. 256

Portanto, a intensidade luminosa em qualquer direção (IL.16) pode ser obtida pela equação (3) $I = I_0 \cos \theta$. Imagina-se essa superfície envolta em um hemisfério de raio qualquer R suficientemente grande, para ser válida a lei do inverso do quadrado da distância. A iluminância em qualquer ponto da esfera E_p será:

$$E_p = \frac{I_\theta}{R^2} = \frac{I_0}{R^2} \cos \theta \quad (7)$$

Considera-se a nesga definida pelo encontro do ângulo infinitesimal $d\theta$ com a esfera e calcula-se a área hachurada da nesga dS :

$$r = R \sin \theta$$

$$dS = 2\pi r R d\theta$$

$$dS = 2\pi R \sin \theta R d\theta$$

$$dS = 2\pi R^2 d\theta \sin \theta$$

O fluxo luminoso $d\Phi$ que passa pela nesga é:

$$d\Phi = E_p dS$$

$$d\Phi = \frac{I_0}{R^2} \cos\theta (2\pi R^2 d\theta \sin\theta)$$

$$d\Phi = 2\pi I_0 \cos\theta \sin\theta d\theta$$

Portanto, o fluxo luminoso total Φ emitido pelo hemisfério será:

$$\Phi = 2\pi I_0 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta \sin\theta d\theta$$

Considerando $v = \sin\theta$ e $dv = \cos\theta d\theta$ tem-se:

$$\Phi = 2\pi I_0 \int_0^{\frac{\pi}{2}} v dv$$

$$\Phi = 2\pi I_0 \left[\frac{v^{1+1}}{1+1} \right]_0^{\frac{\pi}{2}}$$

$$\Phi = 2\pi I_0 \left[\frac{\sin^2 \theta}{2} \right]_0^{\frac{\pi}{2}}$$

$$\Phi = 2\pi I_0 \left[\frac{\sin^2 \frac{\pi}{2}}{2} \right] - \left[\frac{\sin^2 \theta}{2} \right]$$

$$\Phi = 2\pi I_0 \frac{1}{2}$$

$$\Phi = \pi I_0 \tag{8}$$

Portanto, para um plano difusor perfeito, o fluxo luminoso emitido é π vezes a intensidade luminosa normal à superfície.

Dividindo os dois lados da equação (8) por uma área arbitrária A tem-se:

$$\frac{\Phi}{A} = \pi \frac{I_0}{A}$$

Como a iluminância E ou exitância M é igual à razão do fluxo luminoso Φ pela área A , e a luminância L corresponde à Intensidade I_0 dividida pela área A , tem-se:

$$E = M = \pi L \tag{9}$$

A segunda dedução (PRADO, 1961, p.55-8) é semelhante à anterior. Na IL.17 imagina-se uma esfera de raio qualquer R , cujo centro O coincide com uma fonte de

luz pontual isotrópica. A superfície da esfera é adotada como um difusor perfeito e, portanto, a intensidade luminosa em qualquer direção também pode ser obtida pela Lei de Lambert ($I_{\theta} = I_0 \cos \theta$).

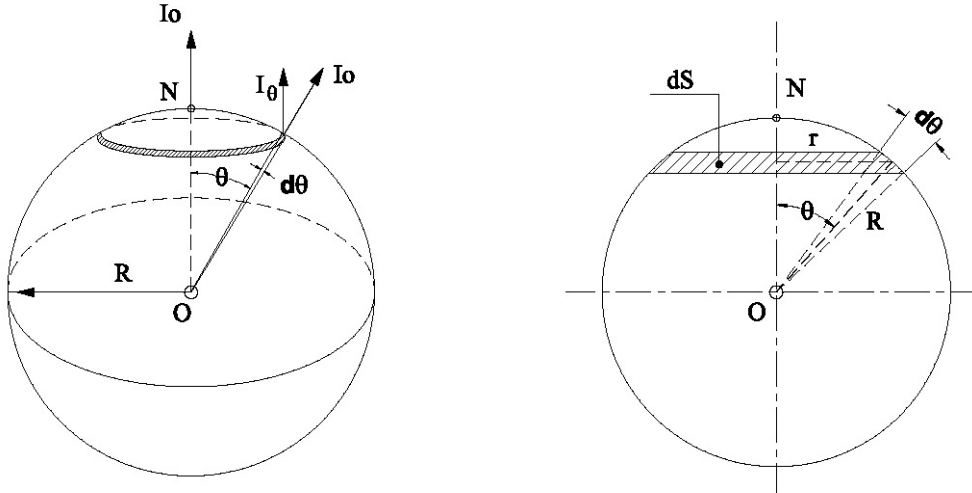


ILUSTRAÇÃO 17 - Iluminação de Fonte Pontual
FONTE - PRADO, 1961, p.55

Como já foi visto, a área hachurada da nesga dS é:

$$dS = 2\pi R^2 d\theta \sin\theta$$

O ângulo sólido $d\omega$ definido pela área dS é:

$$d\omega = \frac{dS}{R^2} = 2\pi \sin\theta d\theta$$

Obtém-se assim o fluxo luminoso $d\Phi$ que passa pela nesga:

$$d\Phi = I_0 d\omega$$

$$d\Phi = 2\pi I_0 \sin\theta d\theta \quad (10)$$

Considerando um diafragma perpendicular à direção $O-N$ (IL.18), com um orifício de área S_{ap} , a luminância L da região visível da esfera (difusor perfeito) de área S na direção $O-N$ define-se pela relação:

$$L = \frac{I}{S_{ap}} = \frac{I}{S \cos\theta}$$

$$\therefore I = L S \cos\theta \quad (11)$$

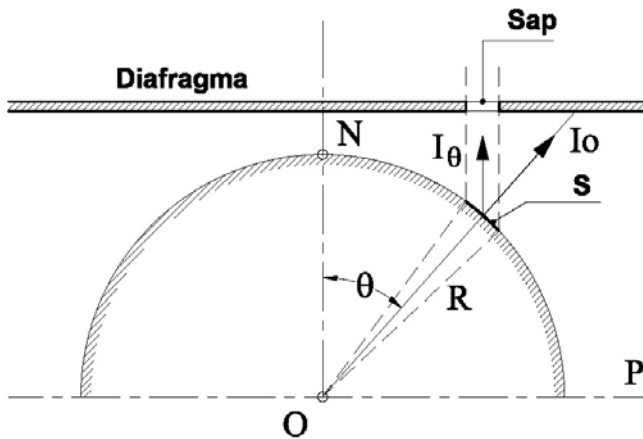


ILUSTRAÇÃO 18 – Intensidade e Superfície Aparente em Determinada Direção.
FONTE - PRADO, 1961. p.33

Substituindo I_0 na equação (10) pelo valor I da equação (11) e multiplicando $d\theta$ por $\cos\theta$, tem-se o fluxo luminoso $d\Phi_{on}$ emitido pela nesga na direção $O-N$, em função da luminância L :

$$d\Phi_{on} = 2\pi L S \cos\theta \sin\theta d\theta \cos\theta$$

$$\Phi_{on} = 2\pi L S \cos\theta \int_0^{\pi/2} \sin\theta \cos\theta d\theta$$

Integrando a equação, tem-se o fluxo luminoso total Φ_{on} emitido na direção $O-N$:

$$\Phi_{on} = 2\pi L S \cos\theta \left[\frac{\sin^2 \theta}{2} \right]_0^{\pi/2}$$

$$\Phi_{on} = \pi L S \cos\theta$$

Como a relação entre exitância M e o fluxo luminoso Φ é $M = \Phi/S$, dividindo os dois membros da equação anterior por $S \cos\theta$, que corresponde a Sap na direção $O-N$ (IL.18), tem-se a exitância nesta direção:

$$M_{on} = \pi L \tag{12}$$

As duas deduções demonstram a multiplicação da luminância por π para a obtenção da iluminância por caminhos diferentes. A segunda dedução é mais coerente com o modelo 3a proposto, pois considera uma fonte pontual e está fundamentada pelo conceito de superfície aparente na direção do observador.

Podemos identificar três tipos de fonte e relacionar o fluxo luminoso à intensidade luminosa (MOON, 1936. p. 258):

Para uma fonte pontual isotrópica, o fluxo luminoso Φ é representado por uma esfera e sua relação com a intensidade luminosa I é:

$$\Phi = 4\pi I$$

Se for considerado apenas um hemisfério, tem-se:

$$\Phi = 2\pi I$$

E para uma superfície infinitesimal (difusor perfeito), como fonte:

$$\Phi = \pi I$$

Outras grandezas e relações fotométricas são necessárias conforme a aplicação. As usuais são as seguintes:

- Contraste
- Fluxo ou Potência Radiante
- Eficácia Luminosa
- Temperatura de Cor
- Índice de Reprodução de Cor

Com exceção da última, todas se referem à iluminação natural e artificial. Apenas o índice de reprodução de cor não faz sentido ser aplicado à iluminação natural, pois o Sol tem comportamento equivalente ao do corpo negro, que é o padrão utilizado na composição deste índice.

O contraste é determinante no fenômeno que envolve a iluminação de túneis, e será discutido a seguir. As demais grandezas e relações fotométricas estão definidas no glossário.

Para que um objeto-alvo possa ser identificado visualmente, é necessário um diferencial de cor ou luminância entre o objeto e seu fundo imediato. Quando este diferencial é em luminância, sua relação é chamada contraste. Existem diversas maneiras de definir o contraste e suas respectivas equações. Em iluminação de túneis, importam as seguintes:

$$C = \frac{L_o - L_f}{L_f} \quad (13)$$

Onde:

- C Contraste;
 L_o Luminância do objeto-alvo;
 L_f Luminância do fundo;

Segundo a equação (13), o contraste pode ser positivo ou negativo. Se a luminância do objeto-alvo for maior que a do fundo, o contraste será positivo e, se for menor, negativo. Observa-se que o contraste indica uma relação percentual e, por alguns autores, o segundo membro da equação é multiplicado por 100.

O contraste pode ser diminuído pela interferência de fontes de ofuscamento no campo visual. Estas introduzem uma luminância de véu que prejudica a identificação do objeto-alvo por reduzir o contraste. Adicionando a luminância de véu L_v nas variáveis da equação (13) tem-se o contraste reduzido C' :

$$C' = \frac{(L_o + L_v) - (L_f + L_v)}{L_f + L_v} = \frac{L_o - L_f}{L_f + L_v} \quad (14)$$

Através das equações (13) e (14) pode-se obter o contraste reduzido C' em função do contraste C :

$$C' = C \frac{L_f}{L_f + L_v} \quad (15)$$

2.3 ILUMINAÇÃO NATURAL E INSOLAÇÃO

A importância da luz natural e sua inter-relação com a arquitetura parecem evidentes. Interfere no conforto ambiental e na eficiência energética, além de ser um elemento integrador entre arquitetura e natureza, com possibilidades de valor estético e funcional.

As fontes de luz natural provocam fenômenos de comportamento e características diferentes. Em iluminação, a luz solar direta é geralmente evitada por seu alto nível e potência radiante, mas pode ser aproveitada por reflexão em dispositivos como prateleiras de luz, ou para aquecer os ambientes em climas e estações frias. A luz proveniente do céu é mais adequada, não apenas por sua intensidade, mas também proporciona maior uniformidade. Embora ambas variem, a incidência de radiação solar direta necessita de maiores cuidados. Por ser um fenômeno dinâmico, sua penetração no interior dos ambientes necessita ser avaliada, em função da localização geográfica (latitude e longitude), data e hora.

A Terra possui um movimento de rotação em torno de seu eixo e de translação em torno do Sol. Entretanto, para um observador na superfície terrestre, parece que a Terra está parada e os corpos celestes é que se movimentam ao seu redor. Disto decorre o movimento aparente dos astros que descrevem trajetórias aparentes para um observador na Terra, artifício que facilita seu estudo e representação gráfica.

O sentido do movimento de rotação da Terra é contrário ao sentido do movimento aparente dos astros. Considerando um observador com a cabeça orientada para o semi-espaço Norte, adota-se a seguinte convenção para os sentidos dos movimentos de rotação:

a) Sentido direto (f): da direita para a esquerda, passando pela frente do observador;

b) Sentido retrógrado (f'): inverso ao sentido direto (DOMINGUES, 1976, p.9).

Os movimentos de rotação e translação da Terra ocorrem no sentido direto, resultando no sentido retrógrado do movimento aparente da esfera celeste.

Para localizar um ponto qualquer na Terra ou na abóbada celeste, torna-se necessário estabelecer um sistema de coordenadas. Os elementos básicos relacionados ao sistema de coordenadas geográficas da Terra são:

- Eixo polar – Reta que interliga os pólos terrestres;
- Plano do horizonte do observador – Plano tangente à superfície da Terra no ponto determinado pelo observador;
- Vertical do lugar – Reta perpendicular ao plano do horizonte que passa pelo observador;
- Equador – Grande círculo⁹ da esfera terrestre ortogonal ao eixo polar;
- Paralelos Terrestres – Pequenos círculos da esfera terrestre paralelos ao Equador;
- Meridianos Terrestres – Grandes círculos que contêm o eixo polar;
- Meridiano de Greenwich – Meridiano terrestre de referência que passa pelo observatório de Greenwich, na Inglaterra,

⁹ Grande círculo de uma esfera é o círculo que contém o diâmetro da esfera e pequeno círculo é qualquer círculo da esfera que não contém seu diâmetro.

- Longitude – Ângulo diedro entre o Meridiano de Greenwich e qualquer outro meridiano terrestre, medido de 0 a 180° a Leste ou Oeste do Meridiano de Greenwich;
- Latitude – Ângulo formado entre a vertical do lugar e o plano do Equador. Sua contagem é feita de 0 a 90°, com origem no Equador, para Norte e para sul. Desta forma, para cada paralelo terrestre corresponde apenas uma latitude;
- Trópico de Capricórnio – Paralelo terrestre ao Sul do Equador com latitude de aproximadamente 23°27’;
- Trópico de Câncer – Paralelo terrestre ao Norte do Equador com latitude de aproximadamente 23°27’;

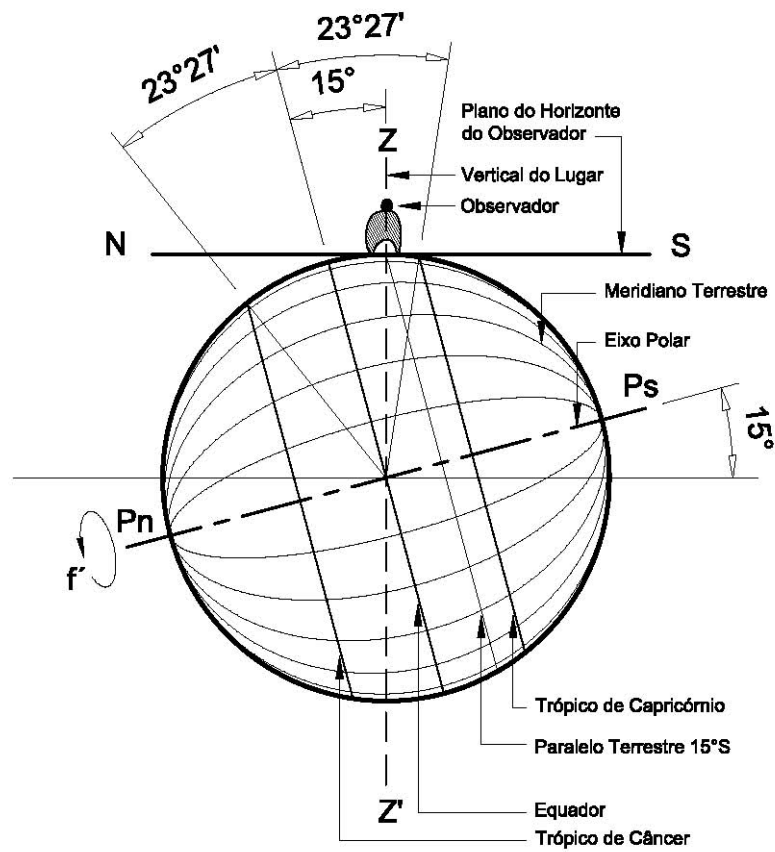
A esfera celeste aparenta ser uma imensa superfície esférica, supostamente de raio infinito, em cujo centro se encontra o observador. Em sua concavidade admite-se estarem os corpos celestes, com movimentos aparentes resultantes do seu movimento próprio e dos movimentos de rotação e translação da Terra. Devido ao grande afastamento das estrelas comparado às dimensões do sistema solar, o movimento de translação da terra afeta apenas o Sol e os corpos celestes pertencentes ao sistema solar, que pode ser considerado um sistema isolado.

Os principais elementos para o estudo da geometria da insolação encontram-se representados na esfera celeste. Estes elementos possuem correspondência com os elementos do sistema de coordenadas geográficas da Terra e alguns dependem da posição do observador.

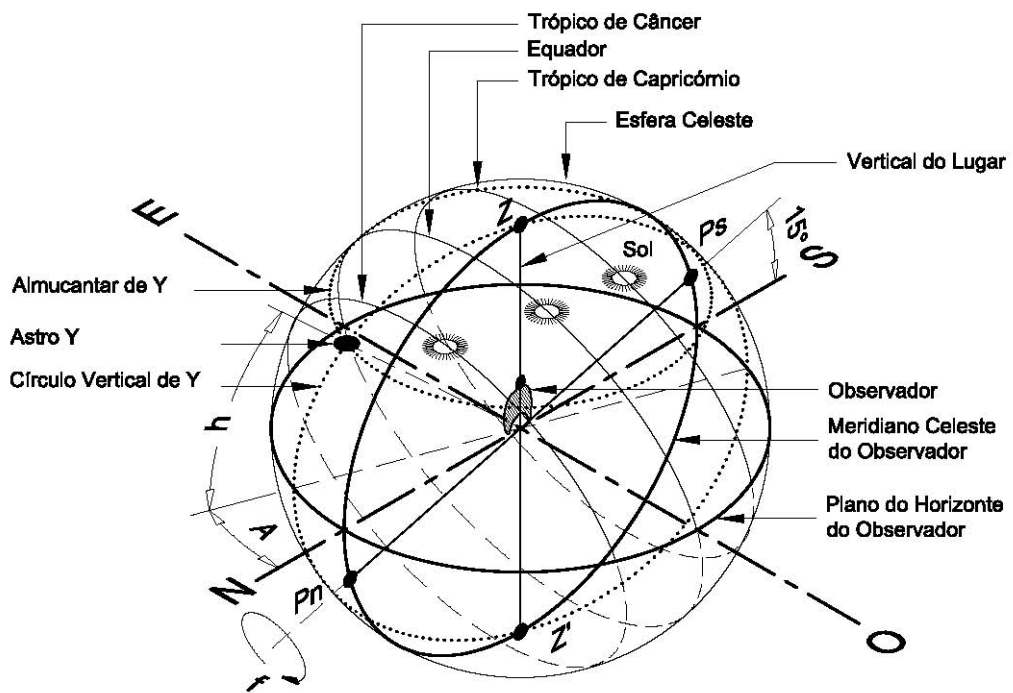
- **Horizonte celeste** – Interseção da esfera celeste com o plano horizontal do observador;
- **Almucantar** – Círculo da esfera celeste paralelo ao horizonte celeste;
- **Zênite (Z)** – Ponto superior representado pela interseção da vertical do lugar com a esfera celeste;
- **Nadir (Z')** – Ponto inferior representado pela interseção da vertical do lugar com a esfera celeste;
- **Pólos celestes (Pn e Ps)** – Pontos de interseção do eixo polar da Terra com a esfera celeste;

- **Círculos verticais** – Grandes círculos que contêm a vertical do lugar. O círculo vertical que passa pelos pólos celestes é chamado meridiano celeste do observador;
- **Equador celeste** – Interseção entre o plano do equador terrestre com a esfera celeste;
- **Paralelos celestes** – Pequenos círculos da esfera celeste paralelos ao Equador celeste;
- **Pontos cardeais** – Pontos Norte, Sul, Leste e Oeste que dividem cada quadrante da linha do horizonte. A interseção do meridiano celeste do observador com a linha do horizonte determina a linha Norte / Sul do observador. A linha Leste / Oeste é obtida por perpendicularidade.
- **Eclíptica** – Plano definido pela trajetória da Terra ao redor do Sol. A obliquidade da eclíptica é aproximadamente $23^{\circ}27'$, correspondendo ao ângulo formado entre os planos da eclíptica e do equador.
- **Altura (γ) e azimute (α)** – Ângulos que determinam a posição de um astro Y na esfera celeste em relação a um observador. A altura é o ângulo vertical formado entre o plano horizontal do observador e a reta definida pelo astro, e o observador; o azimute é o ângulo horizontal referenciado a partir da direção Norte ou Sul. Para problemas de topografia, o azimute é considerado de 0 a 360° no sentido NESO e, para problemas de astronomia, no sentido SONE;
- **Trópicos Celestes** – Paralelos Celestes cuja distância angular do Equador Celeste é igual à obliquidade da eclíptica (aproximadamente $23^{\circ}27'$);

A IL.19 representa estes elementos para a Terra e para a esfera celeste, considerando o observador na latitude 15° Sul.



(a)



(b)

ILUSTRAÇÃO 19 – Elementos Fundamentais: (a) Esfera Terrestre; (b) Esfera Celeste

O tempo legal internacionalmente adotado é obtido pela divisão do globo terrestre em 24 fusos esféricos iguais, de 15° cada um, o primeiro tendo como meridiano central o Meridiano de Greenwich. O tempo legal é igual ao tempo solar médio no meridiano central de cada fuso. Assim, as horas legais entre cada fuso horário diferem sempre de um número inteiro, acrescentando uma unidade no sentido direto do movimento de rotação da Terra.

Algumas adaptações são necessárias para adequar os diferentes locais da terra aos fusos horários. Observa-se nas representações gráficas que os meridianos que limitam cada fuso horário são muitas vezes distorcidos para englobar ou excluir regiões conforme convenha, ajustando-se às divisas entre estados, países e também aos acidentes geográficos.

Dois modelos derivados da geometria da insolação são normalmente utilizados nos estudos e cálculos de iluminação natural:

Modelo icônico – caracteriza-se por um sistema de projeção dos elementos da abóbada celeste. O hemisfério celeste tridimensional passa a ser representado em duas dimensões, possibilitando determinar as trajetórias aparentes do sol em diagramas conhecidos como Cartas Solares. Em princípio, pode-se utilizar qualquer sistema de projeção cartográfica, sendo mais apropriados o ortográfico, o eqüidistante, o estereográfico e o gnomônico (SILVA; MALATO, 1969, p. 15-22). O estereográfico é o mais utilizado, adotando o Nadir como ponto de projeção (SZOKOLAY, 1996, p. 9).

As Cartas Solares representam graficamente as projeções das trajetórias aparentes do Sol, baseadas no tempo solar verdadeiro. Complementadas pelo Transferidor Auxiliar e a Geometria Descritiva, possibilitam obter graficamente os elementos necessários para o estudo da insolação de edifícios. Como as trajetórias aparentes do Sol variam em função da latitude, as cartas solares são elaboradas para cada latitude específica.

Outra ferramenta prática, relacionada às trajetórias aparentes, é o Relógio de Sol, uma aplicação da projeção gnomônica. Obtém-se qualquer data e horário através da sombra de uma pequena haste (gnomo) em um diagrama. Assim como as cartas solares, os diagramas do Relógio de Sol são específicos para cada latitude (IL.20).

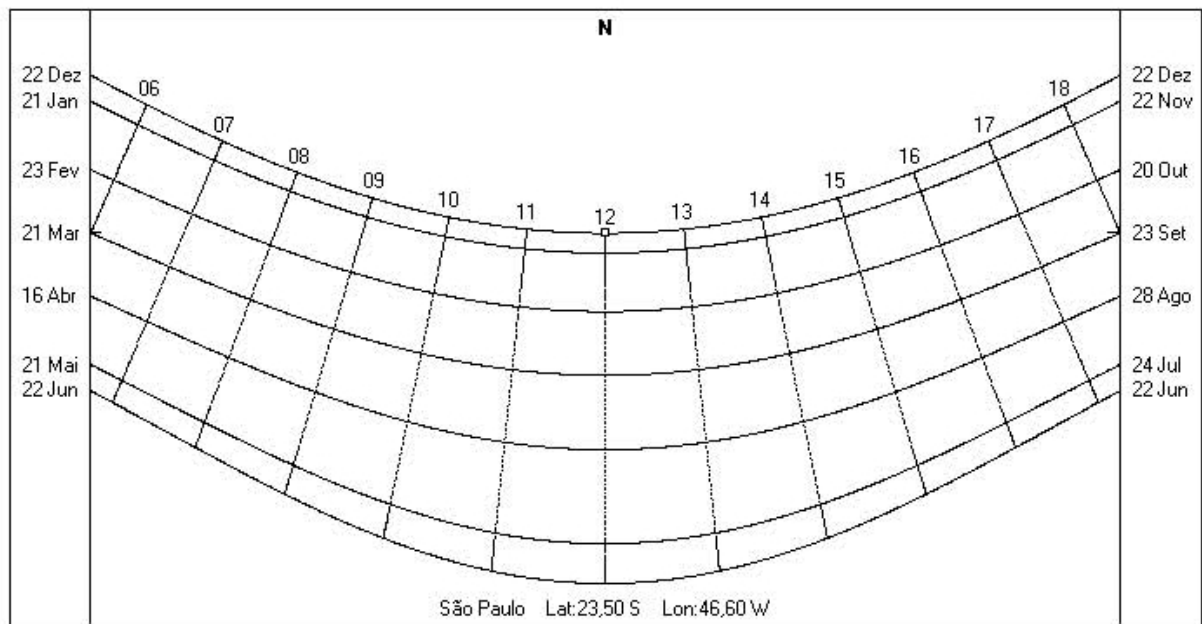


ILUSTRAÇÃO 20 – Relógio de Sol : Diagrama Lat. 23°30'S
FONTE - RORIZ, 1995

Também se pode ajustar a sombra da haste para simular qualquer data e horário, inclinando o plano do Relógio de Sol. Este artifício, quando utilizado em conjunto com modelos físicos, permite avaliar a penetração solar pelas aberturas e a projeção de sombras durante o ano (IL.21)

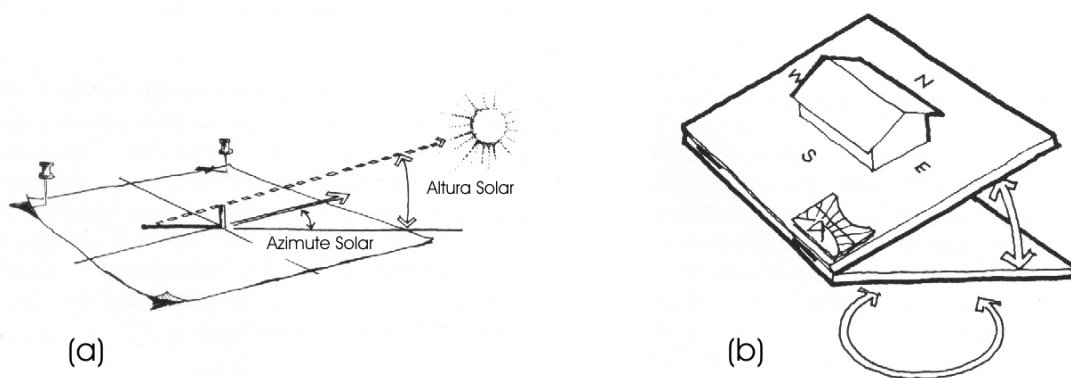


ILUSTRAÇÃO 21 – Relógio de Sol : Construção e Aplicação
(a) Projeção Gnomônica; (b) Aplicação Associada a Modelo Físico
FONTE - MOORE, 1991, p. 55; 171, adaptação nossa

Modelo analítico – é um sistema de equações que determina o azimute e altura do Sol. Este sistema é bastante preciso e efetua correções para ajustar o tempo legal ao tempo solar devido a diferenças provocadas pela órbita elíptica da terra, zona horária e declinação solar.

A questão fundamental dos problemas que envolvem a geometria da insolação está em determinar a posição solar. Em função desta, é possível obter o dimensionamento de brises, verificar interferências pelo traçado de sombras, ou avaliar a radiação solar em um plano.

A obliquidade da eclíptica define os dois paralelos terrestres eqüidistantes do equador com latitude igual ao ângulo de obliquidade ($23^{\circ}27'$): o Trópico de Câncer no hemisfério Norte e o Trópico de Capricórnio no hemisfério Sul. A declinação do Sol durante o ano varia dentro destes limites, causando o fenômeno das estações. O Sol, em sua trajetória aparente, muda duas vezes de hemisfério celeste durante o ano, passando do hemisfério Sul para o hemisfério Norte e do hemisfério Norte para o hemisfério sul, próximo de 21 de março e 23 de setembro respectivamente. Nestas datas, denominadas de equinócios, o Sol posiciona-se perpendicular à linha do equador e os dias são iguais às noites em toda a terra. As datas em que o Sol ocupa as linhas extremas de seu percurso aparente são chamadas de solstícios de verão e de inverno. Para o hemisfério sul, no solstício de verão (22 de dezembro) tem-se o dia mais longo do ano e, no solstício de inverno (22 de junho), o dia mais curto, ocorrendo o inverso no hemisfério Norte.

2.3.1 O SOL E O CÉU COMO FONTES DE LUZ

A principal fonte de luz natural é o Sol. A fonte secundária é a emitida pela abóbada celeste. Pode-se considerar a primeira como a lâmpada, e a segunda, como a luminária. Entretanto, o conjunto é dinâmico, dependente de condições atmosféricas, climáticas e regionais: o Sol em permanente movimento, o céu em permanente transformação. A abertura, definidora do momento interior da luz, trabalha em sintonia com o movimento do campo visual do usuário.

A intensidade de radiação, a qualidade espectral e os efeitos não-visuais da energia radiante devem ser considerados, como os efeitos sobre microorganismos, animais, plantas e, principalmente, sobre o homem, além dos efeitos sobre os materiais. A energia radiante invisível pode produzir efeitos benéficos e maléficos. Nos primeiros, podemos citar os efeitos sanitários, a carga térmica em climas frios e os efeitos sobre os seres vivos, incluindo aqui suas propriedades terapêuticas. Nos segundos, observam-se as doenças que podem ser produzidas na pele e olhos, a carga térmica em climas quentes e os efeitos sobre os materiais, podendo causar o enfraquecimento e alterações na cor e estrutura de objetos. As exigências

encontradas em iluminação de museus, quanto ao tempo e nível de iluminação a que as peças podem estar expostas, exemplificam este efeito da luz.

Podemos identificar dois grupos de aspectos a serem considerados no projeto luminotécnico, por suas características específicas:

- **Objetivos:** relacionados à tarefa visual.

Neste grupo estão os elementos relativos aos aspectos físicos da luz como iluminância, luminância, uniformidade e índice de reprodução de cor. Podem ser avaliados por medição, portanto admitem uma avaliação quantitativa dos resultados. Possuem uma correspondência direta com a operacionalidade pretendida para determinado espaço.

- **Subjetivos:** relacionados à ambiência.

A identificação dos elementos neste grupo é mais complexa que no anterior. Podem variar substancialmente em função da localização, cultura e costumes. Entretanto, existem alguns aspectos normalmente considerados em iluminação natural. A vista para o exterior é um elemento fundamental e interfere sobremaneira no espaço interior. Muitas vezes, a função da abertura lateral é mais valorizada sob este enfoque que pela iluminação que proporciona. Se pensarmos funcionalmente apenas pela iluminação, a abertura zenital parece ser vantajosa se comparada à lateral. Isto pode ser constatado pela similaridade entre a abertura zenital e a iluminação artificial. Dificilmente um sistema de iluminação artificial se assemelha a uma abertura lateral, como um grande painel. Tal concepção parece ser pouco eficiente, além de apresentar problemas de ofuscamento e uniformidade. Mas, para iluminação natural, a abertura lateral é normalmente mais utilizada. Além dos aspectos construtivos, estéticos, da maior facilidade de vedação, das limitações arquitetônicas como em edifícios de vários andares, a preferência parece estar relacionada à possibilidade de visão para o exterior. Há relatos, em ambientes de trabalho, sobre a necessidade de variar o campo visual da tarefa para o exterior, como uma forma de minimizar a fadiga visual (IESNA, 1999, p. 6). A abertura ainda agrega outras funções como ventilação e, neste aspecto, sua proximidade com o usuário é favorável, por facilitar o acesso e controle dos mecanismos dos caixilhos.

A luminosidade é um elemento subjetivo que encontra correspondência à luminância do grupo anterior. Os dois referem-se ao brilho dos objetos, mas, no primeiro, interessa o brilho aparente e, no segundo, o brilho físico que pode ser medido por um Luminancímetro.

2.3.1.1 LUZ DO SOL

O alto potencial energético da radiação solar direta restringe sua aplicação em iluminação de interiores. O ofuscamento e a alta carga térmica parecem ser suficientes para não estimular sua aplicação particularmente em climas quentes. As recomendações que consideram seu potencial, normalmente, induzem ao controle ou filtro da luz solar direta por brises, vegetação e dispositivos que permitam atenuar seus efeitos. Neste sentido, a reflexão pode ser um recurso de bom desempenho e o desenho dos elementos externos e internos podem compor aberturas mais eficientes.

Considera-se que, para determinada latitude e em uma superfície normal aos raios solares, a iluminação direta do Sol não obscurecido varie pouco durante o dia, excluindo os horários próximos ao nascente e ao ocaso (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975. p.48). A iluminância máxima proveniente da radiação solar direta em um plano horizontal está em torno de 110 klux, ocorrendo quando o Sol se posiciona no Zênite.

Adotam-se os seguintes parâmetros na análise da luz solar (IESNA, 2000, cap.8, p.5):

- Constante solar de iluminação E_{sc} : 128 klux
- Constante solar de irradiação: 1.350 W/m²
- Eficácia luminosa: 94,2 lm/W

Um conceito fundamental para os cálculos que envolvem a radiação solar é a constante solar. Considera-se o Sol como uma fonte pontual que produz uma radiação constante numa superfície normal aos raios solares, tomada à meia distância entre a Terra e o Sol.

A constante solar de iluminação E_{sc} é um valor médio (MURDOCH, 1985, p. 351). Para se obter a iluminância proveniente da radiação solar direta que atinge o solo terrestre, duas correções são necessárias: uma devido à variação da distância do Sol, causada pela órbita elíptica da Terra, e outra, devido à atmosfera.

A primeira correção determina a iluminância solar extraterrestre E_{xt} em uma determinada data. Esta correção é dada pela equação (IESNA, 2000, cap.8, p.5):

$$E_{xt} = E_{sc} \left(1 + 0.034 \cos \frac{2\pi(J-2)}{365} \right) \quad [\text{klx}] \quad (16)$$

A variável J é um número entre 1 e 365, correspondente ao dia Juliano.

A segunda correção fornece a iluminância ao nível do mar pela equação:

$$E_{dn} = E_{xt} e^{-cm} \quad [\text{klx}] \quad (17)$$

Onde:

E_{dn} Iluminância solar direta normal à superfície ao nível do mar;

E_{xt} Iluminância solar direta normal à superfície extraterrestre;

c Coeficiente atmosférico de extinção;

m Massa óptica de ar.

A influência da atmosfera relaciona-se à sua composição e à distância que os raios de Sol devem atravessar para atingir a terra.

O coeficiente c varia de acordo com as condições de céu¹⁰ e tem sido avaliado em vários locais do mundo com ampla variação nos resultados. O IESNA (2000, cap.8, p.6) recomenda os valores de c para céu claro e céu parcialmente encoberto respectivamente **0.21** e **0.80**. Para céu encoberto não existe radiação solar direta, e a iluminância E_{dn} é nula.

A massa de ar m é função da altura solar γ_s , sendo obtida pela equação:

$$m = \frac{1}{\text{sen } \gamma_s} \quad (18)$$

Os problemas que normalmente encontramos em arquitetura, relacionados à radiação solar, estão em avaliar o comportamento ou desempenho de superfícies que recebem esta radiação. Com o valor de E_{dn} pode-se obter a iluminância em qualquer plano, bastando determinar o ângulo de incidência dos raios solares nesse plano. Para planos horizontais e verticais, as respectivas iluminâncias E_{dh} e E_{dv} são:

$$E_{dh} = E_{dn} \text{sen } \gamma_s \quad [\text{klx}] \quad (19)$$

$$E_{dv} = E_{dn} \cos a_i \quad [\text{klx}] \quad (20)$$

¹⁰ Ver seção 2.3.1.2.

Onde:

E_{dh} Iluminância solar direta em superfície horizontal;

E_{dv} Iluminância solar direta em superfície vertical;

γ_s Altura solar;

a_i Ângulo de incidência no plano considerado.

Entretanto, em geral, a radiação solar direta no solo terrestre não ocorre isoladamente. Outra componente, a radiação solar difusa proveniente do céu, sempre estará presente e será tratada a seguir.

2.3.1.2 LUZ DO CÉU

Em iluminação natural, a variação quantitativa e qualitativa ao longo do tempo é uma característica inerente. Estas variações ocorrem em distintas horas do dia, em função das condições climáticas, da posição do Sol e também são influenciadas pelas estações no decorrer do ano que, por sua vez, dependem da latitude local.

Embora nossos olhos estejam naturalmente acostumados a esta sazonalidade, a luz natural pode ser inadequada em certas situações. O rigor técnico em determinada tarefa, o tempo de exposição à luz, em função do nível de iluminação que ocorre em museus, ilustram cenários que tornam complexa sua utilização. Este aspecto pode ser observado no comentário de EGAN (1983) sobre a liberdade do projetista e o rigor visual da tarefa. Ele considera que os dois fatores são inversamente proporcionais e relaciona diversas categorias de iluminação por atividade. Sua argumentação é que a luz natural apresenta variações previsíveis e imprevisíveis.

Para contornar os inconvenientes decorrentes destas variações, é comum a utilização de sistemas integrados entre iluminação natural e artificial. Esta é uma providência importante, não apenas para suprir eventuais falhas da iluminação natural, mas também para garantir a eficiência energética, pois não basta prover um ambiente de adequada iluminação natural, se as luzes permanecerem acesas, ou se o sistema artificial não possibilitar o escalonamento das luminárias de acordo com a necessidade. O conceito apropriado para um sistema de iluminação elétrica integrado à iluminação natural está em estabelecer zonas de controle integrado e uma estratégia automática para cada zona (ROBBINS, 1986 p.285). A Iluminação Artificial Suplementar Permanente de Interiores (*P.S.A.L.I. – Permanent Supplementary Artificial Lighting of Interiors*) foi uma técnica desenvolvida com o

propósito de resolver as principais dificuldades advindas do controle e disponibilidade de luz natural. O uso de iluminação artificial durante o dia tornava-se cada vez mais favorável (IES, 1962 apud HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975, p. 561) devido à evolução tecnológica, baixo custo e pela necessidade de utilização mais eficiente do espaço disponível em áreas densamente edificadas, resultando em ambientes profundos com pé-direito baixo.

Essas idéias só são hoje possíveis porque houve uma revolução na atitude das pessoas que trabalham, em relação à luz artificial. Os aperfeiçoamentos da moderna tecnologia da iluminação artificial, principalmente no controle do encadeamento, tornaram mais agradável trabalhar sob luz artificial, e a lâmpada fluorescente que tem uma cor aproximada à da luz natural pode, quando usada racionalmente num projeto delicado, criar um ambiente agradável e aprazível que a maioria das pessoas acham aceitável. (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975. p. 562).

A **aceitação** à luz artificial parece estar consolidada atualmente, e talvez seja necessário reverter o processo para a luz natural, pois o contexto descrito por Hopkinson; Petherbridge e Longmore foi alterado. Se a tecnologia continua evoluindo no sentido de lâmpadas e dispositivos cada vez mais eficientes, os recursos para geração de energia têm mostrado seus limites, além do impacto ambiental que provocam.

A eficácia luminosa do céu supera a maioria das lâmpadas artificiais eficientes. No céu claro, está entre 100 e 145 lm/W e, no céu encoberto, entre 100 e 130 lm/W (PEREIRA, 1992, p.218). As lâmpadas de vapor de sódio são as únicas que possuem eficácia equivalente à luz natural, entre 80 e 140 lm/W, mas com o inconveniente de distorcerem as cores. As lâmpadas de vapor metálico possuem bom índice de reprodução de cor e eficácia luminosa entre 65 e 90 lm/W, e as lâmpadas fluorescentes também apresentam bom índice de reprodução de cor, com eficácia luminosa entre 55 e 90 lm/W (OSRAM, 2007, p.8.03).

Portanto, além da melhor qualidade que proporciona, a influência da utilização da luz natural na conservação de energia não se restringe apenas à economia no consumo para a iluminação, mas à diminuição da carga térmica no edifício proveniente da iluminação artificial.

Ao compararmos a radiação direta do Sol com a radiação difusa proporcionada pela abóbada celeste, observamos que a última possui características mais apropriadas para a iluminação de interiores. Além dos aspectos já citados, como a alta carga térmica e ofuscamento, as variações da luz solar direta são mais

acentuadas e imprevisíveis. O movimento aparente do Sol ou a brusca redução que pode ser proporcionada por uma nuvem revelam suas características dinâmicas. A luz do céu é mais uniforme e oscila em uma faixa menor, sendo, portanto, mais compatível com as tarefas em interiores. Portanto, embora a luz do Sol seja a fonte fundamental de luz natural, os métodos de cálculo, normalmente, consideram apenas a iluminação que entra pelas aberturas proveniente da parcela de céu visível, recomendando o controle e obstrução da luz solar direta.

Admitindo a luz da abóbada celeste como a principal fonte para os cálculos de iluminação natural em interiores, torna-se necessário conhecer e dimensionar seus elementos. O céu é semelhante a uma superfície luminosa esférica ou plana infinita, apresentando variações de luminância em toda sua extensão. Estas variações dependem do tempo, das condições climáticas e da localização geográfica. Em diversas partes do mundo, entre 1921 e 1963, foram elaboradas medições do céu limpo e do céu totalmente encoberto por nuvens, buscando encontrar uma equação que pudesse representar a distribuição das luminâncias na abóbada celeste (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975. p.53-66). Definiram-se então três condições básicas de céu: céu claro, céu parcialmente encoberto e céu encoberto.

A IESNA (2000, cap.8, p.5) recomenda dois métodos para classificação do céu: método da razão de céu e método da cobertura de céu. O primeiro, classifica o céu através da divisão entre a irradiação difusa I_d e a irradiação global I_g em um plano horizontal. A razão de céu obtida I_d/I_g determina as condições de céu:

- **Céu claro** $I_d / I_g \leq 0,3$
- **Céu parcialmente encoberto** $0,3 < I_d / I_g < 0,8$
- **Céu encoberto** $I_d / I_g \geq 0,8$

Como a razão de céu se aproxima de 1 quando a altura solar se aproxima de zero, independente das condições de céu, este método não é indicado para essas situações.

O segundo método, avalia a proporção de céu encoberto por nuvens, que é estimada em uma escala de 0.0 (céu sem nuvens) para 1.0 (céu totalmente encoberto):

- Céu claro 0,0 – 0,3
- Céu parcialmente encoberto 0,4 – 0,7
- Céu encoberto 0,8 – 1,0

A NBR 15215-2 (2005) adota critério semelhante ao método da cobertura de céu IESNA, com pequena diferença nos valores recomendados para classificação do tipo de céu:

- Céu claro 0,00 – 0,35
- Céu parcialmente encoberto 0,35 – 0,75
- Céu encoberto 0,75 – 1,00

Para as três condições básicas de céu, a iluminância no plano horizontal desobstruído pode ser obtida através de uma única equação:

$$E_{ch} = A + Bsen^C \gamma_s \text{ [klx]} \tag{21}$$

Onde:

E_{ch} Iluminância do céu no plano horizontal desobstruído;

γ_s Altura solar;

A Fator da iluminância do céu (nascente / poente);

B Coeficiente de iluminância da altura solar;

C Expoente de iluminância da altura solar.

As constantes A, B e C são diferentes para cada condição de céu (TAB.1)

TABELA 1 – Constantes de Disponibilidade de Iluminação Natural

Condição de Céu	A (klx)	B (klx)	C
Claro	0,8	15,5	0,5
Parcialmente Encoberto	0,3	45,0	1,0
Encoberto	0,3	21,0	1,0

FONTE – IESNA, 2000, cap.8, p.6

Inicialmente, a CIE padronizou apenas os modelos de céu encoberto e claro, que foram desenvolvidos em uma série de publicações entre 1955 e 1996. O céu parcialmente encoberto foi inserido no céu intermediário, ocorrendo entre os dois modelos de céu padronizados, e só foi padronizado posteriormente (CIE, 2003), como será visto adiante.

Para o céu encoberto consideram-se duas possibilidades: uniforme e não uniforme. O céu uniforme é a hipótese mais simples, facilitando o cálculo por apresentar luminância constante independente da orientação e posição do Sol. No modelo de céu encoberto não uniforme, a posição do Sol não influencia as áreas da sua circunvizinhança, nem a distribuição, mas afeta igualmente a luminância em toda a abóbada celeste e, portanto, deve-se considerar a hora solar. Este modelo pode ser representado por círculos horizontais (almucantar) de igual luminância, cujo valor aumenta na direção do Zênite, atingindo, aproximadamente, três vezes a luminância do horizonte.

A distribuição das luminâncias nos modelos de céu claro e parcialmente encoberto depende da posição do Sol. Considera-se que as áreas próximas ao Sol são influenciadas por ele. As equações são similares e avaliam qualquer ponto na esfera celeste em função da luminância zenital, da posição do Sol, e do ângulo entre o ponto e o Sol.

Embora seja adotada uma equação básica para o céu claro, também há duas possibilidades, uma para atmosferas rurais claras e outra para atmosferas poluídas. Para isto, algumas funções são alteradas na mesma equação, ajustando os coeficientes de acordo com as duas situações admitidas.

A IL. 22 apresenta os ângulos considerados nas equações:

- α azimute do ponto P (NESO) [rad];
- α_s azimute do Sol (NESO) [rad];
- γ altura do ponto P [rad];
- γ_s altura solar [rad];
- ζ ângulo entre o Sol e o Ponto P [rad].

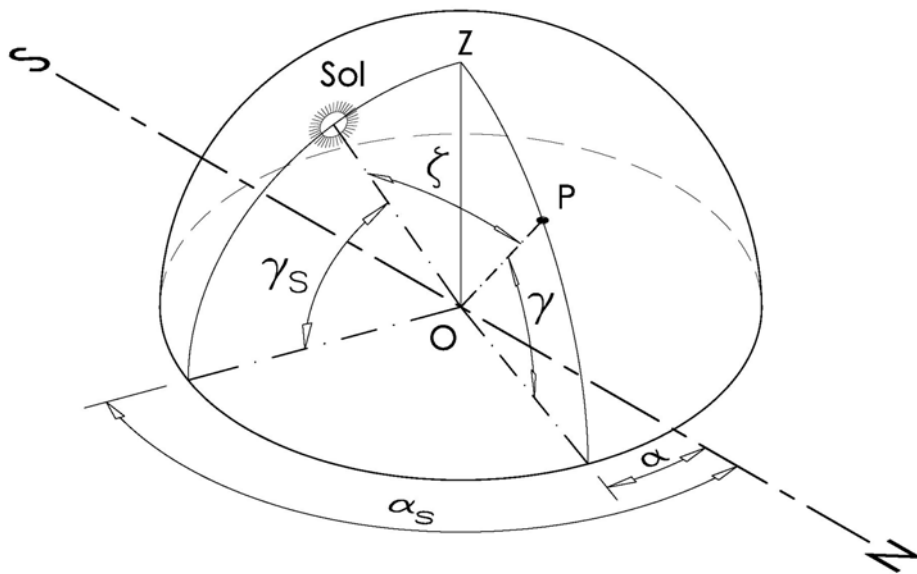


ILUSTRAÇÃO 22 – Ângulos para Cálculo da Luminância do Céu
FONTE – CIE, 1996, p. 2, adaptação nossa

. As equações (22) e (23) fornecem, respectivamente, a distribuição das luminâncias para céu encoberto e céu claro, padronizados pela CIE (1996)

$$\frac{L_{oc}(\gamma)}{L_{Zoc}} = \frac{1 + 2 \text{sen } \gamma}{3} \quad (22)$$

Onde:

L_{oc} Luminância em um ponto do céu encoberto [cd/m²];

L_{Zoc} Luminância no Zênite do céu encoberto [cd/m²];

$$\frac{L_{cl}(\gamma_s, \gamma, \zeta)}{L_{Zcl}(\gamma_s)} = \frac{f(\zeta) \cdot \phi(\gamma)}{f(\frac{\pi}{2} - \gamma_s) \cdot \phi(\frac{\pi}{2})} \quad (23)$$

Onde:

L_{cl} Luminância em um ponto do céu claro [cd/m²];

L_{Zcl} Luminância no Zênite do céu claro [cd/m²];

$$f(\zeta) = 0.91 + 10e^{-3\zeta} + 0.45 \cos^2 \zeta$$

$$f(\frac{\pi}{2} - \gamma_s) = 0.91 + 10e^{-3(\frac{\pi}{2} - \gamma_s)} + 0,45 \cos^2 (\frac{\pi}{2} - \gamma_s)$$

$$\phi(\gamma) = 1 - e^{-0.32 / \text{sen} \gamma}$$

$$\phi(\gamma) = 1 - e^{-0.32}$$

A função f refere-se a atmosferas rurais claras. Para atmosferas poluídas, deve-se substituir f por f' , conforme segue:

$$f'(\zeta) = 0.856 + 16e^{-3\zeta} + 0.3 \cos^2 \zeta$$

$$f'\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_s\right) = 0.856 + 16e^{-3(\pi/2 - \gamma_s)} + 0.3 \cos^2\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_s\right)$$

A NBR 15215 utiliza as equações (22) e (23) para construir os Diagramas de Contribuição Relativa de Luz. Como as equações fornecem a relação entre a luminância em um ponto qualquer da abóbada celeste e a luminância do Zênite, são suficientes para este fim, mas não possibilitam obter as luminâncias nos pontos da abóbada, pois falta o valor da luminância do Zênite, o qual varia em função da altura solar e das condições climáticas locais. Diversos métodos e equações são propostos para sua determinação. No céu claro, utiliza-se o fator de turbidez, que permite estimar a poluição do ar. O termo turbidez é por vezes utilizado para descrever o grau de atenuação da luz em relação a uma atmosfera perfeitamente limpa e seca (Tregenza; Loe, 1998, p.34-5).

A equação (24) proposta por Krochmann (1963 apud CIE 1994, p.13), para determinar a luminância no Zênite do céu encoberto L_{Zoc} , e a equação (25) proposta por Kittler (1970 apud CIE 1994, p.13), para determinar a luminância no Zênite do céu claro L_{Zlc} , são as mesmas adotada pela ABNT (2005).

$$L_{Zoc}(\gamma_s) = 0,123 + 8,6 \operatorname{sen} \gamma_s \quad [\text{kcd/m}^2] \quad (24)$$

$$L_{Zlc}(\gamma_s) = 0,3 + 3 \tan \gamma_s \quad [\text{kcd/m}^2] \quad (25)^{11}$$

Alternativamente, determina-se a razão entre a iluminância horizontal desobstruída e a luminância do Zênite. Para o céu claro, a ABNT (2005) e a IESNA (2000) adotam tabelas com essas razões a cada 5° de altura solar. Para o céu encoberto, a CIE (1996) e a ABNT (2005) adotam a equação (26):

$$E_{Hoc}(\gamma_s) = \frac{7\pi}{9} L_{Zoc}(\gamma_s) \quad (26)$$

¹¹ A equação (25) é válida para o fator de turbidez entre 2,25 e 3,25.

Onde:

E_{Hoc} Iluminância do céu encoberto no plano horizontal desobstruído [klx];

L_{Zoc} Luminância no Zênite do céu encoberto [kcd/m²];

Como todo modelo é reducionista, o critério de escolha do modelo de céu apropriado para determinada aplicação deveria corresponder ao que mais se aproxima da realidade em estudo. Entretanto, alguns dos modelos apresentam vantagens e desvantagens que merecem ser observadas. Os modelos de céu encoberto não uniforme e de céu claro são os mais aceitos tradicionalmente. As restrições aos modelos de céu parcialmente encoberto e encoberto uniforme devem-se, principalmente, à complexidade do primeiro e simplicidade exagerada do segundo. Quando o céu não está totalmente encoberto, apresenta uma extrema variabilidade que dificulta sua avaliação, pois a distribuição das luminâncias da abóbada está sujeita a mudar rapidamente (IESNA, 2000, cap.8, p.1). Souza rejeita o modelo de céu uniforme “devido à inexistência dessa condição em condições reais” (PEREIRA, 1996 apud SOUZA, 1997, p.22).

A correspondência integral com a realidade não ocorre, logicamente, em nenhum dos modelos mencionados. Se voltarmos a crítica ao grau de precisão do modelo, pode-se utilizar, por exemplo, o artifício de fatores de conversão do céu uniforme em céu encoberto padrão CIE (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975, p.114).

Os tipos de céu devem ser utilizados com critérios que aproximem o modelo escolhido das condições locais reais. Entretanto, a freqüência de ocorrência da distribuição das luminâncias do céu de acordo com os modelos de céu claro e encoberto padronizados pela CIE é consideravelmente pequena.

Assim, houve um esforço de diversos pesquisadores para preencher a lacuna existente entre os modelos de céu claro e encoberto, buscando encontrar um terceiro método que fornecesse um modelo apropriado para todos os tipos de céu, representando as variações que ocorrem na distribuição das luminâncias do céu real.

Em 1994, a CIE já mostrava a tendência de obter diversas configurações para o céu intermediário, entre o céu encoberto e o céu claro, a serem padronizadas. Relacionava os vários céus de referência às condições climáticas, para representar

os céus reais, e propunha que as condições climáticas determinassem a proporção de tempo em que cada céu de referência deveria ser aplicado.

Diversos estudos para o modelo de céu genérico incluindo o céu intermediário foram apresentados, uns baseados em métodos experimentais e outros em métodos teóricos. Alguns desses estudos são listados a seguir (CIE, 1994, p.7-9; IGAWA; NAKAMURA, 2001. p.763):

- Tregenza (1980) tenta obter um modelo matemático para o céu misto (nuvens-azul). Entretanto, não conseguiu completar os dados meteorológicos necessários para o cálculo detalhado, tornando o modelo insuficiente para utilização prática;
- Littefair (1981) propõe um modelo de céu baseado nas medições de luminância do céu elaboradas por Wegner (1975) durante um ano em Berlim;
- Gillette e Kusuda (1983) adotam a simples combinação entre os dois céus padronizados. Atribuem uma média aritmética ponderada entre os dois extremos, céu claro e céu encoberto, baseados na razão entre a iluminância difusa e global no plano horizontal;
- Kittler (1985) admite um céu intermediário de distribuição homogênea, aumentando a turbidez entre o céu claro e encoberto. O fator luminoso de turbidez é determinado em função da constante solar extraterrestre de iluminação e da transmitância luminosa da atmosfera. Esse fator foi definido por Navvab et al.(1984) adequando o fator de turbidez de Linke para iluminação;
- Nakamura; Oki; Hayashi (1985) desenvolveram o conceito de um céu intermediário médio, propondo também uma equação para o cálculo da luminância no Zênite deste modelo de céu;
- Perraudeau (1988) classifica todos os modelos de céu, incluindo os céu claro e encoberto, em cinco categorias.

Uma dificuldade que surgiu com o desenvolvimento e ampliação dos modelos de céu foi sua validação para diversas condições climáticas, pois apenas em algumas regiões da Terra havia medições de luz natural. O Programa Internacional de Medição da Luz Diurna (*IDMP – International Daylight Measurement Programme*) implantado pela CIE em 1991 representou o primeiro passo para a formação de um Atlas mundial de disponibilidade de luz natural. O programa resultou em uma rede

de estações por todo o planeta e, objetivando obter longos períodos de medição, exige no mínimo um ano de atividade de cada membro participante, cujos dados devem ser intercambiados, durante este período, entre os demais membros da rede. Existem três classes de estações IDMP, classificadas de acordo com os equipamentos de medição que as compõem. Em 1998, a rede IDMP era composta de 48 estações para medição de luz diurna e radiação solar e 15 estações de medição das luminâncias da abóbada celeste (IDMP-CIE, 2006).

Importante contribuição no modelo genérico de céu é a expressão matemática que generaliza a fórmula do céu claro padrão CIE, abrangendo desde a distribuição das luminâncias do céu totalmente encoberto até o céu claro, pelo ajuste de cinco coeficientes. Estes coeficientes dependem do índice de limpidez do céu (ε), do índice de brilho do céu (Δ) e do ângulo zenital solar (Z) (PEREZ; SEALS; MICHALSKY, 1993. p.235-45).

Recentemente a CIE (2003) padronizou o céu genérico, definindo 15 tipos de céu entre os modelos de céu claro e encoberto já padronizados, através de uma única equação que é uma generalização da fórmula do céu claro. A fórmula do céu genérico CIE é praticamente a mesma apresentada por Perez; Seals; Michalsky (1993). A fundamentação teórica do modelo está referenciada nos trabalhos de Kittler; Perez; Darula (1997, 1998) e de Tregenza (1999). O modelo de céu genérico mostrou-se adequado para distribuições de luminâncias com variação suave e contínua em toda a abóbada celeste, mas também apresentou boa aproximação para o céu intermediário com características não homogêneas na distribuição das nuvens, próprio de climas marítimos.

Embora o modelo de céu genérico abranja os modelos de céu padronizados anteriormente, a CIE manteve a fórmula tradicional do modelo de céu encoberto, sendo considerado o 16^o tipo de céu, como uma alternativa ao tipo de céu 1, que corresponde ao céu encoberto no modelo de céu genérico.

Exceto para o céu encoberto, a posição do Sol influencia a distribuição das luminâncias em toda a abóbada celeste, mas não é considerada sua contribuição direta em nenhum modelo de céu. Portanto, os métodos de cálculo envolvendo a luz natural analisam separadamente as radiações solares direta e difusa, provenientes respectivamente do Sol e do céu, e a radiação solar global refere-se à soma de ambas.

2.4 CONTROLE ÓPTICO

Diversas maneiras podem ser utilizadas para dosar e controlar a luz, envolvendo um ou mais dos seguintes fenômenos: reflexão, refração, difusão, absorção, polarização, interferência e difração (IESNA, 2000, cap.1, p.16).

Para as aplicações no ambiente construído, importam principalmente os quatro primeiros fenômenos. As propriedades dos materiais influenciam na qualidade e quantidade da propagação da luz, a qual pode ser distribuída, concentrada, desviada ou absorvida, configurando um recurso arquitetônico com implicações no conforto térmico e luminoso do ambiente.

Quanto à distribuição da luz, consideram-se dois extremos ideais no estudo da reflexão: o refletor especular perfeito e o refletor difusor perfeito, entre os quais se inserem os acabamentos das diversas superfícies reais. No refletor especular perfeito, o raio incidente e o raio refletido são simétricos, em relação à normal à superfície pelo ponto de incidência. O ângulo de incidência e o ângulo de reflexão¹² são iguais, e a intensidade do raio refletido é obtida através da seguinte equação:

$$I_e = \rho I \text{ [cd]} \quad (27)$$

Onde:

I_e Intensidade do raio de luz especular refletido;

I Intensidade do raio de luz incidente;

ρ Coeficiente de reflexão da superfície.

No refletor difusor perfeito, a distribuição da luz refletida independe do ângulo de incidência, e os vetores das intensidades de cada raio refletido I_d determinam um círculo, segundo uma função co-senóide. A IL.23 representa as distribuições da luz incluindo os dois extremos ideais (a) e (d). Observa-se que, exceto para o difusor perfeito, o ângulo de incidência θ_i influencia a distribuição da luz; a intensidade I_d aumenta ao se aproximar do ângulo de reflexão θ_r , simétrico ao ângulo de incidência θ_i , deformando a curva de distribuição nos exemplos (b) e (c). Este aspecto ocorre normalmente nas superfícies reais, mesmo aquelas com distribuição difusa, resultando numa maior luminância na direção θ_r .

¹² Os ângulos de incidência e reflexão são os ângulos formados, respectivamente, entre os raios incidente e refletido e a reta normal à superfície pelo ponto de incidência.

Para o refletor difusor perfeito (d), a intensidade também varia conforme o ângulo de reflexão, mas a luminância é constante, pois a área aparente também varia na mesma proporção¹³.

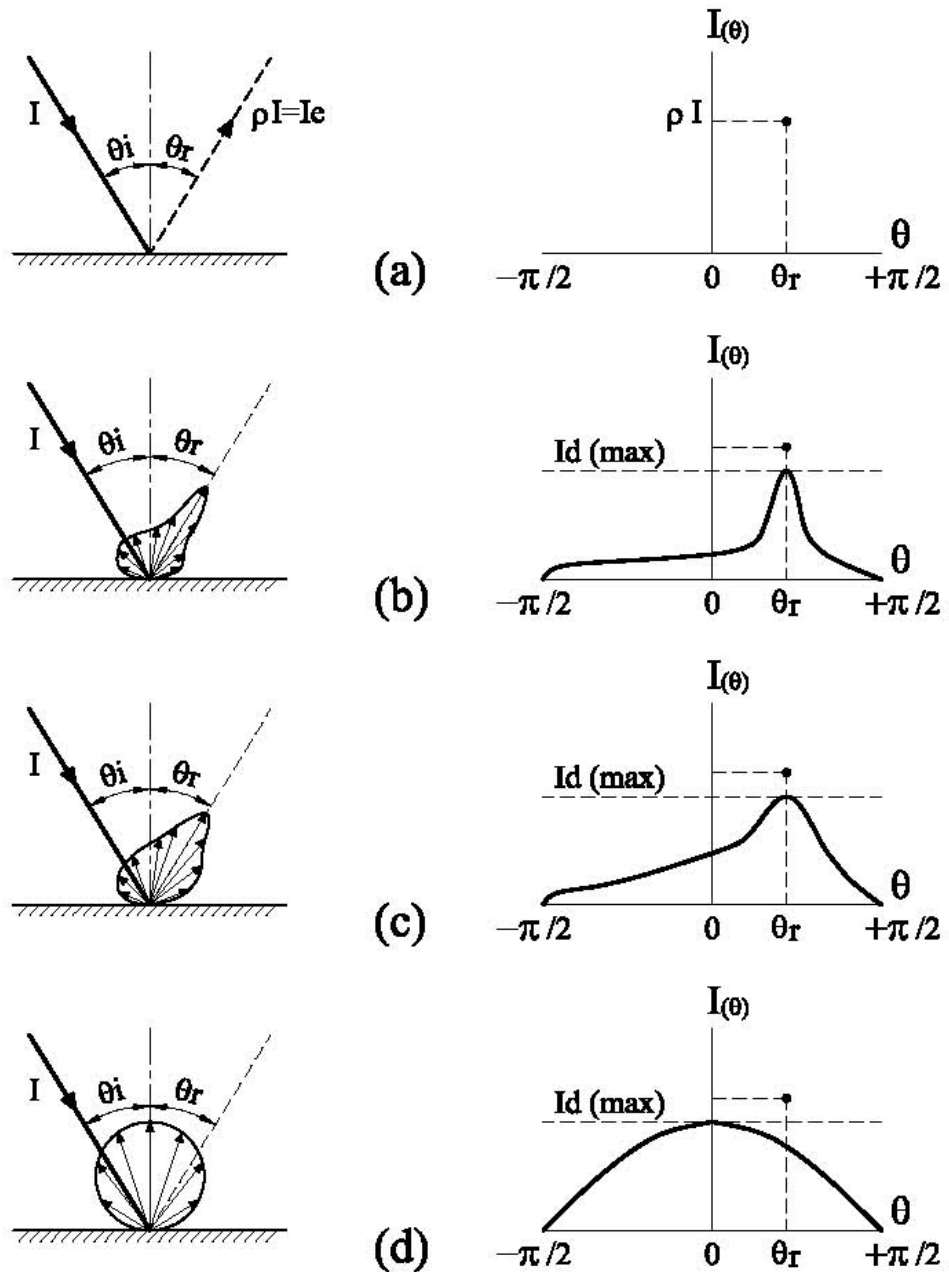


ILUSTRAÇÃO 23 - Distribuição da Luz em Superfícies Opacas
 FONTE - MOON, 1936, p.250, adaptação nossa.

¹³ Ver seção 2.2.1.

A distribuição da luz transmitida através de materiais transparentes (IL.24) tem comportamento similar à luz refletida em superfícies opacas. Os dois extremos ideais também são representados pela distribuição especular (a) e difusa perfeita (d) do raio de luz que atravessa o material e emerge de sua superfície, entre os quais estão os materiais reais (b) e (c).

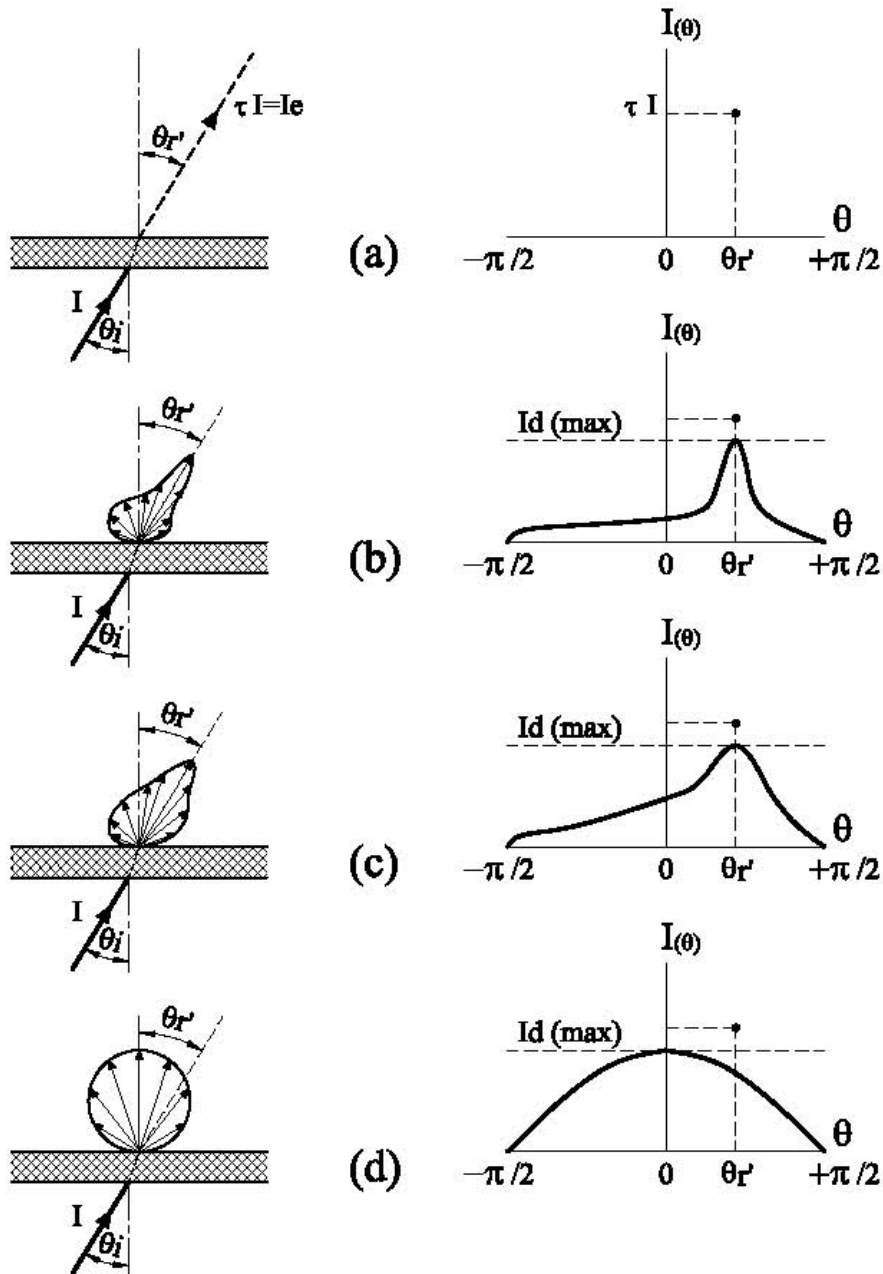
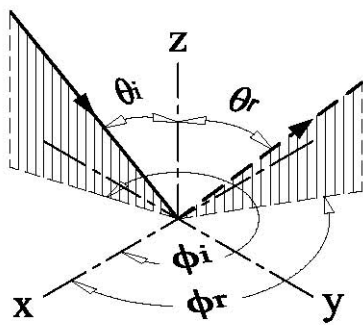


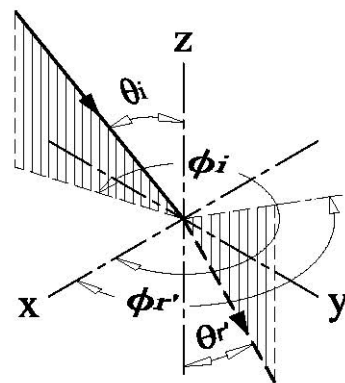
ILUSTRAÇÃO 24 - Distribuição da Luz em Superfícies Transparentes
FONTE - MOON, 1936, p.253, adaptação nossa.

Deve-se observar, nos modelos apresentados, que a distribuição é analisada como se todos os raios pertencessem ao mesmo plano, mas, nas superfícies reais, a luz é distribuída em diversas direções de forma não homogênea. “Há um grau diversificado de comportamentos que misturam um grau de difusão com um grau de especularidade em diferentes níveis (que poderíamos genericamente denominar de comportamento difuso direcional)...” (CLARO, 1998, p.26).

As funções que se aplicam ao comportamento bidirecional da luz (BRDF e BTDF)¹⁴ possibilitam uma análise mais realística de sua distribuição. Tanto em superfícies opacas como transparentes, determinam geometricamente as propriedades de reflexão (a) ou transmissão da luz (b) de um elemento da superfície, em qualquer direção, conforme as coordenadas esféricas da IL.25.



(a) Reflexão: Superfície Opaca



(b) Transmissão: Superfície Transparente

ILUSTRAÇÃO 25 – Distribuição Bidirecional da Luz
FONTE - IESNA, 2000, p. G-4, adaptação nossa.

- θ_i Ângulo de incidência;
- ϕ_i Azimute de incidência;
- θ_r Ângulo de reflexão;
- ϕ_r Azimute de reflexão;
- $\theta_{r'}$ Ângulo de refração do raio transmitido;
- $\phi_{r'}$ Azimute do raio transmitido.

¹⁴ BRDF – Bidirectional Reflectance Distribution Function (Função da Distribuição Bidirecional da Refletância);
 BTDF – Bidirectional Transmittance Distribution Function (Função da Distribuição Bidirecional da Transmitância).

Quando incide em materiais opacos, uma parcela da luz é refletida para o ambiente. Outra parcela dessa energia é absorvida pelo material, da qual uma fração é reemitida para o ambiente em forma de calor. Nos materiais transparentes ocorre o mesmo, mas também existe uma parcela da luz que é transmitida diretamente através do material.

A refração é um fenômeno no qual a direção do raio de luz é alterada ao passar obliquamente por meios de densidades diferentes. Quando um raio passa de um meio menos denso para outro mais denso, a luz é desviada em direção à normal da superfície e, ao passar de um meio mais denso para outro menos denso, afasta-se da normal. Portanto, o raio de luz mantém-se paralelo, ao atravessar uma lâmina transparente como uma placa de vidro, devido às duas refrações: a primeira aproximando e a segunda afastando da normal, na mesma proporção, o raio emergente. Como as faces da lâmina de vidro são paralelas, o ângulo de incidência na primeira face é igual ao ângulo de refração na segunda face.

A lei de Snell relaciona o ângulo de incidência e o ângulo de refração com os índices de refração dos meios, conforme a equação (28):

$$n_1 \text{sen} \theta_i = n_2 \text{sen} \theta_r \quad (28)$$

Onde:

- n_1 Índice de refração do primeiro meio;
- θ_i Ângulo de incidência;
- n_2 Índice de refração do segundo meio;
- θ_r Ângulo de refração.

A refração provoca outro fenômeno importante para o controle óptico: a total reflexão que pode ocorrer em superfícies transparentes. Como o raio de luz se afasta da normal ao emergir de um meio mais denso para um menos denso, existe um ângulo crítico de incidência, na interface dos meios, em que o raio não consegue passar para o meio menos denso.

O ângulo crítico de incidência θ_{ic} ocorre quando o ângulo de refração θ_r é igual a 90° . Aplicando a lei de Snell, o seno do ângulo crítico é n_2/n_1 , sendo n_1 e n_2 respectivamente, os índices de refração dos meios mais denso e menos denso (IL.26).

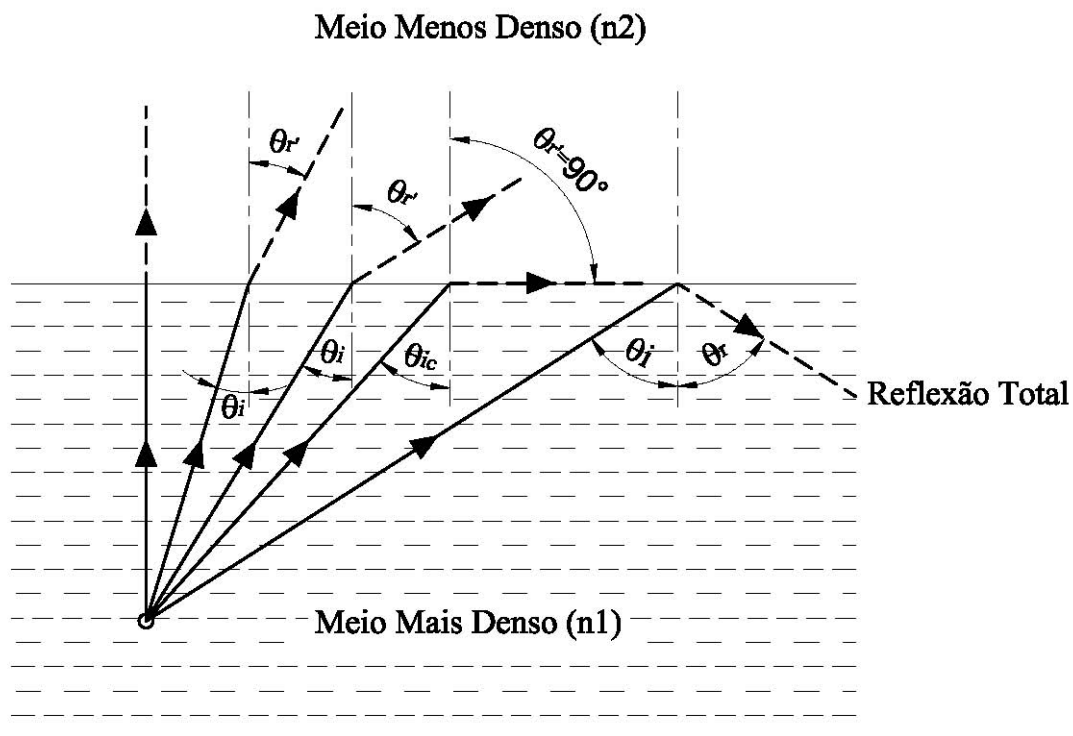


ILUSTRAÇÃO 26 – Reflexão Total da Luz
FONTE - IESNA, 2000, cap. 1, p. 18, adaptação nossa

Em diversos vidros utilizados na construção civil, o índice de refração é 1,5 e o índice de refração do ar é assumido igual a 1¹⁵. A razão 1/1,5 é aproximadamente 0,66. Em tais condições, a reflexão total ocorre para todos os ângulos de incidência superiores a 41°48', cujo seno é 0,66. Devem-se observar as duas refrações do raio de luz que incide em uma lâmina de vidro: a primeira na interface do ar com o vidro e a segunda na interface do vidro com o ar. O ângulo crítico corresponde à segunda incidência na interface do vidro com o ar. Portanto, a reflexão total não ocorre na lâmina de vidro por serem suas faces paralelas, pois o ângulo de incidência na primeira interface deve se aproximar de 90°, ou seja, paralelo à face do vidro, para que o ângulo de incidência na segunda interface se aproxime do ângulo crítico de 41°48'.

A fibra ótica é um exemplo de aplicação da reflexão total da luz entre meios de diferentes densidades, um filamento confeccionado em vidro ou plástico com características ópticas que possibilitam conduzir a luz por seu interior. Um feixe de luz lançado em uma extremidade percorre a fibra através de múltiplas reflexões

¹⁵ O índice de refração 1 corresponde ao vácuo. Esta aproximação é correta até três casas decimais para o ar (IESNA, 2000, cap1, p.19).

sucessivas até alcançar a outra extremidade, e a diferença de densidade entre os meios provoca o fenômeno da reflexão total.

A reflexão e a transmissão da luz em superfícies transparentes dependem do ângulo de incidência e do índice de refração do material. Para ângulos de incidência normais à superfície, pode-se aplicar a relação de Fresnel para obter o coeficiente de reflexão:

$$\rho = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (29)$$

Onde:

ρ Coeficiente de reflexão da superfície.

n_1 e n_2 Índices de refração de dois meios distintos;

Considerando o vidro comum ($n_1 = 1,5$) e o ar ($n_2 = 1$), o coeficiente de reflexão resultante é 4%. Por existirem duas interfaces do vidro com o ar, o coeficiente de reflexão de uma placa de vidro é 8%, resultando num coeficiente de transmissão de 92%.

A equação (29) é uma boa aproximação até um ângulo de incidência de 45° (MOON, 1936, p.254-5), a partir do qual o coeficiente de reflexão aumenta significativamente e, conseqüentemente, o coeficiente de transmissão diminui (IL.27).

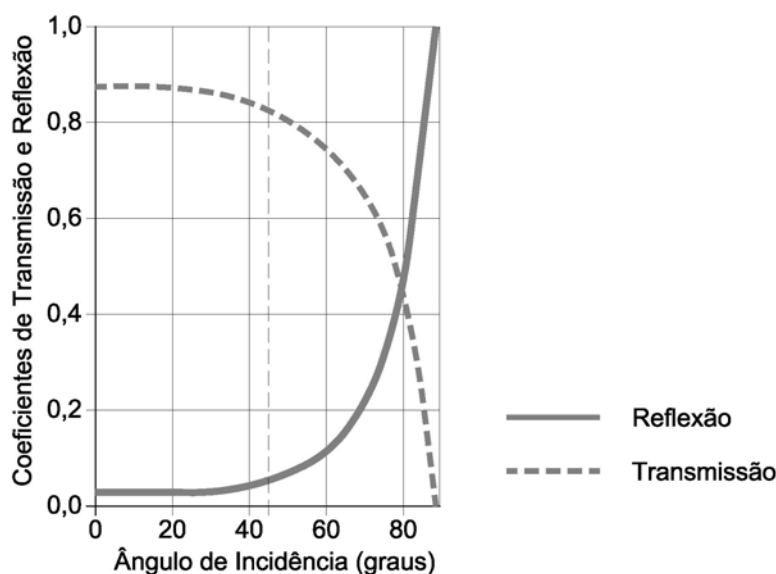


ILUSTRAÇÃO 27 – Ângulo de Incidência X Coeficientes de Reflexão e Transmissão
 FONTE - CARAM, 2002, p.56, adaptação nossa

Capítulo 3: MÉTODOS, FERRAMENTAS DE CÁLCULO E SISTEMAS DE CONTROLE APLICADOS À LUZ NATURAL

Existem três métodos básicos tradicionalmente utilizados para a análise de iluminação natural: Método dos Lumens, Fator de Luz Diurna (FLD) e Método da Transferência de Fluxo. Os métodos podem ser divididos em dois grupos que fornecem os resultados em valores absolutos ou relativos.

O Método dos Lumens determina os resultados em iluminância, portanto, em valores absolutos [lx ou fc], enquanto o Fator de Luz Diurna (FLD) é um método característico de valores relativos, pois se fundamenta, por definição, na razão entre as iluminâncias em uma superfície horizontal exterior e interior, expressa em porcentagem (ROBBINS, 1986, p.172). O Método da Transferência de Fluxo determina os resultados tanto em valores absolutos como relativos, sendo um método mais complexo e também mais abrangente. Envolve um sistema de equações que pode ser adaptado a diversas situações, permitindo estimar aberturas com elementos vazados, persianas e também a contribuição da luz solar direta ou refletida.

Os programas computacionais possuem grande potencial para simulação, alteração e visualização do resultado. Entretanto, necessitam ser validados.

Outra ferramenta tradicionalmente utilizada é o modelo físico em escala reduzida. Devido à correspondência, quanto à iluminação, do modelo com a realidade, é um recurso importante nas fases iniciais do projeto arquitetônico.

Os métodos e ferramentas permitem avaliar o desempenho e necessidade de dispositivos controladores da luz. Este aspecto é discutido na seção 3.6, mostrando algumas soluções clássicas adotadas na arquitetura modernista brasileira e nas obras de Alvar Aalto, e as recentes inovações de materiais e sistemas introduzidos para este fim.

Alvar Aalto e os arquitetos brasileiros, admitidos como uma alternativa ao racionalismo da arquitetura moderna (BRUAND, 1981, p.115; 151; 269-71), têm em comum a preocupação com o tratamento da envoltória. Lidando com problemas opostos, o primeiro pela carência e os segundos pelo excesso de insolação, buscam controlar, armazenar, distribuir ou proteger a edificação da radiação solar com

soluções do âmbito da arquitetura. A função aqui adquire outra dimensão. Não diz respeito apenas à sujeição da forma às condições de produção e uso de uma arte ligada a fins, mas apresenta um adicional relacionado à dinâmica dos elementos naturais e seu impacto no conforto ambiental. Tais aspectos determinaram a escolha de suas obras como exemplo de aplicação.

3.1 MÉTODO DOS LUMENS

Por utilizar equações simples, possibilita avaliar a iluminação interior, mesmo com poucos recursos, podendo ser feito manualmente. É um método semelhante ao método das cavidades zonais utilizado em iluminação artificial. Baseia-se no princípio de que a luz no plano de trabalho é função da luz disponível no plano da abertura. As reflexões internas são uma componente importante e, quando este método foi estabelecido em 1953 (CIE, 1970, p.74), considerou-se que o Fator de Luz do Dia era mais apropriado em grandes ambientes como fábricas, pois as reflexões internas são menos significativas, comparadas à componente celeste nesta condição (ROBINS, 1986, p.158).

A equação básica do método é:

$$E_i = E_x CF C_u \quad [\text{lx}] \quad (30)$$

Onde:

- E_i Iluminância interna;
- E_x Iluminância exterior no plano da abertura;
- CF Coeficiente de fenestração;
- C_u Coeficiente de utilização.

O método é diferenciado para iluminação lateral e zenital, embora consista em quatro procedimentos básicos comuns às duas situações:

- Determinar a iluminância exterior no plano da abertura;
- Determinar o coeficiente de fenestração CF . Este coeficiente representa a transmitância total da abertura, considerando a influência de todos seus elementos;
- Determinar o coeficiente de utilização C_u que é função da geometria do ambiente, da refletância das superfícies internas e, para iluminação lateral, do

ponto considerado e das características da abertura (proporções geométricas e propriedades do elemento transparente);

- Calcular a iluminância pelo produto dos fatores determinados nos procedimentos anteriores.

A maior dificuldade deste método está na determinação da Iluminância exterior no plano da abertura. Devem ser consideradas as obstruções, a influência da luz solar direta e difusa no piso exterior e a parcela de céu visível no plano da abertura. Assim, torna-se necessário recorrer a outras ferramentas de cálculo, como fator de configuração, diagramas e procedimentos gráficos que serão discutidos neste capítulo.

3.1.1 ILUMINAÇÃO ZENITAL

Para o cálculo de iluminação zenital, o coeficiente de fenestração é dividido em três elementos: a razão entre a área total da projeção horizontal das aberturas A_Z e a área do plano de trabalho A_p ; a transmitância dos elementos transparentes τ e o fator de perda de luz FPL , devido à manutenção. Substituindo estes valores na equação básica, tem-se, para iluminação zenital:

$$E_i = E_{xh} \left(\frac{A_Z}{A_p} \right) \tau FPL C_U \quad [lx] \quad (31)$$

Observa-se grande similaridade entre a equação (31) e a equação do método dos lumens utilizada para iluminação artificial, que fornece a iluminância média no plano de trabalho. Se multiplicarmos a iluminância horizontal externa E_{xh} pela área total das aberturas A_Z e a transmitância τ , temos o fluxo total que passa pelas aberturas em lumens Φ , e a equação torna-se idêntica:

$$E_i = \frac{\Phi FPL C_U}{A_p} \quad [lx] \quad (32)$$

3.1.2 ILUMINAÇÃO LATERAL

No método dos lumens para abertura lateral, a iluminância exterior é considerada no plano vertical E_{xv} e, para sua determinação, considera-se a contribuição do céu e do piso exterior no plano da abertura.

A iluminância interior é obtida em pontos tomados em uma linha de referência pertencente ao plano de trabalho e perpendicular ao plano da abertura por seu ponto médio.

A iluminância interior no plano de trabalho E_{pt} , proporcionada pela abertura lateral, é obtida em cada ponto pela equação:

$$E_{pt} = E_{xv} \tau A_{tr} FPL C_u \quad [lx] \quad (33)$$

Onde:

E_{pt} Iluminância pontual no plano de trabalho;

E_{xv} Iluminância exterior total no plano vertical;

τ Transmitância;

A_{tr} Área transparente;

FPL Fator de perda de luz;

C_u Coeficiente de utilização.

Na equação (33), o coeficiente de fenestração corresponde à multiplicação da área transparente A_{tr} pela transmitância τ e pelo fator de perda de luz FPL . A denominação **iluminância pontual** ou **iluminância em um ponto de referência** pode parecer inadequada e a própria equação revela este fato, se observarmos as unidades. O multiplicador A_{tr} resultará E_{pt} em lumens e não em lux. Nota-se, portanto, que a equação fornece o fluxo luminoso que atinge o ponto de referência, e a iluminância é adotada por aproximação como E_{pt} .

O coeficiente de utilização C_u é função das refletâncias das superfícies internas, das características do elemento transparente da abertura e das dimensões do ambiente, sendo fornecido em tabelas para cada ponto no plano de trabalho pertencente à linha de referência. Em Murdoch (1985) e Robbins (1986), são considerados três pontos por recomendação da IESNA (1979), cujos valores estão tabelados para máximo, médio e mínimo, conforme a distância entre o ponto e o plano da abertura. Atualmente a IESNA (2000, cap.8, p.13) adota cinco pontos locados em função da profundidade da sala D , a uma distância do plano da abertura igual a $0,1D$; $0,3D$; $0,5D$; $0,7D$; e $0,9D$.

3.2 MÉTODO DO FATOR DE LUZ DIURNA (FLD)

Este método, recomendado pela CIE (1970) para o tipo de céu encoberto, baseia-se na hipótese que existe uma relação entre as iluminâncias interior E_{hi} e exterior E_{he} em um plano horizontal desobstruído. O Fator de Luz Diurna FLD é, por definição, a razão entre estas iluminâncias, expressa em porcentagem.

$$FLD = \frac{E_{hi}}{E_{he}} 100 \quad [\%] \quad (34)$$

O FLD é resultado da soma de três componentes:

CC Componente celeste;

CRE Componente de reflexão externa;

CRI Componente de reflexão interna.

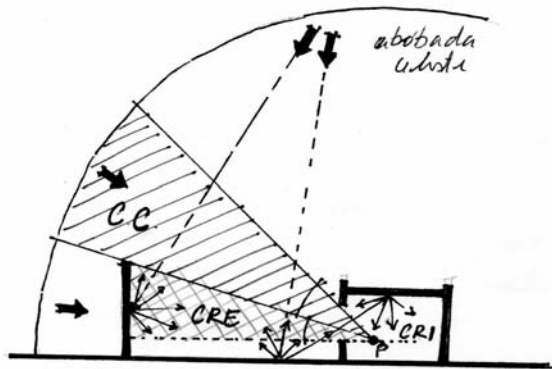


ILUSTRAÇÃO 28 – As Três Componentes do FLD
 FONTE – VIANNA; GONÇALVES, 2001, p. 132

Todas as componentes são expressas em valores percentuais. A sua soma deve ser multiplicada por redutores associados ao caixilho, à manutenção e à transmitância dos vidros:

FPL Fator de perda de luz devido a manutenção e limpeza;

kc Coeficiente do caixilho (proporção de áreas transparentes);

τ Transmitância.

Tem-se, então, a seguinte equação:

$$FLD = (CC + CRE + CRI) \tau FPL kc \quad [\%] \quad (35)$$

O **FLD** é obtido ponto a ponto no plano de trabalho. A componente celeste **CC** corresponde à parcela de céu vista por cada ponto e, portanto, devem ser descontadas as obstruções. Baseia-se no Princípio do Ângulo Sólido Projetado ou conceito do Hemisfério Unitário, que estão discutidos na seção 3.3.1.

Embora existam métodos analíticos para obtenção da componente celeste, as equações são deduzidas igualmente no método dos fluxos, que será analisado adiante.

Normalmente, utilizam-se métodos gráficos compostos de diagramas com sistemas de projeção específicos para facilitar a leitura. Há, também, o emprego de tabelas e gráficos, como as tabelas BRE elaboradas a partir dos diagramas de Waldram (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975, p.144).

Dentre os métodos gráficos podem-se destacar:

- Diagramas de área igual de WALDRAM;
- Diagramas de pontos PLEIJEL e MOORE;
- DCLR – Diagramas de Contribuição Relativa de Luz ABNT;
- Transferidores de iluminação natural BRE.

Os métodos Waldram, Pleijel, Moore e ABNT utilizam procedimentos semelhantes, através do traçado de máscaras. Os diagramas possuem um reticulado de referência para linhas horizontais e verticais. As aberturas são representadas tendo por base ângulos horizontais e verticais do reticulado, com a possibilidade de incluir as obstruções exteriores. A componente celeste é obtida em função da parcela de céu representada no diagrama.

Os transferidores de iluminação natural BRE também permitem avaliar a componente celeste, considerando a influência das obstruções, mas por um procedimento peculiar que não adota o traçado de máscaras.

3.2.1 COMPONENTE CELESTE (CC): MÉTODO DE WALDRAM

Um dos métodos mais antigos é o proposto por Waldram (ROBBINS, 1986, p.186). O diagrama é construído por projeção cilíndrica e representa metade do hemisfério celeste, portanto, a componente celeste máxima é 50%. Para facilitar a leitura, é conveniente construir o reticulado do diagrama em múltiplos de 50 unidades de área. Desta forma, um diagrama com 500 unidades de área total corresponde a 50% do hemisfério celeste e cada módulo representa 0.1% (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975. p.203). Embora este método se aplique a aberturas em planos verticais, pode ser adaptado a aberturas zenitais por justaposição simétrica de dois diagramas.

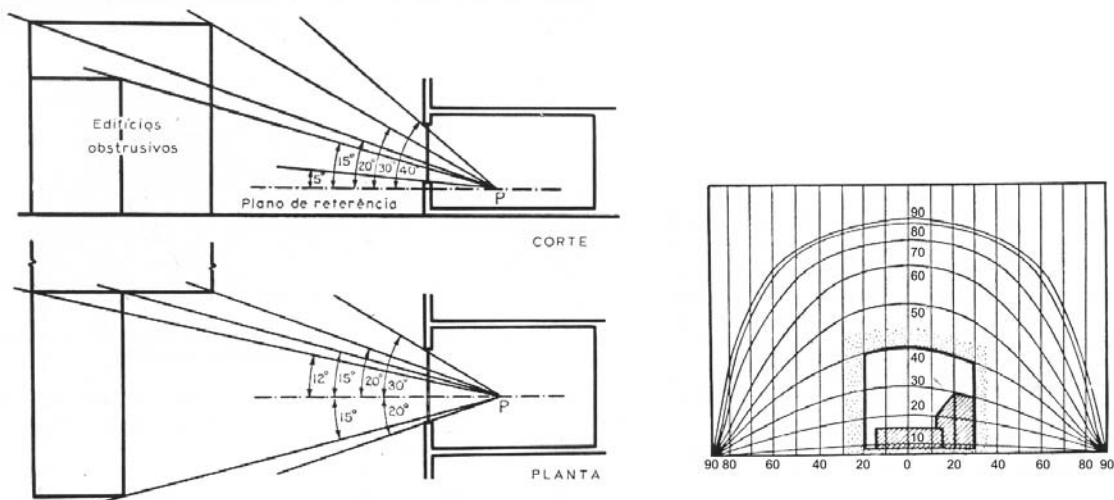


ILUSTRAÇÃO 29 – Aplicação do Diagrama de Waldram para Abertura Lateral
FONTE – HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975, p. 224

3.2.2 COMPONENTE CELESTE (CC): DIAGRAMAS DE PONTOS PLEIJEL E MOORE

Os diagramas de pontos para representar as luminâncias da abóbada celeste têm sido propostos por diversos autores. Embora adotem sistemas de projeção diferentes, os diagramas de Pleijel e Moore são similares. Utilizam um transferidor auxiliar para o traçado das linhas que irão compor o recorte das aberturas e obstruções (traçado de máscaras), de forma semelhante ao método de Waldram. O desenho resultante é sobreposto a diagramas de pontos para obtenção da componente celeste, e cada ponto dos diagramas, em ambos os métodos, corresponde aproximadamente à componente celeste de 0,1% (IL.30).

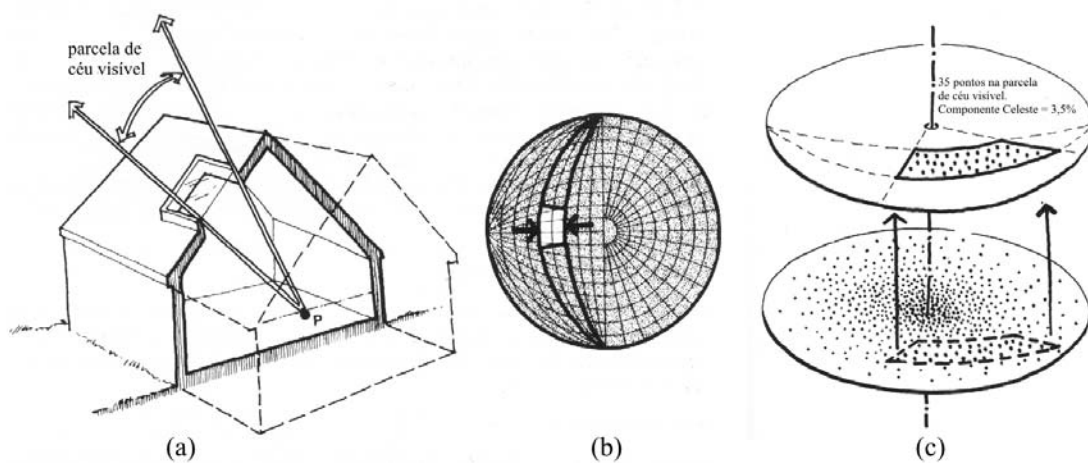


ILUSTRAÇÃO 30 – Método de Pleijel e Moore
(a) parcela de céu visível; (b) traçado de máscaras; (c) obtenção da componente celeste
FONTE – MOORE, 1991, p. 195, tradução nossa

Moore (1991) desenvolveu diagramas para o céu encoberto CIE e para o céu claro com diversas altitudes solares (15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90°), utilizando a projeção eqüidistante.

Os diagramas de Pleijel (1954) representam o céu encoberto CIE, aplicando a projeção estereográfica. A preferência por este sistema de projeção deve-se, principalmente, à facilidade em representar a trajetória aparente do Sol, sendo o sistema mais utilizado para este fim.

O método de Pleijel estima não apenas a iluminação, mas a radiação proveniente do céu e do Sol. Através do Método das Componentes, que consiste na utilização do sistema de coordenadas ortogonais X , Y e Z , representa-se qualquer vetor no espaço. As coordenadas X e Y determinam um plano horizontal, com a coordenada Z ortogonal a este plano. Para avaliar a contribuição do céu, a radiação proveniente de um elemento da abóbada, em direção a um ponto P pertencente ao plano horizontal, é admitida como um vetor que é dividido nas três componentes X , Y e Z . A origem do sistema de coordenadas é posicionada em P , e o cálculo é simplificado rotacionando o sistema de coordenadas em torno do eixo Z , até que a projeção horizontal do vetor coincida com o eixo Y positivo, eliminando a componente X . Assim, as componentes Z e Y tornam-se suficientes para determinar o vetor, e são calculadas através de dois diagramas (IL.31).

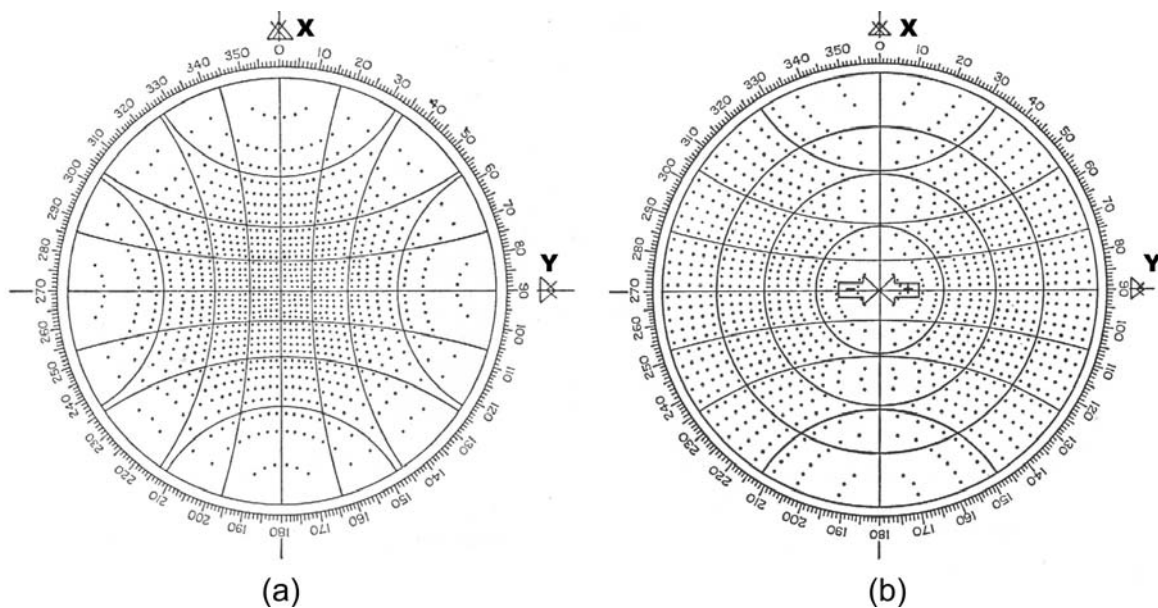


ILUSTRAÇÃO 31 – Diagramas de Pleijel: (a) Componente Z; (b) Componente Y
FONTE – PLEIJEL, 1954, p.123;125

Para aplicação em iluminação natural, este método fornece o cálculo da iluminância no plano da abertura, cujo centro é o ponto P , origem do sistema de coordenadas. O vetor é considerado normal a este plano pelo ponto P , do lado externo, com sentido do céu para a abertura. Se o plano da abertura for horizontal ou vertical, utiliza-se apenas um diagrama, pois o vetor equivale a uma componente, ou seja, componente Z para aberturas horizontais (IL.31a) e componente Y para aberturas verticais (IL.31b). Entretanto, quando o plano da abertura é inclinado, utilizam-se os dois diagramas, devendo-se observar o sinal indicado no diagrama para obtenção do vetor Y . Nesse caso, com a normal da abertura, do lado exterior, orientada para o eixo Y positivo, haverá uma região no traçado de máscaras que avança na área do diagrama onde o sinal Y é negativo. No cômputo do vetor Y , os pontos nesta área deverão ser subtraídos do total de pontos inseridos na região positiva. A Componente Celeste perpendicular à abertura é então obtida pela soma dos vetores em Y e Z multiplicados, respectivamente, pelo co-seno e seno do ângulo de inclinação da normal. A iluminância no plano considerado, devido à parcela de céu visível pelo ponto P , é o produto da Componente Celeste pela iluminância do céu no plano horizontal desobstruído.

Originalmente, o método proposto por Pleijel aplica-se ao plano da abertura, e não ao plano de trabalho. Entretanto, é correto utilizar estes diagramas para determinar a Componente Celeste no espaço interior, mas devem-se tomar alguns cuidados:

- O diagrama vetor Z (IL.31a) pode ser aplicado internamente ou externamente ao edifício. Para iluminação zenital, este diagrama aplicado externamente no nível da superfície iluminante da abertura permite estimar o fluxo luminoso que penetra no recinto até atingir o plano de trabalho;
- A menos que o plano de trabalho seja vertical, o diagrama vetor Y (IL.31b) só se aplica externamente. Obtém-se assim, a iluminância exterior no plano vertical da abertura que, multiplicada por sua área, fornece o fluxo luminoso que penetra no recinto.
- No espaço interior, a orientação da normal do plano de trabalho é que determina o diagrama apropriado. Se o plano de trabalho for horizontal, tanto para aberturas zenitais como para aberturas laterais, deve-se aplicar o diagrama vetor Z . Da mesma forma, para o plano de trabalho vertical, aplica-se sempre o diagrama vetor Y , qualquer que seja a orientação da abertura.

Podem-se também utilizar os diagramas em combinação com o Método dos Lumens. Chichierchio (1970) aplicou os diagramas de Pleijel para o cálculo da iluminância exterior no plano das aberturas, obtendo a iluminância útil média no plano de trabalho por procedimento similar ao Método dos Lumens (IESNA, 2000).

As cartas solares no sistema de projeção estereográfica ou eqüidistante podem ser utilizadas para avaliar a penetração do Sol pelas aberturas, recurso utilizado para dimensionar dispositivos de proteção. A IL.32 mostra uma mesma abertura com duas orientações, contendo um brise horizontal infinito com ângulo vertical de 40° . Para a latitude 24°S , na orientação 60° SE (a) observa-se a penetração solar do nascente até as 8:00h durante todo o ano. Já na orientação Norte (b), a penetração ocorre no início da manhã e final da tarde, aumentando gradativamente sua duração, ao se aproximar do solstício de inverno.

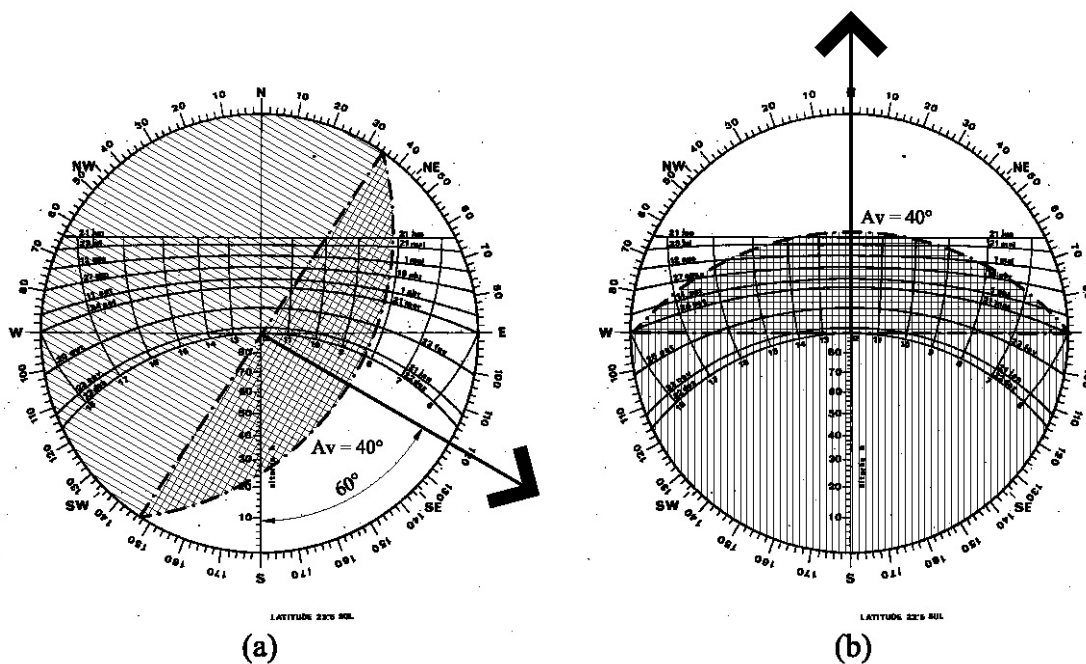


ILUSTRAÇÃO 32 - Traçado de Máscaras de Brise Horizontal: Ângulo Vertical $A_v = 40^\circ$
(a) Orientação 45°SE ; (b) Orientação N . (Latitude $23^\circ 30' \text{S}$)

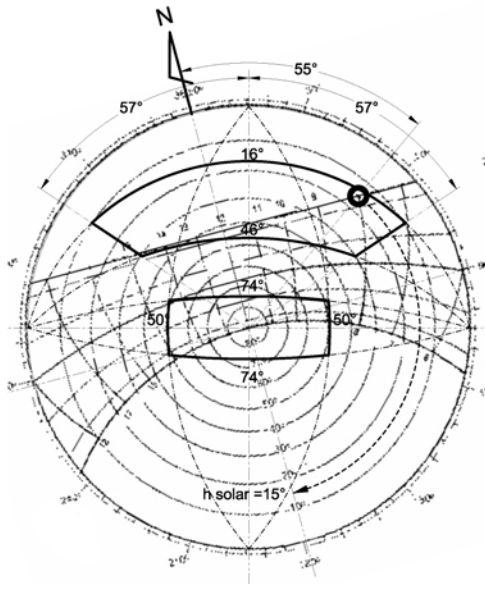
O método de Waldram também admite a análise da trajetória solar aparente, mas para altas latitudes, pois se mostra impreciso quando o Sol está próximo do Zênite.

3.2.3 COMPONENTE CELESTE (CC): MÉTODO ABNT

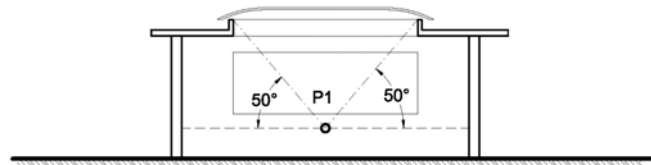
Segundo as recomendações da NBR 15215-3 (ABNT, 2005), o traçado de máscaras é idêntico ao Método de Pleijel, utilizando o sistema de projeção estereográfica. Já os Diagramas de Contribuição Relativa de Luz (DCRL) assemelham-se aos diagramas de Moore, contemplando o céu claro para as mesmas altitudes solares (15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90°) e o céu encoberto. Desta forma, o método possibilita estimar, para céu claro, a componente celeste em diversos horários, que passa a ser variável no ponto considerado, pois as luminâncias da parcela de céu visível pelo ponto variam em função da posição solar. Ao invés de pontos, os diagramas contêm valores numéricos, e cada 100 unidades correspondem a 1% do hemisfério celeste.

A IL.33a representa o traçado de máscaras das obstruções e a posição solar, no solstício de inverno, às 8:00h na latitude 24°S , para o ponto *PI* do projeto exemplo (IL.33c). A altura solar neste exemplo é aproximadamente 15° . Com a sobreposição do traçado de máscaras sobre o DCRL 15° (IL.33b), obtém-se a componente celeste para as condições de céu claro no ponto considerado, somando-se os valores numéricos dentro da região da abertura. As subdivisões do diagrama que não estiverem totalmente dentro desta região devem ser consideradas proporcionalmente.

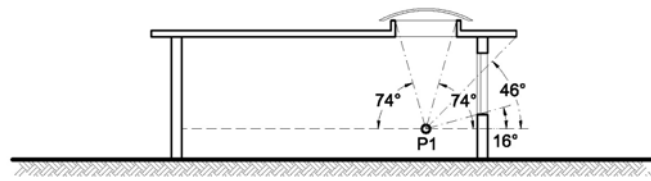
Neste procedimento é fundamental a correta orientação da abertura em relação ao Sol, pois toda a distribuição das luminâncias na abóbada celeste sofre sua influência.



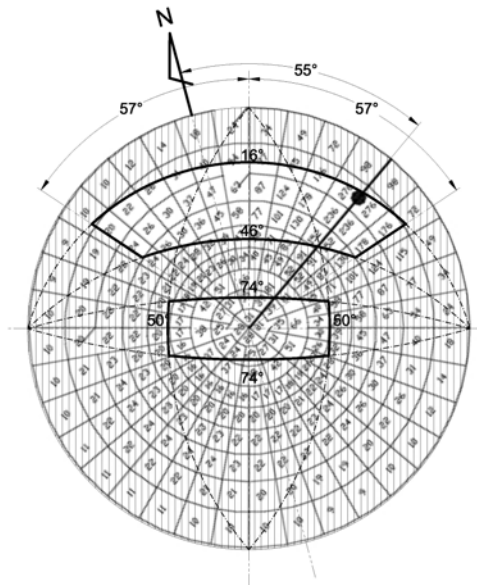
(a)



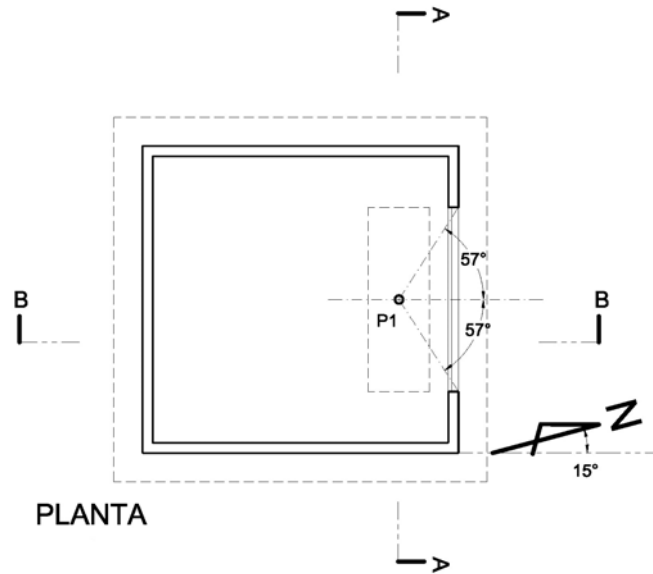
CORTE AA



CORTE BB



(b)



PLANTA

(c)

ILUSTRAÇÃO 33 – Método ABNT: Determinação da Componente Celeste

3.2.4 COMPONENTE CELESTE (CC): MÉTODO BRE

Existem dois grupos de transferidores BRE, um para céu uniforme e outro para céu encoberto CIE. Cada grupo é composto de 5 pares para utilização conforme as seguintes características da abertura:

- Aberturas envidraçadas verticais;
- Aberturas envidraçadas horizontais;
- Aberturas envidraçadas com inclinação de 30° ;
- Aberturas envidraçadas com inclinação de 60° ;
- Aberturas não envidraçadas com qualquer inclinação.

Cada par contém um Transferidor Primário **A** e um Auxiliar **B**. O Transferidor **A** fornece a componente celeste para uma abertura de largura infinita e o Transferidor **B** faz a correção do valor para as reais dimensões laterais da abertura.

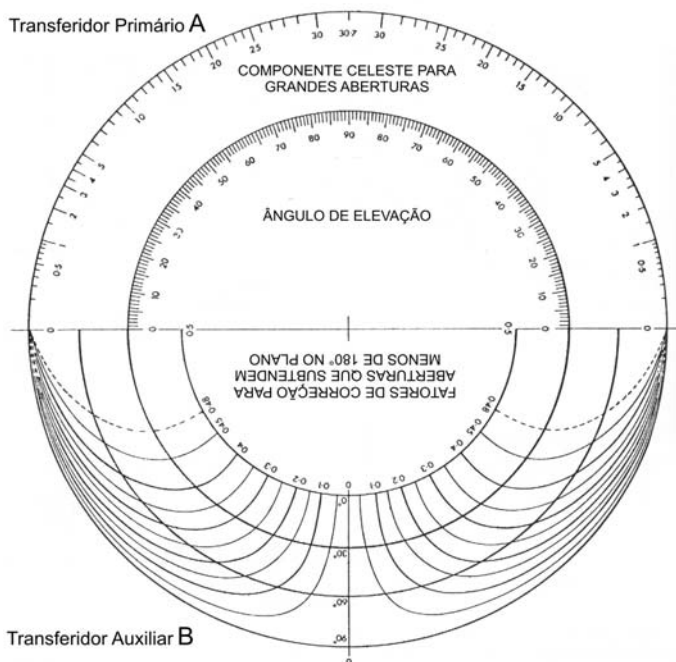


ILUSTRAÇÃO 34 – Método BRE: Transferidor para Abertura Vertical (Céu Encoberto)
FONTE - MOORE, 1991, p.260, tradução nossa

O método consiste nos seguintes procedimentos:

1. Definir as linhas de visão do ponto de referência pelos limites da abertura em planta e corte;
2. Em corte, posicionar o Transferidor **A** com centro no ponto de referência. Fazer a leitura das linhas de visão superior V_s e inferior V_i na escala externa do transferidor. Fazer a leitura do ângulo de elevação do ponto médio V_m na escala interna do transferidor;
3. Em planta, posicionar o Transferidor **B** com centro no ponto de referência. Marcar visualmente o círculo correspondente ao ângulo V_m . Fazer a leitura das interseções entre as linhas de visão laterais L_d L_e e o ângulo V_m nas linhas que conduzem à escala interna do transferidor;
4. Determinar a Componente Celeste Inicial CCi pela equação: $CCi = V_s - V_i$. Este valor corresponde a uma abertura de largura infinita;
5. Determinar o fator de correção Fc . Se os pontos de interseção que determinaram L_d e L_e pertencerem ao mesmo lado em relação à linha central do transferidor, o fator será a subtração, e se pertencerem a lados opostos, será a soma de L_d e L_e .
6. Determinar a Componente Celeste CC pela equação: $CC = CCi \times Fc$

A IL.35 é um exemplo da aplicação desses procedimentos. A Componente Celeste Inicial CCi no ponto P corresponde a 3,2%, resultado da subtração $3,5 - 0,3$, cujos valores foram obtidos pelas leituras de V_s e V_i no Transferidor Primário **A**

Através do Transferidor Auxiliar **B**, para o ângulo V_m igual a $19,5^\circ$ tem-se um fator de correção $Fc = 0,45$ referente à soma dos fatores $0,15$ e $0,30$ para L_d e L_e respectivamente. Portanto, a Componente Celeste CC em P será $3,2\% \times 0,45 = 1,44\%$.

Para situações em que as obstruções ou as aberturas assumem formas mais complexas, o Método BRE apresenta desvantagens, quando comparado aos de Waldram, Pleijel, Moore e da ABNT, pois diferentemente desses, é difícil visualizar o que ocorre no ponto de estudo. A avaliação da influência da posição e dimensões da abertura na iluminação do ambiente também é prejudicada. Uma alternativa é a

utilização do diagrama *pepper-pot*.¹⁶ Esta técnica consiste na construção de uma perspectiva interior da abertura à qual se sobrepõe o diagrama, permitindo visualizar o cenário a partir do ponto de interesse e avaliar as conseqüências advindas do posicionamento, forma e dimensões da abertura de maneira similar aos demais métodos.

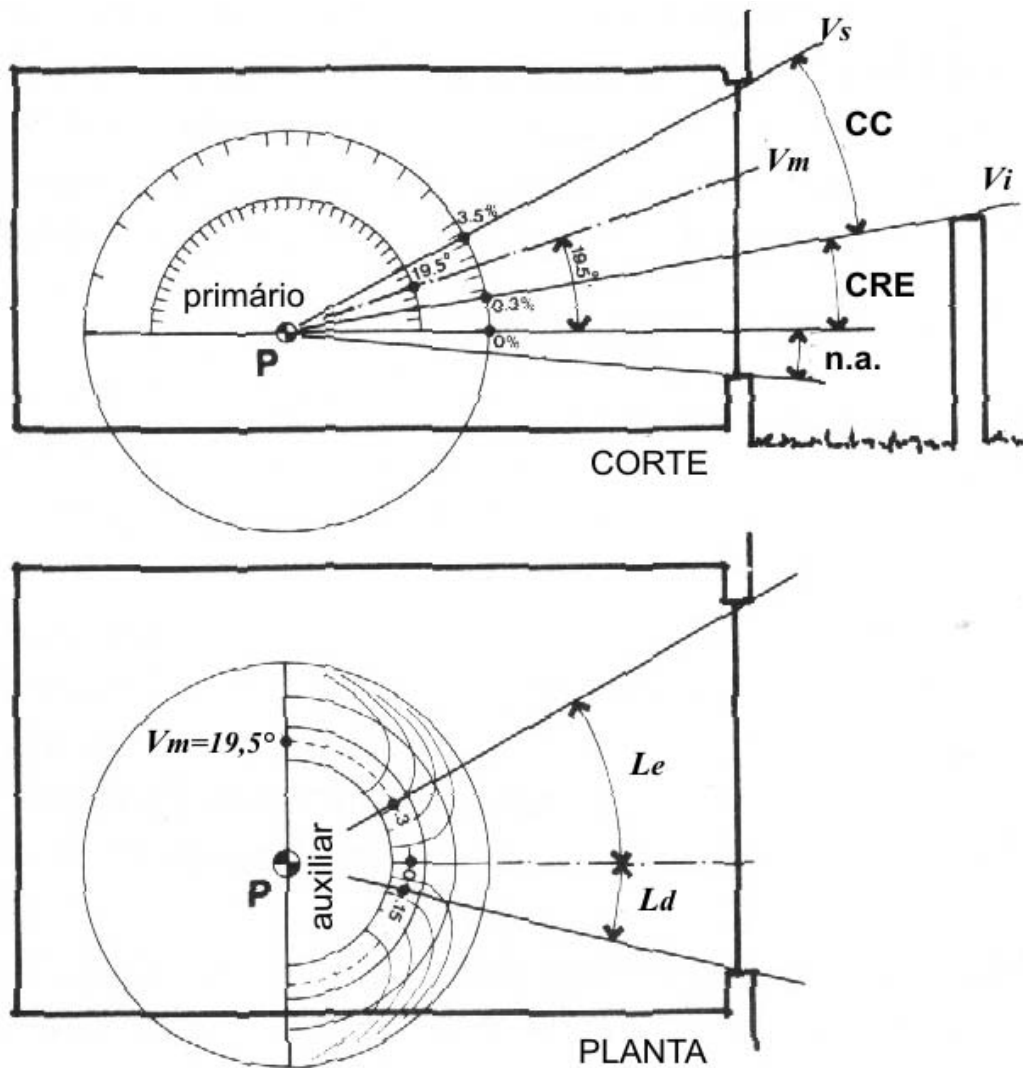


ILUSTRAÇÃO 35 – Método BRE: Exemplo de Aplicação para Abertura Vertical
 FONTE - MOORE, 1991, p.260, adaptação nossa

Por procedimento semelhante ao utilizado na determinação da Componente Celeste CC , todos os métodos também permitem avaliar a influência das obstruções para cálculo da Componente de Reflexão Externa CRE . No corte da IL.35 observa-

¹⁶ O diagrama *pepper-pot* é um diagrama de pontos similar aos propostos por Moore e Pleijel, mas com um sistema de projeção que se ajusta a uma vista em perspectiva da abertura (LYNES, 1968, p.144-55).

se um ângulo entre a linha horizontal e a linha de visão inferior V_i correspondente a CRE e um ângulo abaixo da linha horizontal onde está indicado *n.a.* (não avaliado).

3.2.5 COMPONENTE DE REFLEXÃO EXTERNA – CRE

Se não houver obstruções no ângulo de visão do ponto de referência, não haverá Componente de Reflexão Externa. (KOENIGSBERGER et al. 1977. p.166). Esta observação mostra uma diferença em conceito entre o Método dos Lumens e o Método do Fator de Luz Diurna quanto à contribuição luminosa dos elementos abaixo do ponto de interesse, incluindo o piso exterior. No primeiro, ela é analisada em detalhes, enquanto que, no segundo, só é considerada a Componente de Reflexão Externa da obstrução visível no ponto de referência. De fato, essa contribuição está inserida no cálculo da Componente de Reflexão Interna, tratada na próxima seção.

Utiliza-se inicialmente o mesmo procedimento adotado para a Componente Celeste. A área da obstrução é tomada como uma parcela de céu, definida como componente de obstrução C_{ob} e determinada por qualquer um dos métodos descritos anteriormente. Sua luminância é admitida como uma fração F_{ob} da luminância do céu. Quando esta fração não é conhecida, adota-se para céu uniforme $F_{ob} = 0,1$ e, para céu encoberto CIE, os fatores $F_{ob} = 0,1$, se for considerada a luminância média de todo o céu, ou $F_{ob} = 0,2$, se for considerada apenas a luminância próxima ao horizonte (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975. p.96). Portanto, nos ambientes em que predominam aberturas laterais com obstruções baixas, deve-se aplicar o fator $F_{ob} = 0,2$ enquanto que, para aberturas zenitais ou quando as obstruções ocupam regiões elevadas da abóbada celeste, recomenda-se o fator $F_{ob} = 0,1$.

A componente de reflexão externa CRE é obtida, em porcentagem, pela multiplicação da componente de obstrução C_{ob} e o fator F_{ob} :

$$CRE = C_{ob} F_{ob} \quad [\%] \quad (36)$$

Quando existe um conjunto de obstruções exteriores configurando certa complexidade em sua determinação, pode-se utilizar o artifício da **linha de obstrução equivalente**, adotando um alinhamento médio das alturas.

A NBR 15215-2 (ABNT, 2005) adota duas possibilidades para CRE. Se a obstrução não é iluminada pelo Sol direto, o cálculo é semelhante aos demais métodos citados, mas recomenda, para o fator F_{ob} , o coeficiente de reflexão da superfície externa da obstrução. Quando a superfície da obstrução é iluminada diretamente pelo Sol, a contribuição é calculada em valor absoluto (CRE_{abs}), cujo resultado é obtido em iluminância, não em valor percentual, e deverá ser somado no cômputo final do cálculo.

3.2.6 COMPONENTE DE REFLEXÃO INTERNA – CRI

O cálculo desta componente, como resultado das reflexões múltiplas entre as superfícies, é complexo. Com o auxílio do computador, pode ser adotado tal procedimento, mas, para aplicação prática sem tal recurso, é necessário simplificar o cálculo.

Pelo **princípio do fluxo dividido BRE**, distinguem-se duas porções do fluxo luminoso que penetra no ambiente por uma abertura lateral: a primeira proveniente do céu e das obstruções do céu acima da meia altura da abertura; a segunda vinda do solo e das construções abaixo da meia altura da abertura.

A equação de inter-reflexão BRE é a seguinte (ROBINS, 1986, p.176):

$$CRI = \frac{(T_g)(A_g)}{A(1-\rho)}(C_1\rho_i + C_2\rho_s) \quad [\%] \quad (37)$$

Onde:

CRI Componente de reflexão interna;

T_g Transmitância difusa do vidro;

A_g Área de vidro da abertura (descontando partes opacas do caixilho);

A Área total das superfícies interiores;

ρ Coeficiente de reflexão médio de todas as superfícies interiores;

ρ_s Coeficiente de reflexão médio das superfícies superiores do ambiente (acima da meia altura da abertura);

ρ_i Coeficiente de reflexão médio das superfícies inferiores do ambiente (abaixo da meia altura da abertura);

C_1 Coeficiente da parcela superior do fluxo exterior;

C_2 Coeficiente da parcela inferior do fluxo exterior;

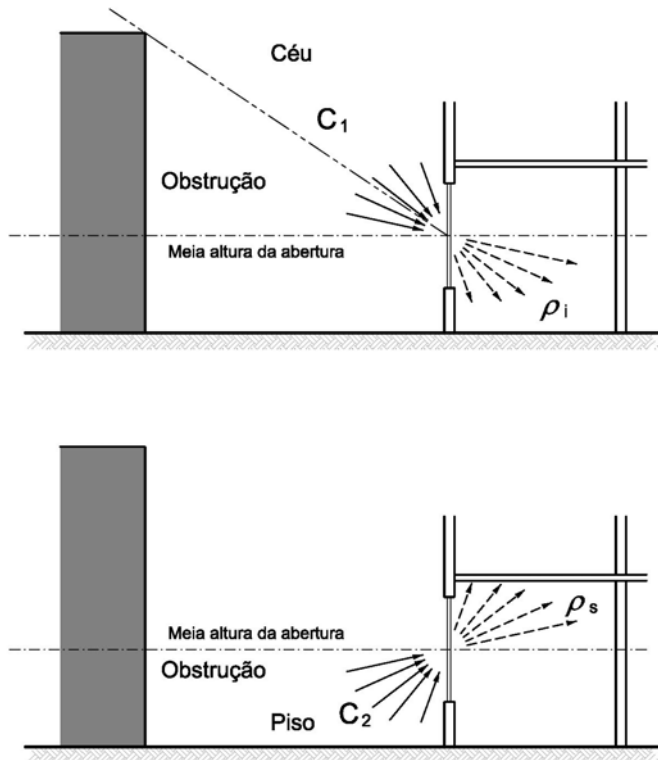


ILUSTRAÇÃO 36 – Princípio do Fluxo Dividido

FONTE - (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975, p.11, adaptação nossa)

O coeficiente C_1 é fornecido pela TAB.2 em função do ângulo de obstrução tomado acima da linha média da abertura.

TABELA 2 – Coeficiente C_1 em Função do Ângulo de Obstrução

Ângulo de Obstrução (graus)	C_1
sem obstrução	39
10	35
20	31
30	25
40	20
50	14
60	10
70	7
80	5

FONTE - ROBINS, 1986, p.176

O coeficiente C_2 é obtido em função da razão entre a luminância média das superfícies externas, abaixo da linha central da abertura, e a luminância média do céu, conforme segue:

$$C_2 = \frac{L_{ei}}{L_c} \times 0,5 \times 100 \quad (38)$$

Onde:

L_{ei} Luminância média das superfícies exteriores abaixo da meia altura da abertura;

L_c Luminância média do céu;

Na equação (37) o resultado é em porcentagem, por isso a multiplicação por 100 na equação (38), e o valor 0,5 corresponde ao fator de configuração¹⁷.

Admitindo-se $T_g = 0,85$ e $TL_{ei}/L_c = 0,1$ tem-se $C_2 = 5$. Substituindo-se estes valores na equação 37 resulta:

$$CRI = \frac{0,85 A_g}{A(1 - \rho)} (C_1 \rho_i + 5 \rho_s) \quad [\%] \quad (39)$$

Se além disso fixarmos os valores dos coeficiente de reflexão para a porção do ambiente superior ($\rho_s=70\%$) e inferior ($\rho_i=15\%$), o cálculo é simplificado, diminuindo a quantidade de variáveis. Desta maneira foram construídos os ábacos de luz refletida BRE (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975. p.103-4; 287), que diferem para iluminação lateral e zenital. As variáveis a serem consideradas para iluminação lateral são: coeficiente de reflexão médio das superfícies, área da abertura, área total das superfícies internas do ambiente e ângulo da obstrução.

Considera-se, inicialmente, a abertura sem obstrução, utilizando as escalas **A**, **B** e **C** da IL.37. Determina-se a razão entre a área da abertura e a área total das superfícies internas¹⁸ na escala **A**. O coeficiente de reflexão médio das superfícies é assinalado na escala **B**. Interligam-se os valores encontrados e faz-se a leitura na interseção desta linha com a escala **C**. Este é o valor de **CRI** para uma abertura vertical sem obstrução. O ângulo da obstrução, medido a meia-altura da abertura, deve ser assinalado na escala **D** e interligado com a leitura feita previamente, para **CRI** sem obstrução, na escala **C**. O prolongamento desta linha, ao atingir a escala **E**, dará o valor de **CRI** com obstrução.

¹⁷ Ver seção 3.3.1.

¹⁸ A área da abertura deve descontar a área ocupada pelos elementos opacos do caixilho. A área total das superfícies internas abrange o piso, o teto e todas as paredes, incluindo a área da abertura.

Como exemplo, será calculado o *CRI* para uma sala retangular – 7,00 m de comprimento; 4,00 m de largura; 3,00 m de pé-direito – tendo em um dos lados maiores uma janela – 5,00 m de largura; 1,20 m de altura; 0,80 m de peitoril. A porção opaca do caixilho ocupa 15% da abertura (85% de vidro), e o coeficiente de reflexão médio das superfícies é 0,40. Adotando 18° como o ângulo da linha de obstrução equivalente, tem-se:

- Área vão livre (vidro)

$$A_v = 5,00 \times 1,20 \times 0,85 \qquad \qquad \qquad 5,10 \text{ m}$$
- Área total (6 superfícies)

$$A_t = (7,00 \times 4,00 \times 2) + (7,00 \times 3,00 \times 2) + (4,00 \times 3,00 \times 2) \qquad \qquad 122,00 \text{ m}$$
- Área vão livre / área total (6 superfícies)

$$A_v / A_t = 5,10 / 122,00 \qquad \qquad \qquad 0,0418$$
- Coeficiente de Reflexão Médio 40%
- Ângulo de Obstrução 18°

Interligando os valores 0,0418 na escala A e 40% na escala B, obtém-se 0,74% na escala C (linha tracejada). Este é o valor de *CRI* para a abertura sem obstrução. Assinalando o ângulo de obstrução 18° na escala D e prolongando o alinhamento determinado por este valor e o valor previamente encontrado na escala C (0,74%) até a escala E, obtém-se o valor 0,63% de *CRI* para a abertura com obstrução (linha contínua).

O procedimento para iluminação zenital é semelhante. A principal diferença está na determinação do fator *k* de obstrução, fornecido por tabelas que consideram a inclinação da abertura e o ângulo de obstrução frontal e oposto à abertura (HOPKINSON; PETHERBRIDGE; LONGMORE, 1975. p.294).

Assim como para as demais componentes, os valores obtidos são em porcentagem da iluminância total do céu no plano horizontal desobstruído.

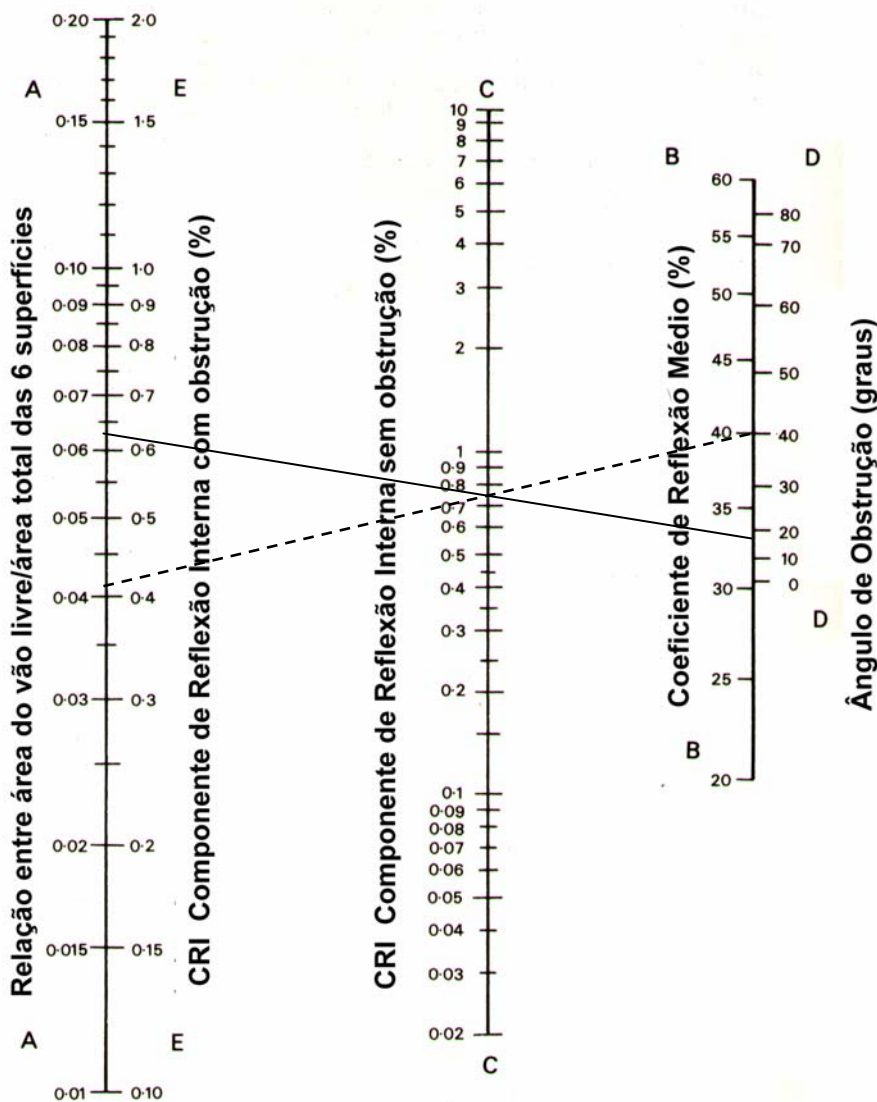


ILUSTRAÇÃO 37 – Ábaco BRE: CRI para Aberturas Verticais
FONTE - ROBINS, 1986, p.198, adaptação nossa

O Fator de Luz Diurna é obtido pela soma das três componentes multiplicada pelos coeficientes redutores conforme a equação (35) já apresentada.

A ABNT não adota os ábacos BRE, mas um método gráfico semelhante ao utilizado para a Componente Celeste (CC) e para a Componente de Reflexão Externa (CRE). As superfícies internas são representadas em projeção estereográfica e sobrepostas a um diagrama específico. Os fatores encontrados no diagrama, para cada superfície interna, são transformados em valores percentuais e multiplicados pelos respectivos coeficientes de reflexão, cujo somatório é multiplicado por (CC + CRE) e por um fator empírico de correção, determinado em função do afastamento entre o ponto em estudo e a abertura. O resultado corresponde à Componente de Reflexão Interna.

3.3 MÉTODO DA TRANSFERÊNCIA DE FLUXO

Os dois métodos vistos até aqui, embora permitam avaliar com relativa precisão, e sem muitos recursos, o desempenho luminoso de aberturas zenitais e laterais, possuem certas limitações. A luz solar direta não é considerada assim como a sua utilização por reflexão. No Método dos Lumens, a análise restringe-se aos cinco pontos na linha de centro da abertura e pontos distantes desta linha têm sua avaliação bastante aproximada. Já no Método FLD, os ábacos para determinar a componente de reflexão interna assumem certas premissas, como refletâncias de alguns elementos externos e internos, que podem influir no resultado. Assim, aberturas e ambientes com formas geométricas complexas podem inviabilizar a aplicação de ambos os métodos.

O método da transferência de fluxo é potencialmente o mais preciso e com maior recurso para predizer as diversas situações possíveis em iluminação, obtendo resultados em iluminância ou luminância. Entretanto, envolve um sistema complexo de equações, justificando sua preferência em programas computacionais, mas praticamente inviabilizando sua aplicação manualmente.

A IESNA (2000, cap.9, p.11) classifica seis tipos de transferência de fluxo, determinados em função da combinação entre a fonte emissora, o receptor e a distribuição da emissão (TAB.3).

TABELA 3 – Tipos de Transferência de Fluxo

Tipo	Fonte	Receptor	Distribuição
1	Ponto	Ponto	-----
2	Ponto	Área	-----
3	Área	Ponto	Não Difusa
4	Área	Área	Não Difusa
5	Área	Ponto	Difusa
6	Área	Área	Difusa

FONTE – IESNA, 2000, cap.9, p.11, adaptação nossa

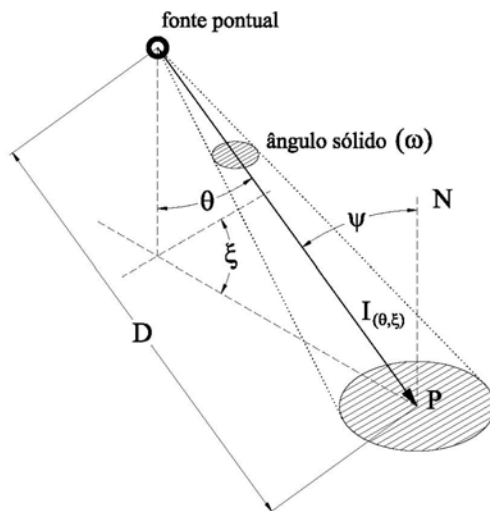


ILUSTRAÇÃO 38 – Transferência de Fluxo Tipo 1
FONTE – IESNA, 2000, cap.9, p. 2, adaptação nossa

O tipo 1, fonte e receptor pontuais (IL.38), é o mais simples. A equação resultante é a mesma deduzida da lei do inverso do quadrado da distância e da lei do co-seno.

$$E = \frac{I(\theta, \xi)}{D^2} \cos \psi \quad (40)$$

Esta é a equação básica para as fontes pontuais e também para as superfícies, que são subdivididas em áreas elementares, e o resultado é obtido por integração. Os tipos 3 e 4, que envolvem fontes de superfícies não difusas, são os mais trabalhosos. Embora sejam mais comuns na prática, muitas vezes são desconsiderados, mesmo com os recursos da informática, devido à complexidade em analisar seu comportamento.

As deduções das equações específicas para os tipos 5 e 6 levam aos conceitos de fator de configuração e fator de forma. Ambos relacionam-se a superfícies como fonte emissora, sendo que, o fator de configuração é aplicado na transferência de fluxo da superfície para um ponto, e o fator de forma é utilizado para a transferência de fluxo entre duas superfícies. A superfície fonte luminosa é sempre um difusor perfeito, e a equação que multiplica a exitância desta superfície pelo fator de configuração ou pelo fator de forma fornece, respectivamente, a iluminância no ponto ou a iluminância média na superfície receptora.

3.3.1 FATOR DE CONFIGURAÇÃO

Na seção 2.2, quando foram discutidos os fundamentos da fotometria, observou-se que os conceitos são explicados a partir de uma fonte pontual.

Entretanto, nos modelos de iluminação natural, a fonte assemelha-se a uma superfície luminosa e não a um ponto. Embora o Sol possa parecer uma fonte pontual inserida no céu, seu comportamento não apresenta as características de fontes pontuais, pois os raios solares são paralelos ao atingirem a terra, como uma grande fonte no infinito. Já a abóbada celeste, que parece uma grande superfície esférica com o centro no observador, pode ser representada por um plano infinito perpendicular ao Zênite do local. Normalmente, desconsideramos a radiação solar direta no cálculo da iluminação natural, mas esta pode ser aproveitada por reflexão, por exemplo, através de prateleiras de luz, configurando superfícies refletoras. As aberturas laterais ou zenitais são as formas mais comuns para fornecer a iluminação natural difusa no ambiente, e também podem ser representadas como superfícies luminosas.

Portanto, é importante compreender, em iluminação natural, certos aspectos relacionados ao comportamento destas fontes, que diferem substancialmente das fontes pontuais. As deduções analíticas que tratam de superfícies como fontes de luz levam a equações complexas, mas os elementos e conceitos envolvidos são relativamente simples.

O primeiro fenômeno a ser entendido é a iluminação obtida em um ponto por um plano fonte de luz (IL.39). Adota-se o plano fonte de luz arbitrário S_1 , – difusor perfeito de luminância L e exitância M constantes – e um ponto P qualquer em outro plano S_2 .

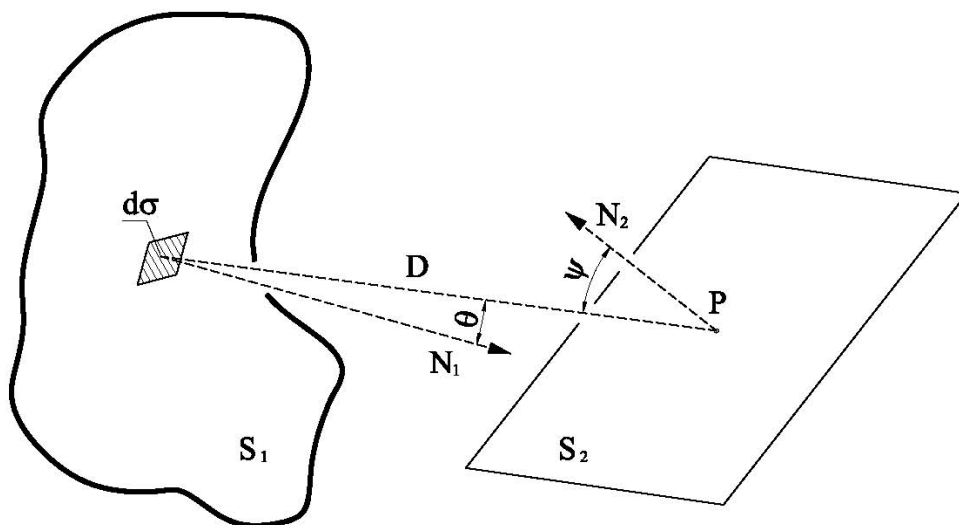


ILUSTRAÇÃO 39 – Plano Fonte de Luz
FONTE – MOON, 1936. p. 258, adaptação nossa

Sendo N_1 e N_2 as direções normais a S_1 e S_2 respectivamente e I_θ a intensidade normal a S_1 , a Intensidade I_θ emitida por uma parte infinitesimal $d\sigma$ pertencente a S_1 em direção a P será:

$$\begin{aligned} I_\theta &= I_0 \cos\theta \\ I_\theta &= L d\sigma \cos\theta \\ I_\theta &= \frac{M d\sigma}{\pi} \cos\theta \end{aligned} \quad (41)$$

Como a área infinitesimal é pequena, comparada à distância D , pode ser aplicada a lei do inverso do quadrado da distância, obtendo-se a iluminância dE_p em P , devido ao fluxo luminoso produzido por $d\sigma$:

$$dE_p = \frac{I_\theta}{D^2} \cos\psi \quad (42)$$

Substituindo a equação (41) na equação (42), tem-se:

$$dE_p = \frac{M}{\pi D^2} \cos\theta \cos\psi d\sigma \quad (43)$$

A iluminância total E_p de S_1 em P é obtida por integração:

$$E_p = \frac{M}{\pi} \int \frac{\cos\theta \cos\psi}{D^2} d\sigma \quad (44)$$

O fator de multiplicação da existância M é meramente geométrico, conhecido por Fator de Configuração C . Assim, a equação é simplificada (IESNA, 2000, cap.9, p.3):

$$E_p = M C$$

Onde:

$$C = \frac{1}{\pi} \int \frac{\cos\theta \cos\psi}{D^2} d\sigma \quad (45)$$

Nota-se que o valor do Fator de Configuração C varia conforme a forma e posição do plano fonte de luz em relação ao ponto P . Para facilitar sua aplicação, alguns autores apresentam tabelas que fornecem a equação Fator de Configuração C para formas geométricas simples. São equações relativamente complexas e exigem certa familiaridade com operações matemáticas. Além disso, é difícil visualizar e interpretar geometricamente tais equações. O conceito de Hemisfério

Unitário ou Princípio do Ângulo Sólido Projetado, baseado no modelo de Nusselt, é muito esclarecedor quanto a este aspecto, e será reproduzido a seguir.

Retomando o exemplo anterior (IL.39), considera-se uma esfera de raio unitário com centro em P (IL.40). O ângulo sólido $d\omega$, com vértice em P , definido por $d\sigma$ ou $d\sigma'$, é o mesmo, logo:

$$d\omega = \frac{d\sigma'}{1^2} = \frac{d\sigma \cos\theta}{D^2} \quad (46)$$

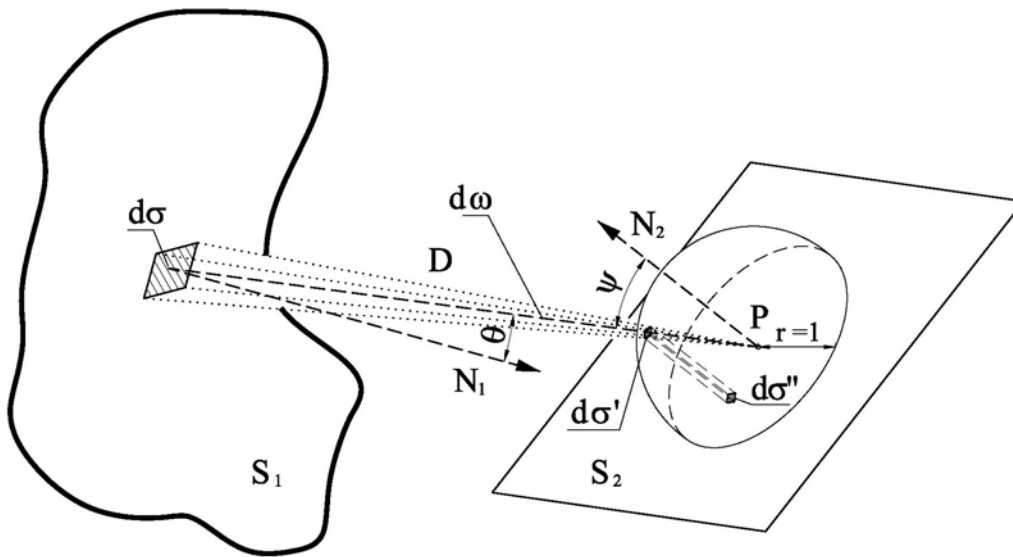


ILUSTRAÇÃO 40 - Método do Hemisfério Unitário
FONTE - MOON, 1936. p. 295, adaptação nossa

Substituindo a equação (46) na equação (43), tem-se:

$$dE_p = \frac{M}{\pi} d\sigma' \cos\psi \quad (47)$$

Mas $d\sigma' \cos\psi$ é a projeção da área $d\sigma'$ no plano S_2 . Sendo $d\sigma''$ e σ'' respectivamente, as projeções em S_2 das áreas $d\sigma$ e S_1 determinadas no hemisfério unitário, a iluminância total E_p será:

$$E_p = \frac{M}{\pi} \int d\sigma'' = \frac{M}{\pi} \sigma'' = L\sigma'' \quad (48)$$

Portanto, a iluminância em um ponto P , devido a um plano fonte de luz S_1 de luminância L e exitância M constantes, é igual à luminância L multiplicada por σ'' , que é a área projetada em S_2 da base do ângulo sólido definido no hemisfério unitário por S_1 e P , e a razão σ''/π é o Fator de Configuração C . Como o valor máximo para σ'' é π , correspondendo à área da base do hemisfério unitário, o Fator de Configuração C está limitado aos seguintes valores: $0 \leq C \leq 1$.

Esta demonstração, além de possibilitar a visualização geométrica do Fator de Configuração, permite relacionar alguns métodos de cálculo utilizados em iluminação natural. Podemos identificar dois grupos: os métodos analíticos e os métodos gráficos. Os segundos parecem ser preferidos pelos arquitetos pela maior familiaridade com seus elementos, e os primeiros são mais utilizados em situações específicas.

Se considerarmos S_1 como uma área infinita, temos um modelo da iluminação total proveniente de um céu com luminância uniforme. Neste caso, a área σ'' corresponderia à área do círculo definido pelo encontro do hemisfério unitário com o plano S_2 , e a iluminância E_p seria:

$$E_p = L\sigma'' = L\pi r^2 = L\pi \quad (49)$$

Uma dedução semelhante à apresentada por Moon (1936, p.294-7) é encontrada em Hopkinson; Petherbridge e Longmore (1975, p.84-6). O hemisfério é considerado como fonte luminosa de luminância uniforme, e deseja-se obter a iluminância no ponto P , centro do hemisfério, proveniente da superfície do hemisfério. O resultado é o mesmo obtido pela equação (49), ou seja, a iluminância em P é igual à luminância do hemisfério multiplicada por π .

Conclui-se que, da mesma forma que uma fonte isotrópica em um ponto P produz uma luminância $L = M/\pi$ na superfície do hemisfério com centro em P , um hemisfério de luminância uniforme L produz em seu centro P uma iluminância $E = L\pi$. Se a luminância de um céu uniforme for expressa em blondel¹⁹, por exemplo 5.000 blondel, a iluminância em um plano horizontal será 5.000 lux.

3.3.2 FATOR DE FORMA

O Fator de Forma é aplicado na transferência de fluxo entre duas superfícies. A sua determinação utiliza raciocínio semelhante ao apresentado para o Fator de Configuração, mas possui características e propriedades específicas.

Considerando a superfície emissora A_1 e a superfície receptora A_2 , o fluxo luminoso Φ_2 proveniente de A_1 que atinge A_2 é:

$$\Phi_2 = \int E_{dA_2} dA_2 \quad (50)$$

¹⁹ Ver Sistema de Iluminação Equivalente na seção 2.2.2.

Como E_{dA_2} é a iluminância de uma fração infinitesimal dA_2 pertencente a A_2 , pode-se substituir E_{dA_2} por E_p da equação (44), sendo que $d\sigma$ corresponde a dA_1 e M a M_{A1} na equação (51):

$$\Phi_2 = \frac{M_{A1}}{\pi} \int \int \frac{\cos\theta \cos\psi}{r^2} dA_1 dA_2 \quad (51)$$

Aqui também, o fator que multiplica a existância M_{A1} é meramente geométrico.

Para obter a fração de fluxo que deixa A_1 e é interceptada por A_2 , divide-se esse fator por A_1 , resultando no Fator de Forma $f_{1 \rightarrow 2}$. É importante observar que se deve indicar o sentido em que o fluxo é transferido:

$$f_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{\pi A_1} \int \int \frac{\cos\theta \cos\psi}{r^2} dA_1 dA_2 \quad (52)$$

Substituindo o Fator de Forma $f_{1 \rightarrow 2}$ na equação (51), tem-se:

$$\Phi_2 = M_{A1} A_1 f_{1 \rightarrow 2} \quad (53)$$

Para obter a iluminância média E_{m2} produzida em A_2 por A_1 , divide-se o fluxo ϕ_2 pela área A_2 :

$$E_{m2} = \frac{M_{A1} A_1 f_{1 \rightarrow 2}}{A_2} \quad (54)$$

Assim como o Fator de Configuração, o Fator de Forma está limitado aos seguintes valores: $0 \leq f \leq 1$.

Uma importante relação atribuída ao Fator de Forma é a reciprocidade, conforme a equação (55):

$$A_1 f_{1 \rightarrow 2} = A_2 f_{2 \rightarrow 1} \quad (55)$$

Aplicando esta relação na equação (54), tem-se:

$$E_{m2} = M_{A1} f_{2 \rightarrow 1} \quad (56)$$

Outra relação a ser destacada refere-se às superfícies de um invólucro. Em um sistema fechado, o somatório dos fatores de forma partindo de uma superfície é igual a 1.

$$\sum_{j=1}^n f_{i \rightarrow j} = 1 \quad (57)$$

A maioria dos ambientes internos constitui um sistema fechado e esta relação, combinada com a relação de reciprocidade, simplifica o cálculo.

3.3.3 INTER-REFLEXÃO DA LUZ

Ao analisarmos a iluminação em um ambiente, observamos que esta é resultado tanto da luz proveniente diretamente das fontes de luz, como também das múltiplas reflexões que ocorrem nos diversos elementos que compõem o espaço. Uma parte da luz incidente em uma superfície é absorvida, outra é refletida e direcionada para outra superfície, e assim indefinidamente. Este fenômeno de repetidas trocas de luz entre superfícies é chamado inter-reflexão. Admite-se que haja um ponto de equilíbrio na iluminação do ambiente, resultado do balanço entre a porção de luz proveniente das fontes e a porção absorvida pelas superfícies. Neste ponto, as superfícies apresentam uma exitância final, em contraposição à exitância inicial produzida diretamente pelas fontes de luz, antes do início do processo de inter-reflexão.

As propriedades refletoras das superfícies são um aspecto importante a ser considerado. Utilizam-se, normalmente, dois casos especiais, devido à simplificação que introduzem nos cálculos envolvendo a reflexão da luz: a distribuição difusa e especular perfeita. Embora as superfícies reais não apresentem estas propriedades, a reflexão de diversos materiais e acabamentos normalmente utilizados em arquitetura apresentam distribuição semelhante ao difusor perfeito, assim como o comportamento dos espelhos se aproxima da reflexão especular perfeita. Nesses casos, a simplificação de adotar a distribuição difusa e especular perfeita pode ser utilizada sem acarretar em significativa influência no resultado do cálculo.

Por vezes, é necessário considerar superfícies nas quais se aplica a função bidirecional de distribuição das refletâncias (BRDF)²⁰. Neste caso, a distribuição dos raios refletidos depende das características da superfície e do ângulo de incidência da luz.

Outra simplificação está em desconsiderar a variação espectral da distribuição da luz. Embora a refletância varie com o comprimento de onda do raio de luz incidente em superfícies reais, admite-se no cálculo a mesma refletância para todo o espectro da luz visível.

Se as superfícies apresentarem comportamento equivalente ao difusor perfeito, a componente total devido à inter-reflexão em um ponto pode ser obtida através do Fator de Configuração e da exitância final das superfícies:

²⁰ ver seção 2.4.

$$E_{inter} = \sum_{i=1}^n C_{i \rightarrow P} M_i \quad (58)$$

Onde:

E_{inter} Iluminância total proveniente da inter-reflexão

$C_{i \rightarrow P}$ Fator de Configuração da superfície i para o ponto P

M_i Exitância final da superfície i

Portanto, para calcular a componente de inter-reflexão, é necessário determinar a exitância final das superfícies envolvidas nesse processo. O método de elementos finitos é o procedimento mais comum utilizado. As superfícies são subdivididas e, a cada elemento, é admitida uma exitância diferente, mas uniforme. Muitas vezes, consideram-se as superfícies como difusores perfeitos.

Observam-se duas vertentes no cálculo da inter-reflexão da luz: o método da transferência radiativa de fluxo, também chamado Radiosidade (*Radiosity*) e o método de perseguição ao Raio Traçado (*Ray Tracing*). O método Radiosidade é mais adequado para a distribuição difusa da luz, enquanto o método Raio Traçado apresenta melhor resultado para a análise especular da luz. Nessas duas abordagens baseiam-se diversas técnicas desenvolvidas inicialmente para computação gráfica, no intuito apenas de representar cenários e imagens virtuais. Entretanto, por estarem fundamentadas em princípios físicos, puderam ser estendidas para a aplicação técnica e científica.

3.4 MODELOS COMPUTACIONAIS

A difusão da informática nas atividades relacionadas à arquitetura e a complexidade de cálculo que envolve a iluminação parecem suficientes para prever uma tendência neste sentido. A oferta de aplicativos que simulam iluminação quantitativa e qualitativamente já não é pequena, e tende a ser ampliada.

A pesquisa em iluminação natural tem levado a uma constante revisão teórica, conceitual e metodológica, envolvendo os algoritmos dos programas computacionais.

Os três métodos descritos já foram utilizados nesses algoritmos: Método dos Lumens – ENER-WIN e SOLAR-5.4; Método do Fator de Luz Diurna – DOE-2 e ENERGY-10; Método de Transferência de Fluxo – RADIANCE, SUPERLITE, LIGHTSCAPE e LUMEN MICRO (MILNE; ZURICK, In: Daylighting, 1998, p.91).

Observa-se que não se tratam apenas de programas direcionados para iluminação, mas também daqueles que analisam o desempenho térmico e o consumo energético do edifício, devido à importância da luz natural quanto a estes aspectos.

O Método de Transferência de Fluxo tem demonstrado maior potencial e precisão, o que justifica sua predominância nos modelos computacionais mais avançados, apresentando duas abordagens em relação à inter-reflexão da luz já mencionadas: o método Radiosidade e o método Raio Traçado. A necessidade de criar cenários cada vez mais realísticos levou, inicialmente, ao desenvolvimento de artifícios, utilizados na computação gráfica, sem firme fundamentação teórica, mas com bom resultado prático. Na década de 80, destaca-se o desenvolvimento desses dois métodos, com maior consistência na fundamentação física (CLARO, 1998, p.8).

O método Raio Traçado persegue o caminho do raio de luz, podendo ser considerado a partir do olho do observador ou da fonte de luz para o ambiente. As técnicas baseadas neste método proporcionam um modelo mais realístico do comportamento da luz, incluindo reflexões especulares e refrações em objetos transparentes. Para a transferência de fluxo tipo 1 (seção 3.3 Método da Transferência de Fluxo), os métodos Raio Traçado e Radiosidade são equivalentes. *Monte Carlo Ray Tracing* combina o método Raio Traçado com um método numérico estatístico, modelando probabilisticamente a componente inter-refletida da luz. A distribuição difusa também pode ser estimada, admitindo diversos raios refletidos em diversas direções casuais para cada raio incidente. Ao atribuir diferentes pesos para as diversas direções do raio incidente e refletido, permite modelar a reflexão através da função bidirecional de distribuição das refletâncias, adequando-se a superfícies reais.

O Método Radiosidade admite as superfícies como difusores perfeitos, o que possibilita utilizar os recursos do Fator de Configuração e do Fator de Forma no cálculo, através do método de elementos finitos. Considerando um sistema de transferência radiativa, a equação do balanço de fluxo é escrita para cada elemento desse sistema, igualando o fluxo total que deixa o elemento ao fluxo total incidente no elemento, conforme a equação (59).

$$M_i = M_{0i} + \rho_i (f_{i \rightarrow 1} M_1 + f_{i \rightarrow 2} M_2 + \dots + f_{i \rightarrow m-1} M_{m-1} + f_{i \rightarrow m} M_m) \quad (59)$$

Onde:

- m número de elementos do sistema;
- M_i Exitância total do elemento i (fluxo direto e inter-refletido);
- M_{0i} Exitância direta no elemento i (apenas fluxo direto da fonte);
- ρ_i Refletância do elemento i ;
- $f_{i,j}$ Fator de Forma do elemento i para o elemento j .

O fluxo total incidente possui dois componentes, o componente direto das fontes de luz e o componente inter-refletido. Constrói-se, então, uma grande matriz abrangendo todos os elementos, cuja solução é obtida pelo método de iteração, que inicia com M_i igual a M_{0i} . A maior complexidade encontrada nesse cálculo consiste na dupla projeção na base do hemisfério de raio unitário, utilizada na analogia de Nusselt para obtenção do Fator de Configuração e do Fator de Forma, devido “à dificuldade de criar elementos de igual tamanho em uma esfera, bem como criar um conjunto de coordenadas lineares para descrever unicamente posições em sua superfície.” (CLARO, 1998, p.8). Este aspecto tornou impraticável sua aplicação. A solução encontrada foi substituir o hemisfério de raio unitário pela metade de um cubo onde meia aresta equivale a 1, denominado hemi-cubo.

Analisando comparativamente os métodos Raio Traçado e Radiosidade, observa-se que as melhores características de um representam as principais deficiências do outro e vice-versa. O método Raio Traçado lida bem com o comportamento especular da luz, mas a simulação do comportamento difuso das superfícies é prejudicada, necessitando avaliar milhares ou milhões de raios refletidos para cada raio incidente. Já o Método Radiosidade é mais apropriado para analisar e representar a propagação difusa da luz, mas as imagens geradas são menos realísticas, pela maior dificuldade em modelar a reflexão e transmissão especular ou a distribuição bidirecional das refletâncias. Conseqüentemente, a avaliação do ofuscamento também é prejudicada. Por outro lado, ao adotar o difusor perfeito em todas as superfícies, o método Radiosidade não depende do ponto de vista do observador. As imagens geradas por este método relacionam a geometria de todos os objetos envolvidos no sistema e, após processar o cálculo, podem-se obter várias imagens de acordo com diversos pontos de vista sem a necessidade de recálculo. O mesmo não ocorre no método raio traçado, no qual deve ser feito novo cálculo, em cada ponto de vista, para construção da imagem.

Considerando as vantagens e deficiências observadas, o aprimoramento dos modelos de cálculo e simulação tem direcionado para uma técnica híbrida que permita analisar tanto a propagação difusa como a especular da luz. (IESNA, 2000, cap.9, p.13-7).

As ferramentas computacionais favorecem vários aspectos relacionados aos estudos de iluminação, mas introduzem um elemento novo que é a sua composição interna. A caixa negra de mecanismo desconhecido (Bunge, 1974) necessita ser testada para sedimentar sua confiabilidade. Este procedimento tem sido observado em conferências internacionais, com importante contribuição na validação dessas ferramentas.

Uma avaliação comparativa entre quatro aplicativos (UBBELOHDE; HUMANN In: Daylighting, 1998 p. 97) demonstrou grande variação nos resultados. Os aplicativos utilizados foram: Radiance, SuperLite, Lightscape e Lumen Micro. Tomou-se por referência um prédio existente em São Francisco, projetado por Stanley Saitowitz, e também um modelo físico do edifício. As simulações e medições foram feitas para as condições de céu claro e céu encoberto. Os resultados foram registrados em um gráfico referente ao corte longitudinal do edifício.

Os níveis de iluminação para céu claro registrados no SuperLite e Lumen Micro divergiram das medições, tanto em valores como no padrão de curva, superestimando, em alguns pontos, acima de dez vezes os resultados reais. O Lightscape registrou níveis de, aproximadamente, 1/5 das medições locais, e o Radiance esteve bastante próximo da realidade. Nas condições de céu encoberto, as diferenças permaneceram praticamente as mesmas. O SuperLite melhorou um pouco, não apresentando resultados tão exagerados como o Lumen Micro. O modelo físico e o Radiance acompanharam de perto as medições e o Lightscape, embora com padrão de curva similar, permaneceu em níveis mais baixos.

Outra verificação foi elaborada para testar o desempenho do Lightscape 3.2 em três itens: comportamento das superfícies, considerando suas características físicas; comportamento sob diferentes parâmetros de luz natural e comportamento de superfícies especulares.(SOUZA In: PLEA, 2001)

A superfície especular foi aplicada em uma prateleira-de-luz e, por comparação a um modelo físico, mostrou-se que o aplicativo não considerou seu desempenho. Nas conclusões foram destacadas como limitações do Lightscape a

não-consideração de reflexões especulares e o tempo excessivo de simulação, quando muitos parâmetros e superfícies são considerados.

Quanto à conclusão de não considerar reflexões especulares por não ter avaliado o desempenho da prateleira-de-luz, pode haver outra questão: o Lightscape simula o desempenho de prateleiras de luz com radiação solar direta? Esta questão foi enviada por correio eletrônico, em junho de 2003, para Souza. Em resposta, diz terem feito testes com altas refletividades da prateleira e do forro, que obtiveram certo efeito visual e numérico, mas não se pode afirmar que os valores sejam confiáveis.

O Radiance foi avaliado por comparação com medições fotométricas nas mesmas condições de céu e de espaço (MARDALJEVIC, 1999). Este foi um dos aspectos fundamentais analisados, devido à complexidade envolvida em compatibilizar o modelo à realidade nos testes de validação, pois as divergências entre simulações computacionais e medições em espaços reais podem advir das diferenças de distribuição das luminâncias do céu teórico e do céu real, sendo impossível diagnosticar, por este procedimento, se tais erros provêm do algoritmo do programa ou da representação do céu.

Utilizando os recursos da estação BRE-IDMP²¹, foi possível configurar um modelo de céu no Radiance, baseado nos valores medidos pela estação, estabelecendo as mesmas condições de céu nas simulações e nas medições. A estação BRE-IDMP forneceu também dados de medições simultâneas da distribuição das luminâncias do céu e de iluminâncias interiores, configurando uma base de dados confiável para validação do aplicativo.

Mardaljevic concluiu que o Radiance pode prever a iluminação interna de ambientes com alto grau de precisão, para uma ampla faixa de condições reais de céu. Entretanto, devido à escassez de dados medidos que possam caracterizar o céu nas diferentes regiões em todo o planeta, a pesquisa estendeu-se para os modelos teóricos de céu, avaliando quatro modelos 'puros' de céu e dois modelos 'não-puros'. Os modelos de céu 'puros' utilizados foram:

- Céu Encoberto padrão CIE;
- Céu Claro padrão CIE;
- Céu Intermediário Matsuura;

²¹ IDMP – *International Daylight Measurement Programme* (Programa Internacional de Medição da Luz Diurna).

- Céu Perez para todos os climas.

Embora o Céu Perez englobe diversos tipos de céu, este modelo foi incluído no grupo 'puro' pois todos estes modelos obedecem a uma formulação distinta.

Os dois modelos de céu 'não-puros' foram obtidos pela seguinte composição:

- Céu Encoberto e Céu Intermediário;
- Céu Encoberto e Céu Claro.

Todos os modelos de céu foram configurados no Radiance e aplicados em simulações, para verificação comparativa com as medições da estação BRE-IDMP. Deve-se observar que os dados coletados pela estação BRE-IDMP possibilitaram identificar 754 tipos de céu diferentes, que ocorrem em condições naturais. Assim, é de se supor que os modelos de céu que abrangem uma maior faixa, como o Céu Perez e os modelos de céu 'não-puros', apresentem melhor desempenho, como de fato ocorreu. Entretanto, o pior desempenho dos céus 'puros' não significa deficiências em suas formulações, mas deve-se à menor frequência de ocorrência a eles atribuída, quando comparados às condições de céu real.

Destacam-se ainda as observações de Mardaljevic quanto às medições internas. A parcela de céu visível pela abertura é o que realmente importa para a iluminação do ambiente, aprofundando esta questão em sua análise.

Com os resultados obtidos, o Radiance apresentou alto grau de precisão para predição do nível de iluminação interior, abrangendo uma ampla faixa de condições reais de céu. O escopo da validação não incluiu os sistemas inovadores de controle e transmissão da luz, mas considerou-se que o Radiance tem capacidade de modelar a distribuição bidirecional da luz, possibilitando estender futuramente a validação para estes materiais. Alguns erros significativos encontrados não foram atribuídos ao algoritmo do Radiance, mas a outros fatores relacionados à representação do modelo e precisão dos equipamentos de medição.

A validação do Radiance foi demonstrada para sistemas tradicionais de abertura, considerando o vidro comum e construções simples. Entretanto, os resultados foram estendidos também para construções mais complexas, mas devem ser observados certos aspectos como o tempo de processamento necessário, ou as diversas inter-reflexões em pequenos elementos tipo persianas, que podem prejudicar a precisão das simulações.

No Brasil, diversos aplicativos vêm sendo desenvolvidos, direcionados para diferentes aspectos relacionados à iluminação natural:

- **LUZ DO SOL – Radiação Solar e Iluminação Natural:** Fornece tabelas de radiação solar, cartas e relógios de Sol, para diversas latitudes. Avalia a componente celeste e a penetração solar por aberturas laterais em um ambiente retangular (RORIZ, 1995);
- **DLN – Disponibilidade de Luz Natural:** Calcula as iluminâncias horárias provenientes do Sol e dos três tipos de céu – encoberto, parcialmente encoberto e claro – em planos verticais e horizontais desobstruídos, para as capitais brasileiras, permitindo inserir novos locais no banco de dados. Os resultados são apresentados através de gráficos e tabelas, podendo-se separar as contribuições da luz solar direta e difusa nos planos (SCARAZATO; SILVA, 1997);
- **Lux 2.0:** Utilizando a plataforma Microsoft Excel, calcula a distribuição do FLD para um ambiente de planta retangular. Admite uma abertura em cada parede lateral, até o máximo de quatro aberturas. Fornece as isolinhas de iluminância no plano de trabalho em função da frequência de ocorrência para as capitais brasileiras. Estima o consumo de energia elétrica para complementar a iluminação natural, mostrando o custo envolvido e a economia anual proporcionada pela integração do sistema artificial com a disponibilidade de luz natural. (ALUCCI, 2005);
- **Tensil 1.2:** Parte integrante de projeto de pesquisa financiado pelo CNPq (processo 413188/2003-2), o programa avalia as condições de conforto térmico e luminoso dos usuários sob membrana têxtil e também as condições de conforto térmico em espaços abertos não sombreados, possibilitando analisar o desempenho da membrana. Inclui um banco de dados com 27 tipos de membrana, classificados de acordo com suas características termo-físicas (ALUCCI et al., 2005);
- **LUMINA:** Direcionado para o cálculo de iluminação natural com enfoque no aproveitamento da luz por reflexão, avalia com liberdade e versatilidade dispositivos projetados para conduzir a luz ao plano de trabalho, tipo prateleiras-de-luz. Além de possibilitar qualquer forma plana e qualquer inclinação para os dispositivos, permite sua análise individual ou em conjunto, separando o desempenho de cada um no cálculo final. Desenvolvido em AutoLISP® (linguagem específica do AutoCAD®) facilita a modelagem

utilizando elementos simples que definem apenas a borda das superfícies, numa plataforma computacional amplamente difundida entre os projetistas (MOURA, 2006, p.624-33);

- **TROPLUX:** Baseado nos conceitos do método Monte Carlo raio traçado e coeficientes de luz natural, o programa se propõe a simular o desempenho da iluminação natural com particular atenção para as características climáticas e arquitetônicas das regiões tropicais (CABÚS, 2005, p.240-9);
- **APOLUX:** Resultado de uma pesquisa de doutorado, aplica um modelo matemático denominado Modelo Vetorial Esférico, utilizando a equação da Radiosidade através do método de elementos finitos (CLARO; PEREIRA; AGUIAR, 2003).

O constante aperfeiçoamento da informática e as características complexas que envolvem o cálculo luminotécnico devem levar a uma consolidação e predominância deste método em relação aos demais. Entretanto, a análise dos resultados gerados em computador sempre merece cuidado, pois além do desconhecimento dos algoritmos dos programas, quando estes não são divulgados, a correta entrada de dados é fundamental no sucesso das simulações, requerendo por vezes um aprofundamento no aplicativo e na teoria envolvida no cálculo, para aproveitar o potencial destas ferramentas. Por outro lado, escolher e testar um aplicativo envolve custos, treinamento e disponibilidade de tempo. A maior quantidade de publicações sobre pesquisa de validação iniciou por aplicativos de domínio público como SuperLite e Radiance (IESNA,1999, p.18), mas tais estudos tendem a ser ampliados para outros aplicativos, como foi visto para Lightscape e Lumen Micro, sendo um trabalho contínuo, em permanente revisão.

3.5 MODELOS FÍSICOS EM ESCALA REDUZIDA

A avaliação de desempenho luminoso em modelos reduzidos permite uma avaliação precisa dos resultados. Isto ocorre devido às propriedades físicas da luz, cujo comportamento independe da escala, sendo praticamente o mesmo no modelo físico e na construção em escala real (ANDER, 1995 p. 74). O ângulo sólido que determina o Fator de Luz Diurna *FLD* não depende da escala, mas alguns elementos merecem especial cuidado. As propriedades dos elementos transparentes devem permanecer os mesmos da escala real, para manter suas características

ópticas. Portanto, a espessura dos vidros não deverá acompanhar a escala do modelo, pois isto alteraria o coeficiente de transmissão (PLEIJEL, 1949, p.2).

O modelo físico é uma prática bastante difundida entre os arquitetos e permite uma avaliação qualitativa e quantitativa do projeto luminotécnico. Para que haja esta correspondência, além da transmissão luminosa dos elementos transparentes, o modelo deve ser o mais fiel possível ao real e reproduzir em detalhes todos os elementos como mobiliário, refletâncias, texturas e obstrução dos caixilhos.

Com este recurso, o projetista pode ajustar ou alterar as aberturas, observar a interação da luz com superfícies complexas e estudar o comportamento de dispositivos como *brises* e prateleiras-de-luz. Aliado à fotografia, permite a visualização e compreensão pelo futuro usuário do espaço das proposições do projeto (EGAN, 1983, p. 208). É ainda uma importante referência para validar métodos de cálculo e programas de computador.

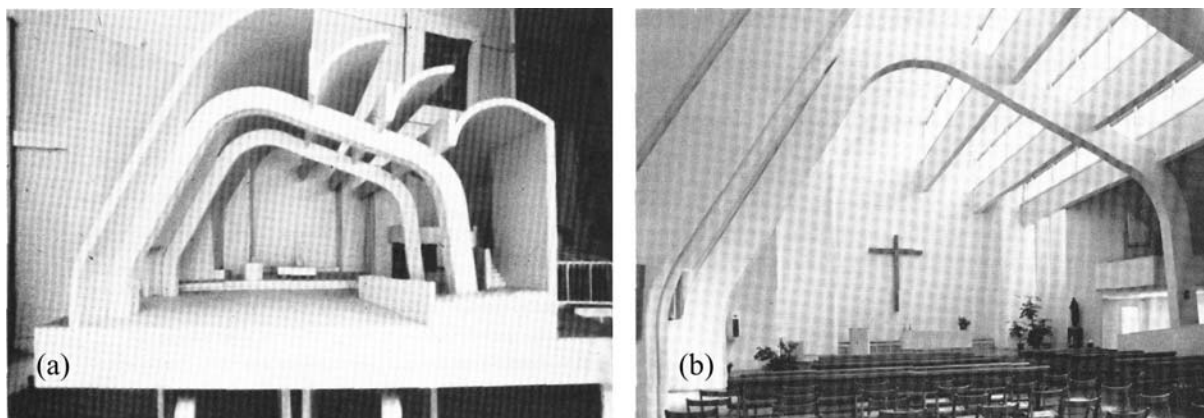


ILUSTRAÇÃO 41 – Igreja Riola (Alvar Aalto): (a) Modelo Físico; (b) Espaço Real
FONTE - MOORE, 1991, p.168

Para uma análise preliminar, o modelo em escala pode ser elaborado sem tanto rigor e precisão, mas quando é utilizado para medições, além do detalhamento são necessários cuidados especiais. A escala adotada deve permitir o acesso de equipamentos e fotocélulas. Os acessos não devem interferir na iluminação e, por vezes, são utilizados feltros negros e fitas adesivas para vedar eventuais vazamentos de luz por estes acessos. Portanto, além da fidelidade ao real deve haver um planejamento detalhado para que o modelo em escala seja eficiente (IL.42 e 43).

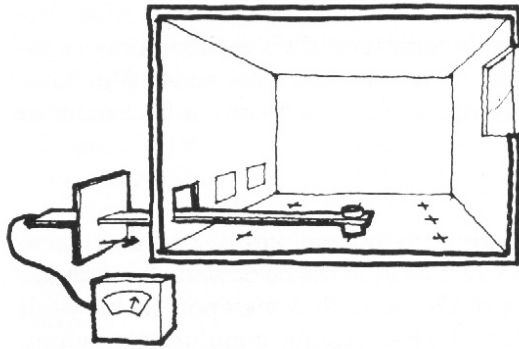


ILUSTRAÇÃO 42 - Posicionamento do Sensor em Modelo Físico
FONTE - MOORE, 1991, p.175



ILUSTRAÇÃO 43 - Modelo Físico de Sala de Aula Ensaio em Céu Real. Foto com Lente Hemisférica
FONTE - BERTOLOTTI, 2007, p.40

A NBR 15215-4 (ABNT, 2005, p. 4-6) determina a escala do modelo em função do diâmetro das fotocélulas, que não deve ser superior a 20 cm na escala do modelo. Além disso, recomenda construir modelos em escala não menor do que 1:40.

O estudo fotométrico da iluminação natural e insolação em modelos físicos pode ser elaborado ao ar livre, sob céu real, ou com o auxílio do céu artificial e do heliodon. Os dois últimos permitem uma avaliação detalhada e controlada, mas também são um recurso raro. Uma alternativa consiste na utilização do Relógio de Sol e uma base móvel. Desta forma, é possível simular a posição do Sol em qualquer data e horário, avaliando a penetração solar pelas aberturas, projeção de sombras, desempenho de dispositivos de reflexão e proteção solar.

3.6 CONTROLE DA LUZ NATURAL: SISTEMAS E MECANISMOS

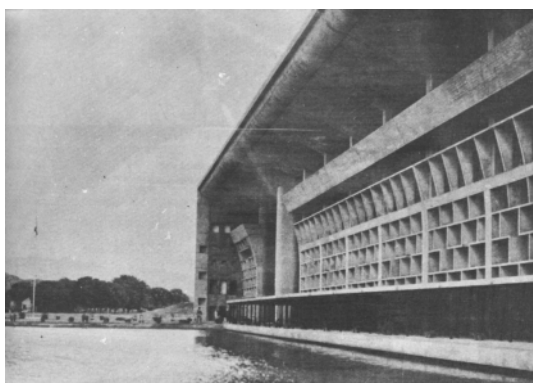
Diversas maneiras podem ser utilizadas para melhor aproveitamento da luz natural. Em arquitetura, suas características peculiares levaram ao desenvolvimento de dispositivos e artifícios que permitissem dosar a luz, cuja preocupação já era observada nas épocas mais remotas. As antigas civilizações demonstravam conhecimento de astronomia em suas construções, que freqüentemente surpreendiam com projeções de sombra, ou permitindo a penetração solar, revelando um preciso controle dos elementos relacionados à geometria da insolação. O efeito místico da luz era valorizado e percorreu a história da arquitetura em diversos exemplos da arquitetura religiosa.

Dos escritos clássicos de Vitrúvio até a atualidade, os projetistas buscam soluções para prover e adequar a iluminação e insolação do edifício, objetivando

não apenas o conforto luminoso e seu efeito simbólico, mas também o conforto térmico.

A importância dada ao binômio **arquitetura e clima** não é difícil de identificar nas obras e relatos de Le Corbusier. Os cinco pontos de uma nova arquitetura, a função termo-reguladora dos tetos-jardim, a utilização de *brises* e a abordagem dos problemas urbanísticos ilustram sua preocupação em integrar e adequar as soluções arquitetônicas às condicionantes locais. Em Chandigarh (latitude 31°N), dá preferência aos dados imutáveis do clima em vez dos dados mutáveis das relações sociais:

Sol e chuva são os dois componentes de uma arquitetura que deve ser, ao mesmo tempo, pára-sol e guarda-chuva. As coberturas devem ser tratadas como problemas hidráulicos e o problema da sombra deve ser considerado como o problema principal. O conceito de *brise-soleil* adquire, aqui, todo seu valor de ruptura dos hábitos adquiridos e estende-se, não somente à janela, mas à fachada inteira, ou melhor, à própria estrutura do edifício. (LE CORBUSIER, apud BENEVOLO, p.722).



**ILUSTRAÇÃO 44 - Corte de Justiça
Chandigarh: Le Corbusier, 1954
FONTE - BENEVOLO, 1976, p.729**

A frase clássica de Le Corbusier que relaciona o “*jogo sábio, correto e magnífico dos volumes reunidos sob a luz*”, se nos distanciarmos do conteúdo de efeito já desgastado, parece demonstrar sua preocupação em experimentar o potencial dos elementos controladores da luz na composição arquitetônica, elementos que não se restringem aos brises, mas englobam soluções que integram as aberturas por sua propriedade reveladora do espaço interior e exterior, sem prejuízo de sua função e influência nas condições de conforto dos ambientes.

3.6.1 SISTEMAS CONVENCIONAIS

Já foi observado que o alto potencial energético da luz solar direta restringe sua aplicação na iluminação do ambiente. Diversamente da luz difusa proveniente da abóbada celeste, a luz solar direta não pode ser aproveitada sem que haja alguma transformação em seu caminho até o plano da tarefa. Já a luz difusa do céu é mais difícil de ser conduzida, pois o menor potencial energético e as perdas ocorridas no percurso resultam em pequeno desempenho do sistema. A luz é extremamente sensível a certos aspectos e pouco sensível a outros. Quando a luz solar direta é refletida em uma superfície (superfície 1) com comportamento equivalente ao difusor perfeito, a iluminação em uma segunda superfície (superfície 2), proveniente desta reflexão, está sujeita a diversos redutores: coeficiente de reflexão, divisão por π e pelo quadrado da distância; e multiplicação pelo co-seno do ângulo de incidência na superfície 2²². Entretanto, se a superfície 1 tiver o comportamento de um refletor perfeito, haverá apenas as perdas provenientes do coeficiente de reflexão e da multiplicação pelo co-seno do ângulo de incidência na superfície 2, pois os raios mantêm-se paralelos após a reflexão, não sendo aplicável a lei do inverso do quadrado da distância e a divisão por π . Desta forma, observa-se que a luz difusa é bastante afetada pela distância percorrida, o que explica a dificuldade em atingir as áreas do ambiente mais afastadas das aberturas laterais, necessitando normalmente de iluminação artificial complementar.

Em arquitetura, os sistemas de iluminação natural que buscam guiar e conduzir a luz natural são geralmente projetados para a luz solar direta. Já aqueles que trabalham com a luz do céu, procuram aproveitar a luz difusa e obstruir ou refletir a luz solar direta. Alguns desses sistemas têm sido utilizados tradicionalmente em arquitetura:

- **Abertura lateral:** É o sistema de iluminação natural mais comum em edificações. Além da maior facilidade construtiva, agrega outras funções como a visão para o exterior e a ventilação. Entretanto, apresenta diversas deficiências para a iluminação do ambiente. Como normalmente o plano de trabalho é horizontal, a abertura lateral configura uma superfície-fonte de luz ortogonal ao plano de trabalho, representando uma perda de eficiência só pelo seu posicionamento. Outro aspecto é o ofuscamento provocado pela

²² Exceto o coeficiente de reflexão, os demais redutores estão inseridos no Fator de Forma.

abertura, que também decorre de sua localização, interferindo significativamente no campo visual dos usuários do espaço interior. Por fim, a distribuição da luz é comprometida, com altos gradientes entre as regiões próximas e afastadas da abertura. Dispositivos como *brises* e prateleiras-de-luz aplicados às aberturas laterais otimizam seu desempenho, aumentando a uniformidade da luz natural em todo o ambiente e diminuindo o ofuscamento provocado pela abertura;

- **Quebra-luz ou *brise*:** Dispositivo horizontal ou vertical com função de obstruir a incidência direta do Sol no espaço interior. Este dispositivo melhora a distribuição da luz, mas reduz a iluminação em todo ambiente. Quando horizontal, pode agregar a função de prateleira-de-luz;
- **Prateleira-de-luz ou *light shelves*:** Dispositivo horizontal aplicado em aberturas laterais, determinando uma região superior e outra inferior na abertura. Pela região superior, a luz incidente na superfície do dispositivo é refletida para o forro, aumentando a luz natural no fundo do ambiente;
- ***Shed*:** Iluminação zenital cuja orientação deve evitar a penetração solar pela abertura²³. A superfície iluminante pode ser vertical ou inclinada;
- **Lanternim:** Iluminação zenital bilateral. Assim como no *shed*, as superfícies iluminantes podem ser verticais ou inclinadas, observando os mesmos cuidados quanto à penetração solar pelas aberturas;
- **Átrio:** Pátio interno fechado por alas de construções geralmente vazadas. Desta forma, configuram espaços adjacentes à parte interna da edificação, combinando sistemas zenitais e laterais de captação da luz natural;
- **Domo:** Elemento geralmente de forma hemisférica ou esferóide aplicado na cobertura para iluminação zenital. A penetração da luz solar direta pode ser controlada através do poço do domo ou pelas propriedades difusoras da superfície transparente.
- **Dispositivo Zenital com Seleção Angular:** *Shed* com proteção de defletores, formando um sistema de iluminação zenital que impede a incidência da luz solar direta no plano de trabalho para qualquer orientação da abertura, refletindo esta luz para o ambiente. Este sistema pode ser

²³ A penetração solar deve ser evitada principalmente em climas quentes. Entretanto, mesmo em climas frios, a luz solar direta não deve atingir o plano da tarefa, mas pode ser aproveitada para aquecer o ambiente.

considerado intermediário entre os sistemas convencionais e inovadores, pois contém algumas técnicas e princípios que serão abordados a seguir.

3.6.2 SISTEMAS INOVADORES

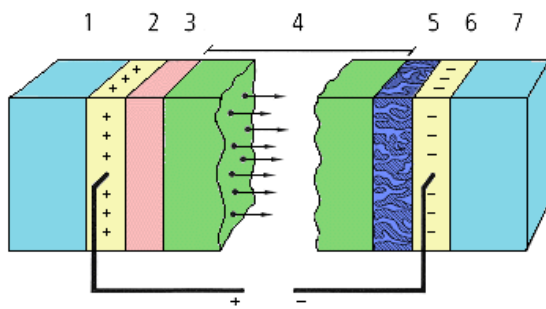
Atualmente, estão sendo desenvolvidos e experimentados sistemas e materiais inovadores que buscam otimizar o aproveitamento da luz natural. O principal desafio para a nova tecnologia baseia-se em dois aspectos clássicos: condução e transmissão da luz. No primeiro aspecto, importa alcançar as regiões do ambiente mais desfavoráveis, afastadas ou desprovidas de aberturas. No segundo, a luz transmitida precisa ser controlada, selecionada ou transformada, aproveitando a porção desejável e rejeitando a porção que prejudica o conforto térmico e luminoso. Assim, retoma-se a tradicional questão em iluminação natural, que trata de maneira distinta a luz solar direta e difusa.

Os sistemas podem ser ativos ou passivos. Os sistemas ativos acompanham automaticamente a trajetória solar, controlando a obstrução e reflexão da luz solar direta para otimizar seu aproveitamento. Neste grupo estão os dutos de luz, prismas motorizados, venezianas com rastreamento solar e VALRA²⁴ (MACÊDO, 2002, p.20). Os sistemas passivos podem ser fixos ou móveis, mas não possuem controle automático, devendo ser instalados adequadamente, de forma a fornecer o melhor aproveitamento da luz direta e difusa em função da orientação e posicionamento na abertura. Inserem-se neste grupo diversos sistemas de envidraçamento, materiais transparentes com transmissão direcional e sistemas opacos refletivos.

Dentre estes sistemas, destacam-se:

Inovações tecnológicas em sistemas de envidraçamento – Vidros coloridos e refletivos. Vidros com elementos ópticos holográficos (HOE). Vidros com películas de baixa emissividade (*low-e*). Vidros termocrômicos, fotocrômicos e eletrocromáticos. Vidros com filtros dicróicos. Vidros serigrafados. Superjanelas (*superwindows*) através da combinação parcial ou total de diversas alternativas – múltiplas camadas de películas de baixa emissividade, inserção de gases com baixa condutância, barreiras poliméricas que reduzem a convecção do gás e caixilhos estanques e isolantes (CARAM, 2002, p.69-80; Alucci, 2001, p.3-12);

²⁴ VALRA: *Variable-Area Light-Reflecting Assembly*. Este sistema é constituído de uma película refletora ligada a um rolete que se movimenta automaticamente de acordo com a posição do Sol, variando a área e a inclinação da superfície exposta da película.



1 e 7 - Vidro
2 e 6 - Condutor transparente
3 - Reservatório de íons
4- Eletrólito
5 - Filme eletrocromático

ILUSTRAÇÃO 45 - Esquema de Janela Eletrocromática
FONTE - CARAM, 2002, p.78

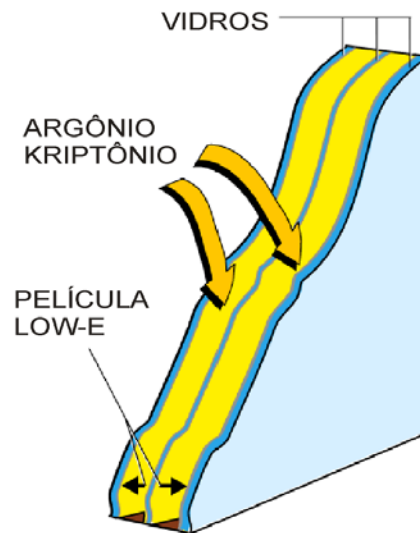


ILUSTRAÇÃO 46 - Esquema de uma Superjanela
FONTE - CARAM, 2002, p.74

Materiais transparentes com transmissão direcional – Vidros e plásticos com superfícies prismáticas ou tratados internamente para o controle direcional da luz. Alguns apresentam total reflexão interna da radiação solar direta. Recentes exemplos deste sistema são os painéis cortados internamente a laser (*laser-cut panel*), os painéis prismáticos e os polímeros em placas com cavidades internas e superfícies lisas (IESNA, 2000, cap.8, p.26);

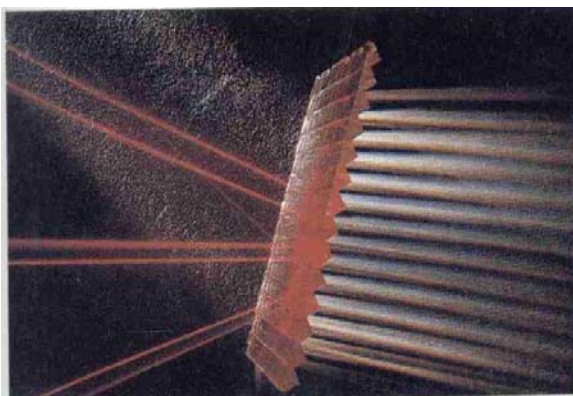


ILUSTRAÇÃO 47 - Painel Prismático
FONTE - SITECO, 2007



ILUSTRAÇÃO 48 - Painel Cortado a Laser
FONTE - MACÊDO, 2002, p.30

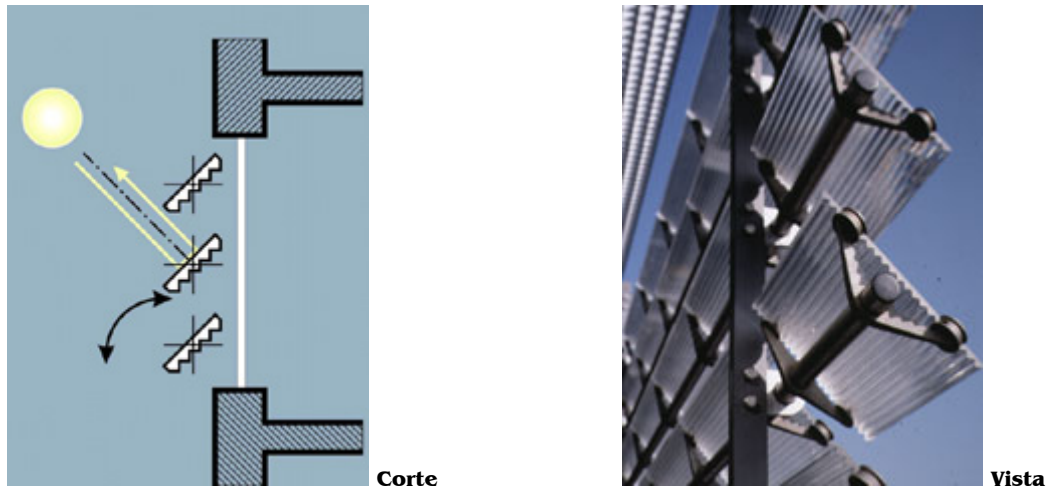


ILUSTRAÇÃO 49 – Painel Prismático Móvel
FONTE - SITECO, 2007

Sistemas condutores

- **Dutos de Luz:** Este sistema é adequado para o aproveitamento da luz solar direta. Através de espelhos e/ou lentes, conduz a luz por dutos até o ambiente, podendo percorrer longas distâncias até levar a luz para ambientes desprovidos de luz natural. O sistema é composto basicamente de três subsistemas: o subsistema coletor, o subsistema transmissor e distribuidor e o subsistema emissor da luz. O subsistema coletor, chamado heliostato, utiliza lentes e espelhos acoplados a um mecanismo que rastreia a posição solar. Além da coleta, este subsistema deve concentrar a luz para que possa ser conduzida através dos dutos do subsistema seguinte. A transmissão e distribuição é feita por dutos verticais, que atravessam os diversos pisos do edifício e estão interligados a dutos horizontais, os quais distribuem a parcela de luz destinada a cada pavimento. A luz solar coletada, transmitida e distribuída é finalmente entregue ao subsistema emissor de luz, uma luminária solar que deve ajustar a iluminação de acordo com a aplicação (PEREIRA, 1992, p.33-9);

- **Forro *plenum* refletivo:** Sistema resultante da extensão da parte posterior da prateleira-de-luz, conduzindo a luz para as áreas mais afastadas da abertura (PEREIRA, 1992, p.40);

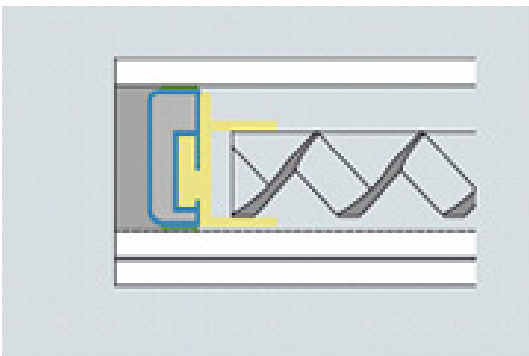


ILUSTRAÇÃO 50 – Subsistema Coletor: Heliostato
FONTE - BOMIM SOLAR, 2007



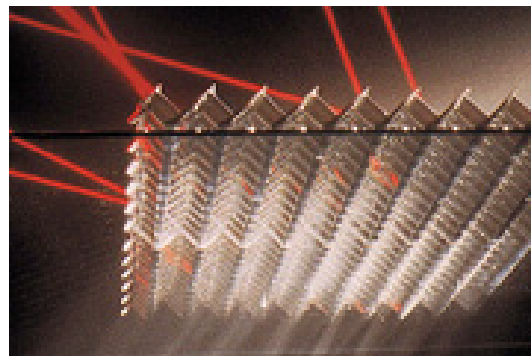
ILUSTRAÇÃO 51 – Duto de Luz
FONTE - BOMIM SOLAR, 2007

Sistemas opacos refletores – Grelha de micro lamelas, venezianas espelhadas e persianas introduzidas entre vidros. Buscando o melhor aproveitamento da luz, alguns refinamentos vêm sendo implementados no desenho destes sistemas, como as retropersianas, cujo perfil transversal diferenciado possibilita rejeitar ou aproveitar a luz solar direta de acordo com o ângulo de incidência. De maneira similar, o desenho do perfil permite refletir a luz artificial para o ambiente, aumentando sua eficiência por impedir que seja desviada para espaço exterior (KÖESTER, 2007).



Corte

ILUSTRAÇÃO 52 – Grelha de Micro-Lamelas:
FONTE - SITECO, 2007



Vista

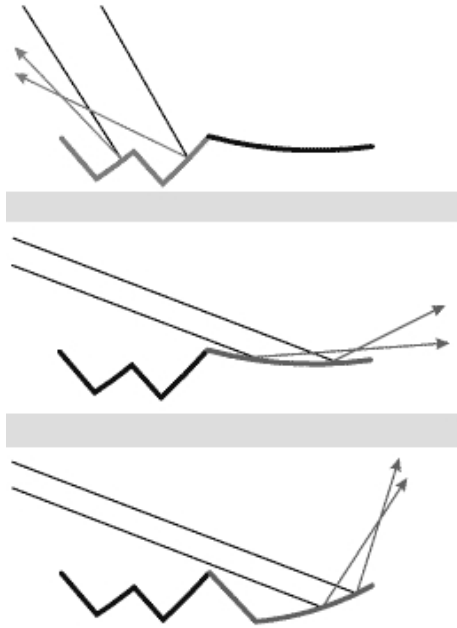


ILUSTRAÇÃO 53 – Retropersiana: Luz Solar
 FONTE - KÖESTER, 2007

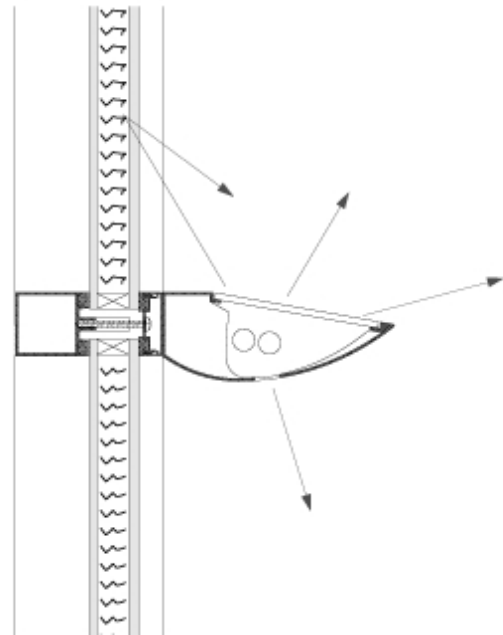
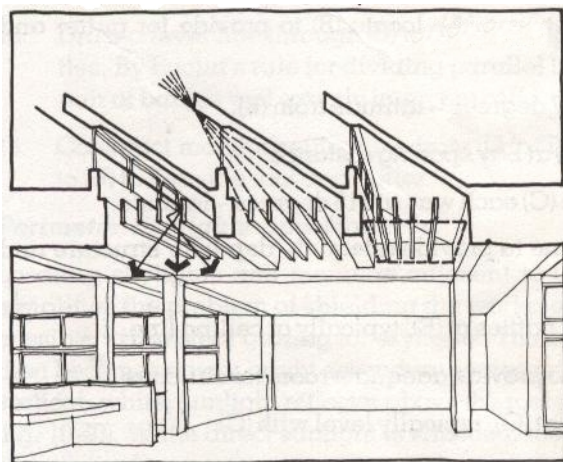
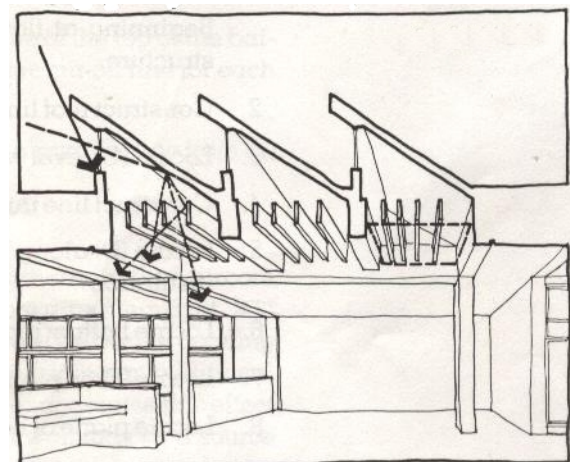


ILUSTRAÇÃO 54 – Retropersiana: Luz Artificial
 FONTE - KÖESTER, 2002, p.30

Como já foi mencionado, o dispositivo zenital com seleção angular contém princípios e técnicas dos sistemas inovadores. A influência da orientação, o desenho em função da posição solar e da parcela de céu visível, o aproveitamento por obstrução e reflexão da luz solar direta são características desse dispositivo, cujo resultado incrementa a iluminação natural no ambiente em correspondência com as melhores condições para o conforto térmico. Assim, num shed orientado para Norte no hemisfério Sul, ocorre a maior incidência solar nos defletores durante o inverno (IL.55a), mas, no verão, a incidência solar nos defletores é bloqueada para elevadas alturas do Sol, penetrando apenas a luz difusa do céu (IL.55b).



(a)



(b)

ILUSTRAÇÃO 55 – Dispositivo Zenital com Seleção Angular: (a) Inverno; (b) Verão
 FONTE - MOORE, 1991, p.97

Nos materiais transparentes com transmissão direcional, nota-se a aplicação prática dos fenômenos físicos relacionados à reflexão e refração da luz em superfícies transparentes. Foi visto na seção 2.4 como a transmissão e a reflexão da luz dependem do ângulo de incidência e do coeficiente de refração do vidro. Ao passar de um meio para outro, se o índice de refração do primeiro meio for maior que o do segundo, haverá um ângulo crítico a partir do qual a luz será totalmente refletida. Desta forma, mesmo materiais transparentes conseguem obstruir e redirecionar a luz. Entretanto, como o Sol está em constante movimento, torna-se necessário, por vezes, acompanhar a trajetória solar, corrigindo a inclinação da placa em relação ao Sol para maior eficiência do sistema, o que aumenta sua complexidade.

Outra característica a ser observada é que, mesmo mantendo a transparência, os sistemas com transmissão direcional geralmente distorcem a imagem. Apenas o *laser-cut panel* e as tecnologias similares preservam a imagem. Portanto, recomenda-se aplicar os sistemas que distorcem a imagem acima da linha de visão, pois, além de não interferirem no campo visual, redirecionam a luz para o forro do ambiente.

O controle da luz também favorece o controle do ofuscamento pelas aberturas. Deve-se observar a forte influência do ângulo de incidência sobre a superfície, o que pode levar a resultados indesejáveis. Assim, um painel prismático idealizado para desviar os raios solares para o forro do ambiente poderá desviá-los para baixo, devido à variação da altura solar. A solução é ajustar a inclinação do painel de acordo com a estação do ano (AMORIM, 2002, p.5).

3.6.3 SOLUÇÕES DE SOMBREAMENTO NA ARQUITETURA MODERNISTA BRASILEIRA

Ao referir-se à posição de destaque do Brasil a partir da década de 50 no campo das artes, particularmente da arquitetura, Bruand atribui o fato ao surgimento de talentos individuais, mas põe em evidência as condições propícias. Dentre elas, os meios geográfico e físico são o ponto de partida de sua argumentação: “Sem dúvida alguma, foi o clima o fator físico que mais interferiu na arquitetura brasileira.” (BRUAND, 1981, p.12).

De fato, no Brasil existem diversos exemplos de dispositivos de controle da luz natural durante o movimento moderno. As preocupações de Lúcio Costa com as raízes da modernidade, mas mantendo uma coerência com o movimento por rejeitar

os arremedos postiços de estilos históricos, faz com que estabeleça uma filiação para o modernismo no Brasil pela continuidade com o passado colonial (WISNIK, 2001, p.15). Os grandes beirais e varandas em algumas de suas obras como o Hotel do Parque São Clemente – Nova Friburgo, 1944, marcam uma arquitetura dentro dos princípios do modernismo, mas referenciada no passado, utilizando recursos passivos para o arrefecimento da construção. Há uma variedade de soluções adotadas pelos arquitetos modernistas brasileiros, aplicando *brises*, pérgolas, marquises, toldos, como também desenvolvendo soluções compostas e elementos articulados nas aberturas.

As características climáticas dos países tropicais entraram na pauta das discussões preocupadas com as dificuldades a serem transpostas pela Arquitetura Moderna, conforme relatava Gregori Warchavchik, em 1930, ao comitê do CIAM²⁵:

...dificuldade que reside na intensidade dos raios de sol através dos grandes painéis de vidro, o que nos obriga a encontrar um meio de isolar perfeitamente os aposentos durante as horas de forte calor. De outro lado, o país sendo úmido, as grandes aberturas são muito agradáveis para a ventilação das casas. (BARDI, 1984, p.69).

Pelo predomínio do clima quente úmido e quente semi-úmido no território brasileiro, o relato de Warchavchik encerra os elementos fundamentais para adequação da arquitetura ao clima no Brasil. A parede exterior surge como um problema de base e a primeira tentativa de resolvê-lo é atribuída aos irmãos Milton e Marcelo Roberto, na sede da Associação Brasileira de Imprensa, 1938 – RJ, antecipando o sistema do brise soleil com uma estrutura de lâminas de concreto como dispositivos de sombreamento (BARDI, 1984, p.69). Os brises, originalmente concebidos em duralumínio, foram substituídos por placas de concreto pré-moldado, a única alteração importante no projeto. O sistema cobre as fachadas Noroeste e Sudoeste, protegendo o edifício da radiação solar no período da tarde (IL.56). A parede externa, atrás dos brises, é composta de portas de vidro com ventilação superior afastadas da fachada, formando um espaço que funciona como circulação auxiliar e também como zona de dispersão de calor (MINDLIN, 1956, p.194).

²⁵ CIAM: Congressos Internacionais para a Arquitetura Moderna.



**ILUSTRAÇÃO 56 – Associação Brasileira de Imprensa
Rio de Janeiro, RJ: Milton e Marcelo Roberto, 1938
FONTE - MINDLIN, 1956, p.194**

O *brise* está presente em diversas obras modernistas brasileiras. Idealizado por Le Corbusier no projeto de urbanização de Argel, sua aplicação prática, contudo, é atribuída aos arquitetos brasileiros (BRUAND, 1981, p.12). O sistema é característico no Edifício MEC (Ministério de Educação e Cultura), Rio de Janeiro, da equipe de Lúcio Costa, sob a consultoria de Le Corbusier, que propôs um dispositivo regulável para obstrução da radiação solar direta, podendo ser ajustado de acordo com a posição do sol entre o equinócio e os solstícios de verão e inverno (IL.57).

Os *brises* são normalmente compostos por placas horizontais ou verticais, sendo que, no primeiro caso, podem agregar a função de prateleira-de-luz, direcionando, por reflexão, a luz obstruída para o ambiente.

Este sistema, adotado no MEC, pode ser considerado o primeiro a ser realizado e transformou-se, no Brasil, em forte concorrente do ar condicionado. O sanitarista francês Pierre Winter considerava a arquitetura de Le Corbusier a de um biólogo, destacando em suas intervenções a distribuição da quantidade de ar puro à temperatura exata e das doses de luz indispensáveis a uma vida sã (BARDI, 1984, p.90).



**ILUSTRAÇÃO 57 – Ministério de Educação e Cultura
Rio de Janeiro, RJ: Equipe de L. Costa, 1937-1943
FONTE - WISNIK, 2001, p. 59**

A pérgola também é um recurso bastante utilizado no período. Além de facilitar a ventilação possibilita dosar a penetração solar, criando um ambiente intermediário entre o exterior e o interior. Assim, serve tanto para aquecer como para resfriar o ambiente. Permite a criação de jardins levemente sombreados que, integrados ao ambiente interior, apresentam uma variação dinâmica da luz bastante agradável, por seu jogo peculiar de contrastes (IL.58).



**ILUSTRAÇÃO 58 – Residência Milton Guper
São Paulo, SP: Rino Levi e Roberto Cerqueira Cesar, 1953
FONTE - MINDLIN, 1956, p.65**

Normalmente a pérgola é composta de lâminas paralelas, mas pode assumir outros padrões, configurando uma espécie de *brise* horizontal ventilado, em que o calor é dissipado próximo às aberturas (IL.59).



ILUSTRAÇÃO 59 – Casa de Campo Count Raul Crespi
Guarujá, SP: G. Warchavchik, 1943
FONTE - MINDLIN, 1956, p.24

Outra solução, derivada do muxarabiê, permite sombrear e ventilar pelo mesmo elemento. Por vezes é utilizado quase em sua forma original, como na Residência Argemiro Hungria Machado – Rio de Janeiro, 1942, arquiteto Lúcio Costa (IL.60).



ILUSTRAÇÃO 60 – Residência Argemiro Hungria Machado
Rio de Janeiro, RJ: Lúcio Costa, 1942
FONTE - MINDLIN, 1956, p.22

O muxarabiê parece bastante adequado ao clima do Nordeste brasileiro, onde surgiu uma variação chamada urupema, que substitui a madeira pela palha trançada. Nessa região recomendam-se materiais leves, de pouca inércia térmica, combinados com boa ventilação e sombreamento. Na Residência João Paulo de Miranda Neto – Maceió, 1953, arquiteto Lygia Fernandes, uma treliça de madeira contínua, na varanda dos dormitórios, atenua a incidência solar na fachada Nordeste, mantendo a ventilação natural do ambiente (IL.61).



ILUSTRAÇÃO 61 – Residência João Paulo de Miranda Neto
Maceió, AL: Lygia Fernandes, 1953
FONTE - MINDLIN, 1956, p.62

O Edifício das Seguradoras – Rio de Janeiro, 1949, M. M. M. ROBERTO apresenta um sistema complexo para reduzir a carga térmica. Implantado em um lote de esquina, a fachada Sudoeste é o plano crítico a ser considerado. Inclinada aproximadamente 35° em relação ao Oeste, fica exposta por um período maior ao Sol da tarde, justamente na época mais quente do ano, próxima ao solstício de verão. A solução encontrada combina dispositivos de sombreamento e ventilação natural, introduzindo um elemento articulável, tipo veneziana de lâminas largas, entre abas horizontais que são formadas pelo prolongamento das lajes dos pavimentos (IL.62).



ILUSTRAÇÃO 62 - Edifício das Seguradoras
Rio de Janeiro, RJ: M. M. M. Roberto, 1949
FONTE - MINDLIN, 1956, p.214

Nos prolongamentos das lajes, existem aberturas modulares que coincidem com as venezianas articuláveis, permitindo a circulação do ar verticalmente. As venezianas são de altura menor que o pé-direito, deixando um espaço aberto mesmo quando colocadas na posição vertical, quando sua obstrução é máxima. Nas aberturas das abas horizontais entre pisos, foram colocadas lâminas devidamente orientadas para impedir a penetração solar (IL.63).



ILUSTRAÇÃO 63 - Edifício das Seguradoras: Detalhe Aberturas
FONTE - MINDLIN, 1956, p.215

As sacadas, mais comuns em edifícios de apartamentos, podem ser consideradas um recurso com desempenho semelhante ao do *brise* horizontal. Entretanto, agregam outros valores sem qualquer intenção de proteger, como símbolo de status ou para devolver uma relação com a natureza, proporcionando um “lugar ao Sol”. Desta forma, muitas vezes são apenas pequenos segmentos de lajes, de largura pouco superior à de uma porta-balcão (FROTA, 2004, p.166).

Outro elemento que por vezes aparece nas obras do período são os toldos de lona, alternativa simples, eficiente e econômica de proteção solar. Um aspecto relevante neste sistema é sua relação com as tendas, que apresentaram importante evolução com o desenvolvimento industrial através das tensoestruturas. Quando combinados às sacadas, os toldos complementam e corrigem possíveis imperfeições de dimensionamento destas quanto à insolação e, pela possibilidade de serem articulados, potencializam seu desempenho, permitindo ajustar a exposição solar.

Henrique Ephim Mindlin adota com freqüência soluções compostas (IL.64). Por vezes utiliza um caixilho diferenciado, ou então prefere os *brises* combinados com grandes terraços, mas sempre está evidente a preocupação em proteger as aberturas. Algumas citações suas como: “A arquitetura sempre corresponde a três fatores: o homem, a época e o lugar”; “O estudo cuidadoso da insolação é a maior glória de nossa arquitetura” (MINDLIN apud YOSHIDA et. al., 1975. p.123; 159) confirmam sua intenção e propósito em adequar a arquitetura ao clima e condições locais.



ILUSTRAÇÃO 64 – Reforma de Residência Pacaembu
São Paulo, SP: Henrique Mindlin. Solução Composta: Sacada e Toldo
FONTE - YOSHIDA et al., 1975, p.101

3.6.4 A LUZ NATURAL NAS OBRAS DE ALVAR AALTO

Se nos países tropicais as estratégias em relação ao controle da luz procuram o arrefecimento passivo do edifício – aproveitando a luz do céu e protegendo a abertura da luz solar direta – nos países de latitudes elevadas a questão se inverte. Tanto a disponibilidade de luz natural como a carga térmica proveniente da radiação solar são raras, e a estratégia para atingir as condições de conforto ambiental passa a estar no seu aproveitamento e retenção.

Estabelecido na Finlândia, com reconhecimento no exterior já nos primeiros anos de atividade, Aalto enfrenta a adversidade do clima em um país localizado acima da latitude 60°, o que parece ter contribuído para que desenvolvesse um repertório exemplar de soluções para iluminação natural, sendo marcante em certas obras o efeito que consegue nas aberturas para aproveitamento da luz. Alguns exemplos impressionam pelo rigor de detalhes, demonstrando o controle preciso e criterioso dos elementos.

Na iluminação zenital da Biblioteca “Viipuri”, Viborg, 1932-1935, Aalto consegue dosar a luz de forma surpreendente. As proporções geométricas dos poços das aberturas, com aproximadamente 1,80m de diâmetro, são cuidadosamente determinadas pela altura do Sol, e a luz solar direta é obstruída e refletida para o ambiente. Consegue assim uma iluminação difusa uniforme, livre de sombras e de ofuscamento (IL.65).



ILUSTRAÇÃO 65 – Biblioteca Viipuri
Sala Principal de Leitura
FONTE - WESTON, 1995, p.66



ILUSTRAÇÃO 66 - Edifício Comercial Rautatalo
Vista Interior do Átrio
FONTE - WESTON, 1995, p.165

A altura solar variando em torno de 50° parece configurar um recurso peculiar para implantar um sistema característico. A mesma solução adotada em Viipuri é aperfeiçoada no átrio do Edifício Comercial “Rautatalo”, Helsinki, 1952 (IL.66). A

iluminação artificial foi instalada acima dos lanternins, obtendo o mesmo efeito de noite e de dia, além de ajudar, no inverno, a derreter a neve (FLEIG, 1994, p.149).

Em menor escala, repete o sistema da Biblioteca “Viipuri” no Instituto Finlandês das Aposentadorias Populares, Helsinki, 1956 (IL.67). Observa-se ainda a preocupação em desenvolver novas alternativas para iluminação zenital. No vestíbulo principal do Instituto, adota uma solução arrojada composta por dois planos paralelos de vidro com acentuada inclinação, configurando uma cobertura transparente e facetada, com funções específicas de conforto térmico, iluminação e escoamento para a neve (IL.68).



ILUSTRAÇÃO 67 – Instituto Finlandês das Aposentadorias Populares: Biblioteca
FONTE - WESTON, 1995, p.162-3



ILUSTRAÇÃO 68 – Instituto Finlandês das Aposentadorias Populares: Vestíbulo
FONTE - WESTON, 1995, p.158

Um detalhe que chama a atenção na Villa Mairea, 1939, é a leve inclinação que Aalto aplica nos caixilhos dos dormitórios das crianças. Voltados para o Leste, a posição oblíqua parece buscar uma maior exposição ao Sol matinal, principalmente no inverno, quando o Sol nasce em torno das 9 horas e se põe por volta das 15 horas. Forma uma *bay window* assimétrica que atua como pequena estufa e permite armazenar o calor por mais tempo (IL.69 e 70).



ILUSTRAÇÃO 69 – Villa Mairea: Detalhe Caixilhos Dormitórios das Crianças
FONTE - WESTON, 1995, p.84



ILUSTRAÇÃO 70 – Villa Mairea: Fachada Este Entrada Principal
FONTE - WESTON, 1995, p.85

3.7 CONSIDERAÇÕES COMPLEMENTARES

Nos métodos gráficos para obtenção do Fator de Luz Diurna, a ferramenta básica são os transferidores auxiliares, que através de técnicas de projeção determinam a Componente Celeste CC .

Analisando comparativamente o traçado de máscaras de obstrução e o fator de configuração, pode-se perceber a similaridade entre esses dois métodos de cálculo. O traçado de máscaras projeta, no Plano de Trabalho, a área de céu visível pela abertura através um ponto P , utilizando uma operação geométrica muito semelhante à que define o fator de configuração C em função da área σ' . A divisão por π , que não aparece no procedimento gráfico, justifica-se por sua relação direta com a iluminância externa sem obstrução, e não com a exitância da abóbada celeste. Embora as formas de projeção variem, para adequá-las às diversas opções de diagramas²⁶, o conceito é o mesmo utilizado nas projeções do hemisfério unitário, pois transforma qualquer superfície fonte de luz no espaço em uma superfície plana paralela ao plano de trabalho que contém o ponto P e, portanto, a Componente Celeste e Fator de Configuração são idênticos

²⁶ Waldram; Preijel; DCLR (ABNT); BRE. Ver seção 3.2.

Pode-se perguntar: Qual o melhor método para ser utilizado? Quais as vantagens de um em relação ao outro? Existirá um método específico para cada aplicação?

Normalmente, o critério de escolha é a maior ou menor afinidade ou disponibilidade. Pela análise exposta, os métodos mostram-se equivalentes em conceito. A maior ou menor precisão dos resultados dependerá dos diagramas e medições da luminância e iluminância que serão utilizados, e não do método. O método gráfico mostra-se ideal para as aberturas laterais e zenitais, mas, para problemas específicos como a reflexão da luz por uma placa, o método analítico é mais indicado, porém a complexidade de cálculo pode desencorajar sua aplicação. O Método de Transferência de Fluxo (ROBBINS, 1986, p. 203) é um exemplo de método analítico que utiliza o fator de configuração e da complexidade das equações envolvidas no cálculo. Portanto, observa-se:

- Para aplicação prática, alguns métodos podem ser combinados entre si. No Método dos Lumens, é comum a utilização dos diagramas de Pleijel para obtenção da iluminância exterior no plano da abertura. Da mesma forma, os Diagramas de Contribuição Relativa de Luz ABNT ou os transferidores BRE, poderão ser incorporados a outros procedimentos, ampliando a gama de recursos para cálculo e predição da luz natural no ambiente construído;
- O conceito de Hemisfério Unitário pode ser uma alternativa para determinar graficamente o fator de configuração. Através de projeções semelhantes às utilizadas para avaliação da Componente Celeste, o traçado de máscaras irá fornecer graficamente o Fator de Configuração;
- Entender e relacionar com precisão as grandezas fotométricas pode ser determinante em situações específicas como segurança. As dunas de areia representam uma paisagem curiosa que pode surpreender a percepção visual, embora em um ambiente com alta iluminância. Conforme a posição do observador em relação ao Sol, o relevo não é percebido, pois a superfície se aproxima de um difusor perfeito. Talvez isso explique o sucesso dos malabarismos na região pelos motoristas de *buggy*, que inclusive orientam os turistas a não se aventurarem pelas dunas sem acompanhamento de um guia experiente;
- Em iluminação rodoviária, particularmente em túneis, o contraste e ofuscamento são de fundamental importância e a direção da iluminação deve

ser considerada com cuidado, sendo a luminância de maior importância que a iluminância;

- O comportamento particular da luz pode ser valiosa ferramenta de projeto. Além de sua relação direta e indireta com o bem-estar e as necessidades humanas, suas propriedades interferem sobremaneira na percepção do espaço e permitem esconder, iludir e surpreender o observador para valorizar a arquitetura;

Essas observações podem ser ampliadas para todo o espaço construído. Principalmente em espaços públicos, as mudanças no nível do piso ou quaisquer elementos que ofereçam risco ao usuário podem ser destacados pelo uso correto da iluminação, e destacar não significa necessariamente aumentar o nível de iluminação.

Embora certos aspectos de cada método e ferramenta de cálculo tenham sido aprofundados nesta seção, buscou-se apenas discutir sua estrutura básica. Por vezes, os elementos estão apresentados de maneira sumária e simplificada, devido à extensão e complexidade de certos temas tratados. Recomenda-se consultar as referências bibliográficas para sua aplicação prática.

Quanto ao controle da luz natural, a aplicação de qualquer sistema, quer seja inovador ou tradicionalmente utilizado em arquitetura, deve seguir critérios semelhantes em relação à eficiência energética e conforto ambiental. A sua simples utilização pode ter alguma influência na carga térmica do edifício ou no aproveitamento da luz natural, mas não garante seu desempenho. A orientação adequada das aberturas, a proporção entre vedos e vãos da envoltória, a escolha dos materiais em função das condicionantes climáticas locais permanecem como as principais estratégias de projeto. Portanto, a nova tecnologia potencializa e aumenta o repertório de soluções, mas não substitui os ditames que compatibilizam a arquitetura ao sítio e ao clima.

Capítulo 4: ILUMINAÇÃO DE TÚNEIS RODOVIÁRIOS: CONTEXTUALIZAÇÃO

A construção de túneis para passagem de veículos é anterior à construção de auto-estradas. Assim, para estimar a gênese do objeto da pesquisa, importa considerar os seguintes elementos:

- Iluminação elétrica;
- Tecnologia para construção de auto-estradas;
- Tecnologia relacionada à velocidade dos automóveis.

A falta de um destes inviabiliza a ocorrência do fenômeno em estudo. Quanto ao impacto visual do motorista no período diurno, a evolução tecnológica para construção de auto-estradas e a tecnologia relacionada à iluminação elétrica, ou melhor, à iluminação pública, parecem suficientes na formação do cenário de base a ser considerado. Em relação ao automóvel, mais que a sua origem, interessa o momento em que a tecnologia proporcionou velocidade aos veículos, implicando na necessidade de auto-estradas e na problemática envolvida na iluminação de túneis durante o período diurno.

Por esta primeira análise observa-se que o advento do objeto não pode ser remoto. Thomas Edison inventou a primeira lâmpada incandescente comercializável em 1879, e o primeiro sistema utilizando lâmpadas de arco voltaico²⁷ e corrente alternada é atribuído a Pavel Yablochkov em 1876 (LD+A, 2006, p.58), sendo introduzido em Paris em 1878 e, em 1879, Londres tinha em operação uma série com seis dessas lâmpadas. No Brasil, em 1879, foram instaladas seis lâmpadas de arco voltaico, conhecidas por “velas” Yablochkov, na Estação Central da Estrada de Ferro D. Pedro II, Rio de Janeiro (PEREIRA, 1954, p.1).

No mesmo período, foram introduzidos diversos inventos na geração de energia elétrica por meios mecânicos, para substituir as fontes químicas que eram as pilhas. Estas só forneciam corrente contínua em baixa tensão, necessitando serem ligadas em série (bateria de pilhas) para se obter voltagem maior. O primeiro exemplo prático de gerador de corrente alternada foi construído em 1831 pelo

²⁷ “O arco voltaico é, em princípio, simples e facilmente compreensível: constitui-se de duas hastes de carvão, como se fossem lápis, opostas de topo e ligadas cada uma a um polo de uma pilha. Os topos das hastes devem ser mantidos ligeiramente separados um do outro e, entre eles, a passagem da corrente elétrica cria uma ponte, um arco de luz bastante intensa e brilhante.” (GAMA, 1989, p.13).

francês Hippolyte Pixii e em 1870, acionado por um motor a vapor, o dínamo inventado por Z.T. Gramme gerava corrente contínua (GAMA, 1989, p.13).

Embora inicialmente apresentasse desvantagens, a corrente alternada mostrou-se mais apropriada para uso em larga escala no final do século XIX, pois a transmissão de energia a longa distância resultava em perdas menores, e os transformadores facilitavam o rebaixamento da tensão.

As fontes de luz artificial dividem-se em dois grupos: incandescentes e luminescentes. No primeiro grupo temos a lâmpada incandescente convencional e a lâmpada halógena e, no segundo grupo, estão as lâmpadas de descarga. Até o final da metade do século XX, a maioria das lâmpadas de descarga já haviam sido introduzidas e, no final da década de 70, já estavam disponíveis as lâmpadas halógenas e as lâmpadas de sódio e vapor metálico de alta pressão.

As técnicas construtivas, atribuídas a John Macadam, diminuíram em muito o custo na construção de auto-estradas no início do século XIX, abolindo as fundações de pedras grandes e adotando o uso de um extrato superficial tornado compacto com pó de materiais calcários (BENÉVOLO, 1976, p.39).

Os primeiros ônibus a motor apareceram na Inglaterra em 1898, apresentando diversos defeitos técnicos e, até 1910 pelo menos, não eram bem aceitos. Até o final do século XIX, a construção de veículos autônomos a motor passou por um período experimental. Encontram-se diversos relatos curiosos que descrevem a dificuldade dos inventores nessa busca, mas a partir do início do século XX, observa-se o rápido crescimento na quantidade desses veículos. O número total de veículos a motor em uso no Reino Unido aumentou de 17.819 para 265.182 entre 1904 e 1914 e, nos Estados Unidos, passou de 13.824 para 2.445.666 entre 1900 e 1910 (SAVAGE, 1967, p.93; 116-20). Mais de quinze milhões do célebre modelo T de Henry Ford, lançado em 1907, são vendidos entre 1908 e 1928.

A tecnologia na construção dos automóveis evoluiu rapidamente. A primeira grande corrida entre todas as espécies de viaturas que existiam, movidas a vapor, eletricidade e petróleo, é Paris-Rouen, 126 km, organizada por Pierre Giffard do *Petit Journal* em 1894, e vencida pelo conde de Dion, à velocidade de 22 km/h com seu veículo a vapor. Em 1902, Rigoly atingiu 152 km/h e, a partir de então, buscava-se sempre superar o recorde anterior nessas competições. Embora ainda não fossem velocidades aplicáveis aos veículos comuns, a tecnologia automobilística já

alcançava a velocidade necessária para configurar os problemas relacionados à iluminação de túneis, partindo inclusive do depoimento de um piloto de corrida, o artifício de fechar apenas um olho e, posteriormente, inverter o olho aberto com o fechado ao ingressar em um túnel.

A Primeira Guerra Mundial contribuiu para o desenvolvimento da engenharia dos motores de combustão interna, estimulando também os métodos de produção em massa. Na década de 20 a produção da indústria automobilística cresceu e surgiram automóveis mais baratos, aumentando o consumo e estimulando a construção de vias para estes veículos.

Com o final da Segunda Guerra Mundial, a necessidade de renovar a frota de veículos, a reconstrução de auto-estradas e o planejamento viário imprimiram novo crescimento no transporte rodoviário. A produção de automóveis nos Estados Unidos saltou de 69.532 em 1945 para mais de 2,1 milhões em 1946, 3,5 milhões em 1947 e 3,9 milhões em 1948 (U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 1976, p.154) e no Reino Unido, o total de veículos alcança 2,4 milhões em 1946 (POPKESS, 1957, p.8).

“Assim que existiram as ferrovias, existiram os túneis. Entretanto, a necessidade de sua iluminação só pode ser sentida quando surgiram os primeiros túneis rodoviários.” (HALBERTSMA In: SCHREUDER, 1964, p.iii). De fato, o fenômeno envolvido na iluminação de túneis rodoviários não era completamente compreendido no início, e diversos túneis, construídos entre 1930 e 1950 aproximadamente, apresentaram problemas de iluminação que foram corrigidos posteriormente.

As primeiras recomendações identificadas datam de 1940, e estavam inseridas em um código genérico para iluminação de vias, mas um dos primeiros esboços de uma orientação específica para iluminação de túneis rodoviários, que já apresentava consistência, foi publicado em 1957 (IES), contendo as principais questões envolvidas e exemplos práticos, como a situação anterior e posterior à instalação do sistema suplementar para o período diurno no Túnel Liberty, 1939 (IL.71).

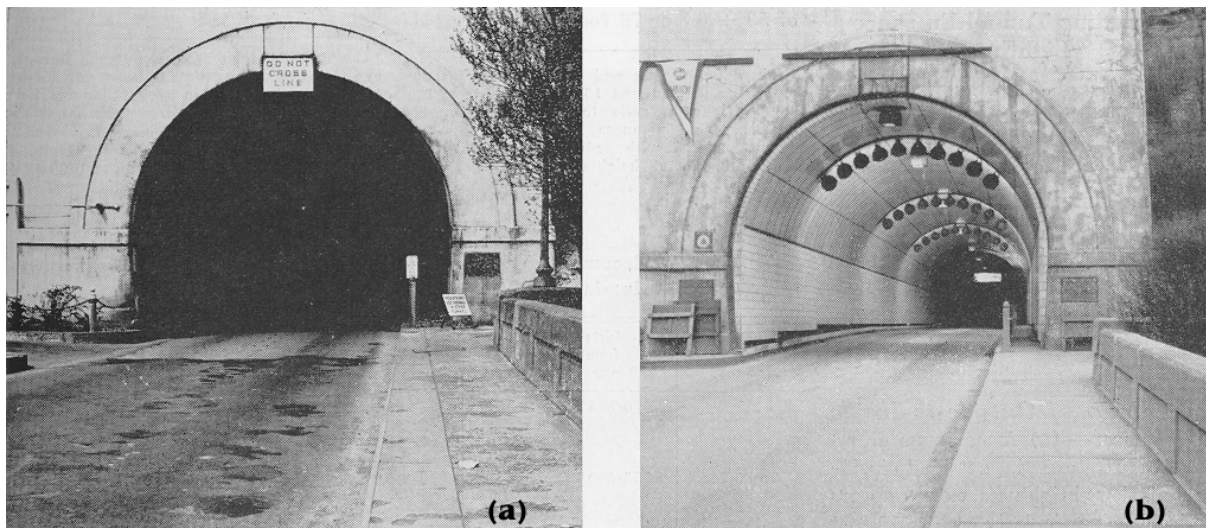


ILUSTRAÇÃO 71 – Túnel Liberty, Pittsburgh, 1939.

(a) Situação anterior à iluminação suplementar; (b) Situação Posterior à iluminação suplementar

FONTE - IES, 1957, p.327

Outro exemplo interessante é o Túnel Queen Creek, 1952 (IL.72). Após dez acidentes e duas mortes, atribuídos à má iluminação, o sistema foi completamente refeito, adequando-se à recomendação IES, 1957. O primeiro trecho após o portal passou de 7,5 fc (80 lx) para 120 fc (1.291 lx) e a região interior passou de 2,5 fc (27 lx) para 24,5 fc (263 lx) (STEAD, 1961, p.676-7).



ILUSTRAÇÃO 72 – Túnel Queen Creek, Pittsburgh, 1952.

FONTE - IES, 1961, p.676

Procedimentos semelhantes foram observados no Túnel Rotterdam River Meusse, 1941, com a iluminação refeita em 1961, no Túnel Holland, 1927 e Pennsylvania Turnpike (7 túneis) 1940, que foram submetidos a um programa de

modernização em que a iluminação era um ponto de destaque, revelando tanto a consolidação da teoria e técnica aplicada à iluminação de túneis, a partir de 1960, como a importância das instruções normativas neste processo.

No Brasil, os túneis rodoviários mais antigos foram construídos no Rio de Janeiro, ainda no século XIX: o da rua Alice (antigo Rio Comprido) concluído em 1887, e o Almor Prata (antigo Túnel Velho) concluído em 1891, sendo que ambos permanecem em plena atividade. O Túnel Nove de Julho (atual Dr Daher Elias Cutait) foi o primeiro túnel construído pela Prefeitura de São Paulo, inaugurado pelo Presidente Getúlio Vargas em 1938. Em uma das diversas reformas por que passou, foram instaladas 250 lâmpadas de vapor de sódio de 400 W (CBT, 2006, p.28-105).

Por este breve retrospecto histórico, observa-se que o estágio necessário de desenvolvimento dos três elementos identificados inicialmente, para a ocorrência do fenômeno em estudo, ocorreu no final da década de 50, coincidindo com publicação IES (1957), que será admitida como o marco inicial da teoria aplicada ao projeto luminotécnico de túneis rodoviários.

4.1 TERMINOLOGIA

Antes de qualquer análise deve-se considerar a terminologia associada à iluminação de túneis. No período diurno identificam-se cinco zonas, nas quais a iluminação é ajustada para assegurar a capacidade visual do motorista. As zonas e alguns elementos complementares estão descritos a seguir, conforme representado na IL.73:

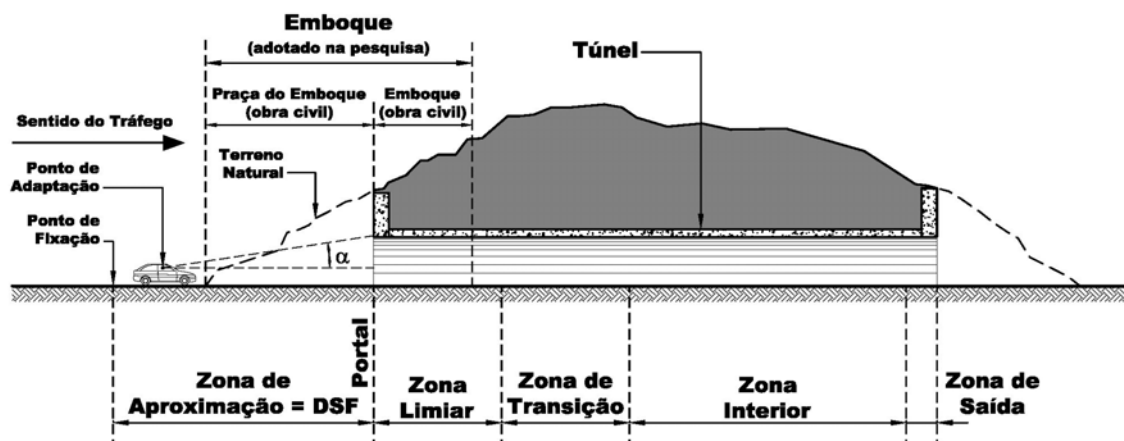


ILUSTRAÇÃO 73- Terminologia: Corte Longitudinal
 FONTE - IESNA, 2005, p.2; DER/SP, 2005, p.11, adaptação nossa.

- **Túnel:** Construção sobre a rodovia que restringe a iluminação diurna, reduzindo substancialmente a capacidade visual do motorista. (CIE, 2004, p.5);
- **Distância Segura de Frenagem (DSF):** Distância visual requerida, em função da velocidade, para que o motorista possa frear com segurança ao identificar um elemento inesperado na rodovia. Esta distância considera o tempo de percepção e reação do motorista, além da distância necessária para frear o veículo (BSI, 1992, p.4);
- **Portal:** Construção do túnel que corresponde ao início da parte coberta. Conforme o sentido do tráfego denomina-se portal de entrada e portal de saída (CIE, 2004, p.5);
- **Ponto de Adaptação:** Posição na rodovia aberta em que a abertura do portal de entrada torna-se o principal elemento no campo visual do motorista que se aproxima do túnel (ANSI/IESNA, 2005, p.3);
- **Ponto de Fixação:** Posição na rodovia aberta cuja distância do portal de entrada equivale à Distância Segura de Frenagem (ANSI/IESNA, 2005, p.3);
- **Zona de Acesso ou de Aproximação:** Trecho de rodovia aberta entre o ponto de fixação e o portal de entrada (ANSI/IESNA, 2005, p.3);
- **Zona Limiar:** Primeiro trecho após o portal de entrada, no qual está o primeiro estágio de adaptação da visão e o maior nível de iluminação (ANSI/IESNA, 2005, p.3);
- **Zona de Transição:** Trecho que interliga a Zona Limiar e a Zona Interior. Nível de iluminação decrescente, podendo variar em estágios até a razão 1:3 (CIE, 2004, p.5; p.16);
- **Zona Interior:** Trecho entre a Zona de Transição e a Zona de Saída, no qual o nível de iluminação é mínimo (BSI, 1992, p.4);
- **Zona de Saída:** Trecho entre o final da Zona Interior e o portal de saída. Sofre influência da iluminação exterior e o nível de iluminação é crescente, podendo variar em estágios até a razão 1:3 (CIE, 2004, p.5; p.18);
- **Objeto-Crítico Objeto-Alvo ou Obstáculo de Referência:** Cubo com aresta 20 cm e refletância de 20% adotado como referência mínima para identificação pelo motorista, considerando o contraste de 0,2 entre o objeto e o fundo imediato. (CIE, 2004, p.6);

- **Emboque (obra civil)** : Trecho inicial do túnel de extensão cerca de três vezes o seu diâmetro a partir do portal (DER/SP, 2005, p.11);
- **Praça do Emboque (obra civil)**: Área na frente do portal do túnel, onde a conformação do terrapleno passa a ser adaptada e planejada para as necessidades de execução do emboque do túnel (DER/SP, 2005, p.11);
- **Emboque (adotado na pesquisa)**²⁸: Extensão total ocupada pelo emboque e praça do emboque da obra civil.

Em cada zona determina-se uma luminância específica que possibilite a adaptação visual do motorista, conforme segue:

- **Luminância da Zona Limiar (L_{th})**: Luminância média no pavimento da Zona Limiar;
- **Luminância da Zona de Transição (L_{tr})**: Luminância média no pavimento em cada estágio da Zona de Transição. Neste trabalho adotaram-se L_{ti} para a luminância inicial, limítrofe com a Zona Limiar, e L_{tf} para a luminância final, limítrofe com a Zona Interior;
- **Luminância da Zona Interior (L_{in})**: Luminância média no pavimento da Zona Interior;
- **Luminância da Zona de Saída (L_s)**: Luminância média no pavimento em cada estágio da Zona de Saída. Neste trabalho adotaram-se L_{si} para a luminância inicial, limítrofe com a Zona Interior, e L_{sf} para a luminância final, limítrofe com o portal de saída.

Quanto ao período de funcionamento do sistema de iluminação artificial adota-se a seguinte nomenclatura:

- Iluminação Diurna: 24h/dia 720h/mês (interior)
- Iluminação Diurna: 12h/dia 360h/mês (interior)
- Iluminação Noturna: 12h/dia 360h/mês (exterior)

No estudo luminotécnico de túneis apresentam-se dois fenômenos distintos. O primeiro é estático, ocorrendo quando o motorista se aproxima do portal de entrada. É conhecido por **Efeito Buraco Negro**, envolvendo a presença simultânea

²⁸ O emboque não está definido na literatura pesquisada sobre iluminação de túneis. Adotou-se a nomenclatura emboque para a região total que envolve o emboque e a praça do emboque da obra civil, englobando a região crítica do projeto luminotécnico.

no campo visual de áreas com grande diferença de brilho (entorno do portal e interior do túnel). Neste fenômeno estuda-se a visibilidade de um objeto-crítico de 20 x 20cm sobre o pavimento. O segundo fenômeno é dinâmico, quando o interior do túnel abrange todo o campo visual e uma série de diferentes luminâncias passa seqüencialmente pelo campo visual. Embora sejam fenômenos semelhantes, o primeiro ocorre lado a lado e o segundo um após o outro. Por isso, os dois fenômenos são estudados separadamente.

Basicamente, as normas e recomendações buscam dimensionar os comprimentos e luminâncias das referidas zonas. A chave do problema encontra-se na Zona Limiar, pois influencia tanto a Zona de Acesso como as zonas interiores ao túnel. O **Sistema para Adaptação Visual (SAV)**, objeto da pesquisa, deverá situar-se nas imediações do portal de entrada, podendo abranger, sobre a pista exterior, uma extensão equivalente à distância segura de frenagem, com o propósito de interferir e controlar os elementos geradores dos fenômenos citados.

4.2 PROBLEMÁTICA ENVOLVIDA NA ILUMINAÇÃO DE TÚNEIS: RETROSPECTIVA

Se por um lado são diversos os artigos publicados internacionalmente a partir de 1957, no Brasil são raros artigos ou documentos que tratam da questão. Talvez isto explique as divergências encontradas nas recomendações ABNT em relação às recomendações internacionais pesquisadas, sendo difícil encontrar fundamentação teórica em certos aspectos importantes no projeto de norma brasileiro.

Schreuder (1964) apresentou um estudo detalhado envolvendo: experimentos complexos em modelos reduzidos dinâmicos; simulação das condições que ocorrem na entrada de túneis através de painéis luminosos, para verificação estatística da percepção visual; descrição de obras existentes; aspectos técnicos, econômicos e utilização de luz natural. O trabalho de Schreuder é completo e abrange todos os tópicos determinantes da iluminação de túneis que ainda hoje são tratados. Entretanto, os resultados apresentaram valores elevados na Zona Limiar do túnel, atingindo aproximadamente três vezes o valor máximo recomendado atualmente. A razão entre as luminâncias exterior e interior 10:1 ou preferencialmente 8:1 propostas por Schreuder foram adotadas pela CIE em 1971.

Até um relativo consenso observado nas recentes edições das recomendações CIE (2004) e ANSI/IESNA (2006), houve muita pesquisa e conseqüente discussão entre os especialistas. Schreuder (1971) escreveu um artigo

identificando as discrepâncias entre as recomendações CIE e as adotadas no Japão, com severas críticas aos estudos de Narisada (1971) em que estavam baseadas as recomendações japonesas.

Quanto à razão entre as luminâncias exterior e interior, a CIE recomendava 10:1 ou preferencialmente 8:1, conforme proposto por Schreuder, mas no Japão adotava-se 42:1 (100 km/h) e 117:1 (40 km/h).

Para o valor da luminância exterior L_1 a CIE adotava 8.000 cd/m² ou aplicava a seguinte equação:

$$L_1 = \frac{L_{d1} + L_{d2} + L_{d3}}{6} \quad (60)$$

As variáveis L_{d1} , L_{d2} e L_{d3} correspondem, respectivamente, às luminâncias médias encontradas na parcela delimitada por um ângulo cônico de 20°, no campo visual do motorista, tomadas às distâncias $d_1=250m$, $d_2=150m$ e $d_3=50m$. Por ambos procedimentos, os valores de L_1 são significativamente superiores a 4.000 cd/m², adotado no Japão.

Em relação ao tempo de exposição e contraste do objeto-crítico, os experimentos de Schreuder utilizaram 0,1s e 20%, enquanto Narisada adotou 0,5s e 25%.

Schreuder discordava de Narisada em todos estes aspectos, concluindo que a experiência japonesa só era aplicável a casos específicos, enquanto a recomendação CIE era mais abrangente e confiável, podendo ser aplicada de forma geral.

Esta discussão estava introduzindo um novo enfoque, relacionado ao ponto de adaptação e ao ponto de fixação da visão do motorista. Narisada e Yoshikawa (1974) responderam às críticas de Schreuder por este novo enfoque, mostrando as diferentes premissas das recomendações japonesas e da CIE e agregando a influência da velocidade, que não era observada pela CIE. Admitiam alguns ajustes, multiplicando os valores de luminância por um fator 2 para tornar a norma japonesa mais realística e abrangente. Este fator deve-se ao tempo de exposição do objeto-crítico, que os japoneses passaram a adotar 0,1s conforme recomendado pela CIE.

Em 1974, diversos especialistas participaram de um simpósio sobre iluminação de túneis no qual, embora as divergências entre Schreuder e Narisada parecessem estar diminuindo, permaneciam discordâncias em outros aspectos,

mostrando a necessidade de mais pesquisa e aprofundamento para atingir um consenso internacional. Os principais tópicos abordados foram:

- A eficácia do uso de telas, para prover com iluminação natural o primeiro trecho do túnel, ainda não foi completamente avaliada: alguns estudos são a favor, outros contra (SCHREUDER);
- As telas para iluminação natural tiveram bom desempenho quando foram instaladas, mas após um período de uso mostraram-se deficientes (BJILLAARDT);
- Solicitou-se aos engenheiros civis facilitarem a iluminação de túneis adotando: a) cores escuras no entorno do emboque, incluindo a superfície da pista; b) altura elevada para o portal; c) paredes internas claras e de fácil limpeza; d) superfície clara na superfície da pista dentro do túnel (LOUDON);
- Observaram-se alguns aspectos relacionados às fontes de luz artificial, mencionando as lâmpadas fluorescentes e as lâmpadas de vapor de sódio de alta e baixa pressão (LOUDON / JAGO / BJILLAARDT / MÜLLER / RIEMENSCHNEIDER);
- O arranjo físico das luminárias e a distribuição da luz simétrica e assimétrica foram discutidos (MÜLLER; RIEMENSCHNEIDER);
- Os autores trataram os problemas com um enfoque muito acadêmico (WALDRAM);
- A razão 10:1 entre a luminância exterior e interior não foi adotada por todos autores. A razão entre 20:1 e 50:1 para velocidades entre 100 e 40 km/h permaneceu sendo recomendada no Japão (NARISADA).

Com tantos depoimentos díspares, foi curiosa a declaração de Boer sobre a impressão, que poderia ter ficado para o público presente ao simpósio, de que eles ainda não sabiam como iluminar túneis adequadamente e que todas as recomendações, estabelecidas até então, deveriam ser consideradas com cuidado. Entretanto, Boer conclui que estavam aptos a projetar e realizar na prática uma boa iluminação de túneis, mas admite a necessidade de mais pesquisa em condições reais, pois as recomendações CIE estavam baseadas apenas em ensaios de laboratório.

Dois anos depois, Adrian (1976) apresentaria um método de cálculo inovador, analisando não apenas o campo visual central, mas a luminância de véu²⁹ provocada pelo entorno. Aqui estava um dos pontos mais polêmicos até então e Adrian considerou um engano analisar apenas a adaptação visual na região da fóvea. O contraste C também foi abordado, avaliando o contraste reduzido C' pela influência da luminância de véu equivalente. Este aspecto já havia sido observado por Schreuder (1964), quando analisou a influência da poluição do ar na entrada do túnel, mas em seus experimentos, a luminância de véu admitida de 100 cd/m² praticamente não alterou os resultados. Adrian aplicou o mesmo conceito para a luminância de véu provocada pelo entorno, concluindo ser necessário um contraste de 35% $C = 0,35$ para garantir um contraste reduzido de 20% $C' = 0,20$.

Bommel (1980) examinou as diferenças em pontos fundamentais do projeto luminotécnico de túneis em todo o mundo. Verificou que a maioria das recomendações estava baseada na pesquisa de Schreuder: BSI, 1972 – Inglaterra; DIN, 1972 – Alemanha; IES, 1972 – Estados Unidos; AFE, 1978 – França. Apenas as normas japonesa e suíça adotavam critérios diferentes, a primeira baseada nos estudos de Narisada e Yoshikawa e a segunda na pesquisa de Mäder e Fuchs.

As telas de iluminação natural, configurando um túnel falso na Zona de Aproximação³⁰, também foram consideradas por Bommel, identificando três tipos: semi-abertas, à prova de penetração solar; abertas, permitindo a penetração solar; e fechadas, apenas com transmissão difusa. O ponto crítico das telas semi-abertas é a dimensão e forma das aberturas, pois estas devem ser pequenas o suficiente para obstruir a penetração solar, mas não podem acumular neve, o que prejudicaria seu desempenho. Além disso, as superfícies verticais da tela são importantes para conduzir a luz por reflexão, sendo consideravelmente prejudicadas pelo acúmulo de sujeira e pela dificuldade de limpeza. Outra desvantagem é que o desempenho das telas semi-abertas acompanha as variações das condições de céu.

Na análise das telas abertas, Bommel citou três razões para justificar sua não-recomendação: intermitência, equilíbrio entre luz e sombra e grande variação da transmissão da luz, devido à penetração solar. As telas fechadas também não foram recomendadas por Bommel, pois sua construção era cara e dependiam

²⁹ Ver glossário.

³⁰ Ver seção 4.3.2.

integralmente da transmissão dos elementos translúcidos, a qual era prejudicada pela sujeira depositada nas superfícies.

Adrian passou a participar com certa regularidade da discussão, mostrando coerência com suas primeiras intervenções em 1969 e 1976. Assim, construiu o **Método L_{seq}** , sintetizando os principais aspectos envolvidos na iluminação de túneis que geravam divergências entre os especialistas.

Schreuder (1988) retomou as divergências com Narisada, considerando que as discrepâncias que pareciam existir deviam-se às diferenças na seleção de parâmetros e não à fundamentação teórica. Analisou também a metodologia proposta por Adrian como uma segunda estrutura teórica aceitável.

As discussões pareciam sinalizar para um consenso. O **Método L_{seq}** foi apresentado por Adrian em 1990, constando de um diagrama polar baseado na equação de Holladay para cálculo da luminância de véu equivalente. A luminância na Zona Limiar é obtida em função da luminância de véu equivalente através de dois parâmetros: contraste ou número subjetivo de avaliação, fornecido em uma escala resultante de experimentos elaborados em simulações realísticas utilizando fotografias. Nessa época, a CIE adotava o **Método L_{20}** , herança de suas primeiras recomendações publicadas no início dos anos 70. O **Método L_{seq}** foi introduzido como anexo na CIE 88 (1990) e ANSI/IESNA RP-22-96 (1996), mas somente em 2004 (CIE) e 2005 (ANSI/IESNA) passaram a integrar o texto principal dessas publicações.

Destacam-se ainda dois aspectos específicos que foram abordados nesse período de consolidação da base teórica sobre a iluminação de túneis: a distribuição da luz e a influência da luminância de véu do pára-brisa do veículo e da atmosfera.

Mc Cullough e Ketvirtis (1983) estudaram a influência da distribuição da luz no interior do túnel, afetando o contraste e a visibilidade do objeto-crítico. Três métodos de controle e distribuição da luz foram admitidos:

- Luz direcionada transversal à pista, perpendicular à linha de visão do motorista (distribuição simétrica);
- Luz direcionada longitudinal à pista, na mesma direção da visão do motorista, favorecendo o contraste positivo (distribuição assimétrica pró-fluxo);
- Luz direcionada longitudinal à pista, na direção contrária à visão do motorista, favorecendo o contraste negativo (distribuição assimétrica contrafluxo).

A refletância do objeto-crítico era variável (16%; 28% e 58%) e os experimentos utilizaram dois tipos de fundo para representar a pista: claro (refletância 25%) e escuro (refletância 4%).

Na análise de Mc Cullough e Ketvirtis, a distribuição assimétrica pró-fluxo (IL.74) apresentou o melhor resultado, enquanto a distribuição simétrica (IL.75) teve o pior e a distribuição assimétrica contrafluxo apresentou um desempenho intermediário quanto ao contraste do objeto-crítico (IL.76). É importante observar a influência da refletância da pista na avaliação, encontrando-se no fundo escuro os piores resultados do sistema contrafluxo.

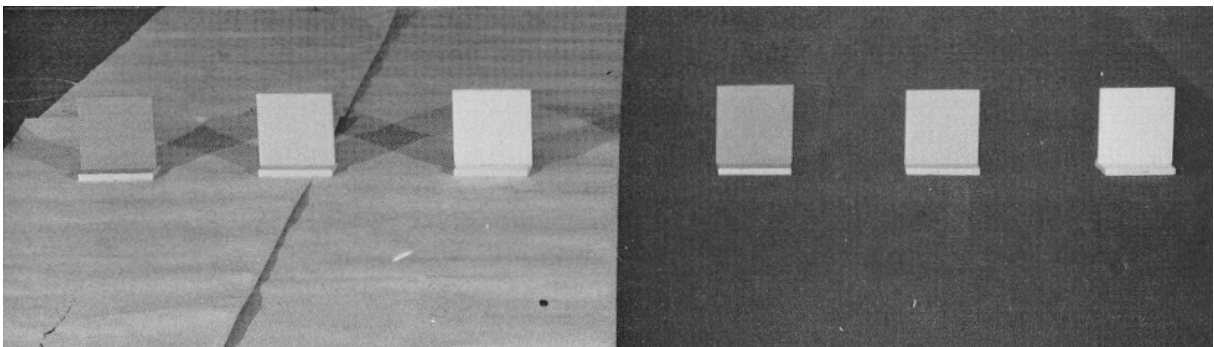


ILUSTRAÇÃO 74 – Experimento 1: Sistema Assimétrico Pró-Fluxo
FONTE - MC CULLOUGH E KETVIRTIS, 1983, p.238

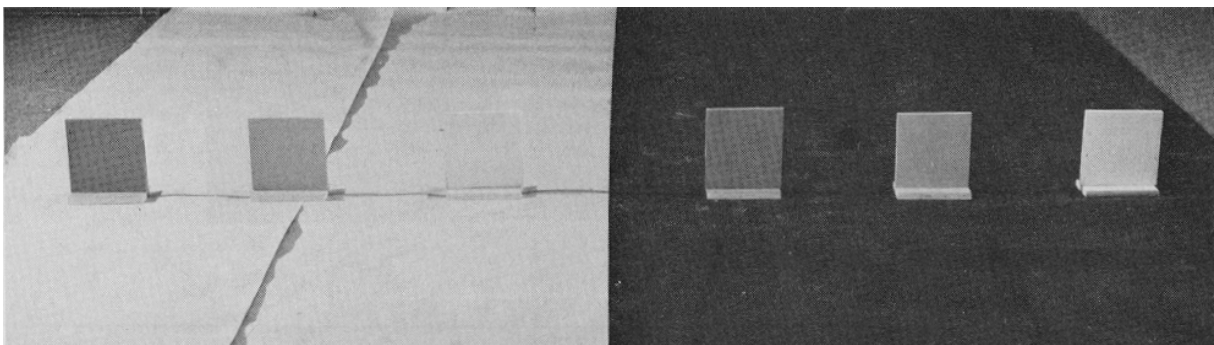


ILUSTRAÇÃO 75 – Experimento 2: Sistema Simétrico
FONTE - MC CULLOUGH E KETVIRTIS, 1983, p.239

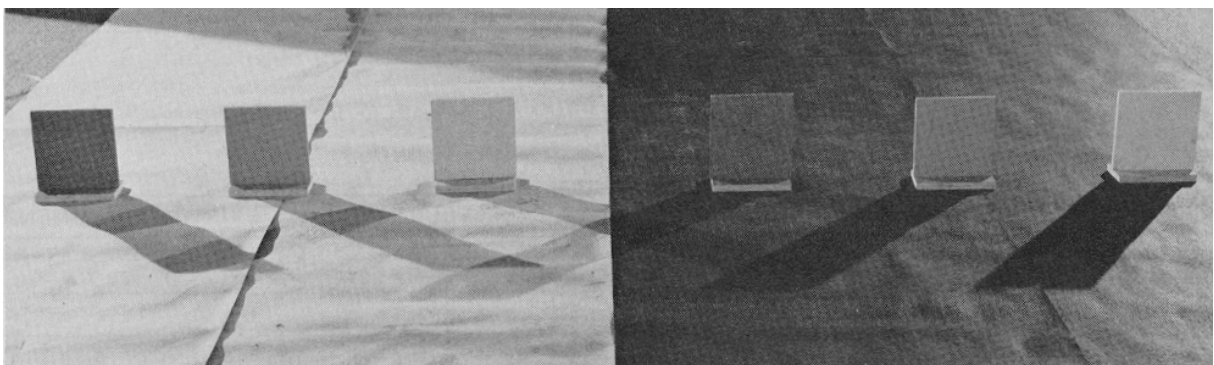


ILUSTRAÇÃO 76 – Experimento 3: Sistema Assimétrico Contrafluxo
FONTE - MC CULLOUGH E KETVIRTIS, 1983, p.239

Mesmo com o melhor desempenho das distribuições assimétricas, os resultados dos experimentos não foram conclusivos. Embora a CIE (1990) tenha adotado a influência da distribuição em suas recomendações, privilegiando o sistema contrafluxo e confirmando esta postura na última edição em 2004, ainda não existe unanimidade. A BSI (1992) considerava não haver experiência suficiente para sua recomendação e a ANSI/IESNA (1996; 2005) ainda reluta em admitir sua influência na a iluminação de túneis.

O segundo aspecto está relacionado à luminância de véu proveniente do pára-brisa do veículo e da atmosfera, havendo uma sobreposição, na retina do observador, dessas luminâncias com a imagem do objeto a ser detectado (TESSON; MONIÉ, 1989, p.171).

Foram necessárias cinco décadas para estabelecer um método de cálculo da luminância da Zona Limiar aceite internacionalmente (**Método L_{seq}**). Entretanto, os dois últimos aspectos mencionados permanecem discutíveis e interferem sobremaneira no resultado, devendo ainda ser objeto de futura pesquisa para sua consolidação.

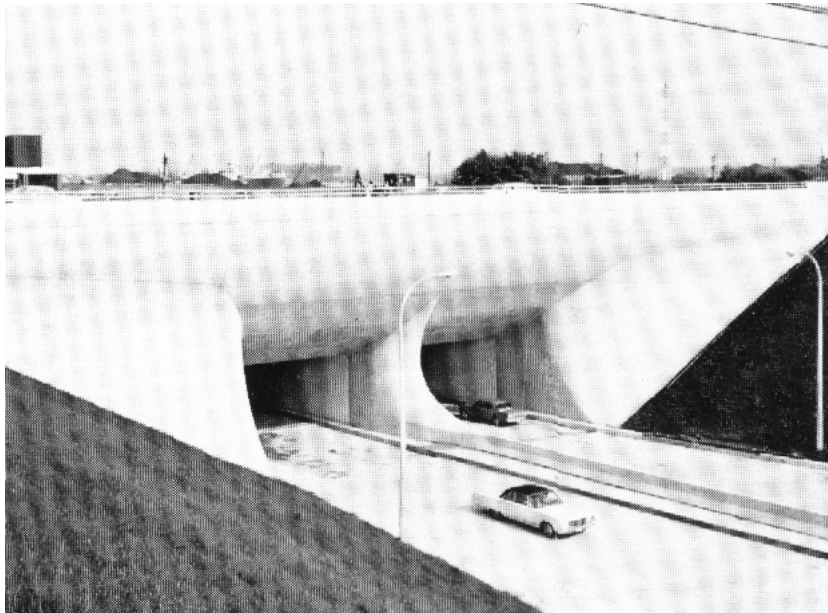
4.3 EXEMPLOS DE SISTEMAS PARA ADAPTAÇÃO VISUAL (SAV)

Conforme se observa nas discussões dos especialistas, muitos problemas e dificuldades encontradas na iluminação de túneis decorrem da falta de integração entre os projetos de engenharia civil e luminotécnico. O tom enfático de Loudon (Schreuder et al., Symposium on Tunnel Lighting, 1975, p.102), solicitando a colaboração dos engenheiros civis para facilitar o trabalho dos engenheiros eletricitas, denota como soluções adotadas na fase projetual podem favorecer a iluminação de túneis.

As obras apresentadas a seguir ilustram algumas dessas soluções, identificadas como **Sistemas para Adaptação Visual (SAV)**. Embora os exemplos selecionados envolvam certa complexidade de construção, deve-se salientar que, no apelo de Loudon, alternativas simples e de baixo custo, como a mera preocupação com cores e revestimentos, interferem significativamente nas fontes de ofuscamento do motorista.

4.3.1 TRATAMENTO DO PORTAL

Como as principais fontes de ofuscamento do motorista estão nas imediações do portal de entrada do túnel, o cuidado com o tratamento destes elementos é um importante fator a ser considerado. Este aspecto deve ser abordado na fase de projeto, pois medidas corretivas, além de serem normalmente mais onerosas, perdem em eficiência e podem se tornar inviáveis. O Túnel Thorold / Ontario / Canadá (IL.77), sob o canal Welland, é um caso típico que procurou adequar o projeto às necessidades de iluminação. O desenho diferenciado do portal foi desenvolvido com o intuito de proporcionar o aumento gradual, de cima para baixo, das áreas sombreadas, e também favorecer a penetração da luz diurna no início da Zona Limiar. Entretanto, observa-se um conflito nesse projeto resultante de suas proposições iniciais, pois se a cor clara é apropriada para o aproveitamento da luz por reflexão, ela também incrementa o ofuscamento do motorista, o que pode neutralizar o efeito idealizado na concepção. Além disso, devido à orientação Leste / Oeste dos portais, é maior a probabilidade de ofuscamento provocado pela luz direta do Sol ou pela reflexão da luz solar na superfície das águas do canal e nas áreas claras do portal.



Obra: Túnel Thorold
Extensão: 732m
Largura: 9.15 e 10.45m
Altura: 4.65m
Direção: E-O
Limite de velocidade 80 km/h
SAV: Portal com desenho diferenciado

ILUSTRAÇÃO 77-Túnel Thorold: Vista do Portal
FONTE - IES, 1972. p.251

Outro exemplo pode ser observado no Túnel Hône, Itália. A localização geográfica nas montanhas é mais favorável, configurando empenas cobertas por folhagem ou rochas escuras. O resultado formal talvez não apresente a mesma

qualidade alcançada no Túnel Thorold, mas em relação ao **Efeito Buraco Negro** é evidente o melhor desempenho dessa alternativa (IL.78).

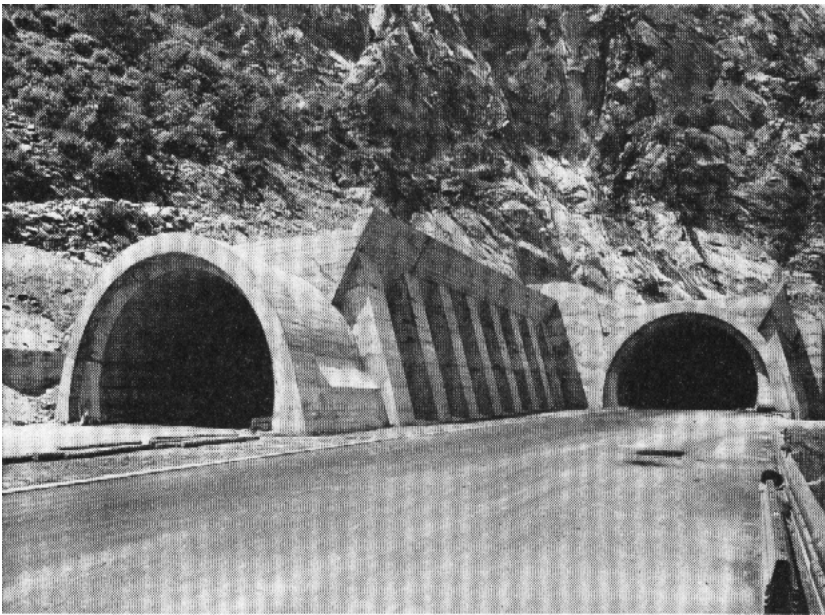


ILUSTRAÇÃO 78–Túnel Hône: Vista do Portal
FONTE – IES, 1975. p.121

4.3.2 TÚNEL FALSO

Esta opção foi aplicada em locais onde, devido à elevada latitude, é possível projetar uma tela de iluminação natural à prova de penetração solar. O princípio é similar à iluminação zenital das bibliotecas de Aalto, nas quais as paredes do poço da abertura não permitem a passagem da luz solar direta para o ambiente.

As telas são confeccionadas com espessura e malha geometricamente determinadas para obstruir os raios solares, que são aproveitados por reflexão. O túnel falso é construído na rodovia aberta antes do portal do túnel, para onde é transferida a Zona Limiar. A cobertura é executada com a tela de iluminação natural, provendo a iluminação necessária no período diurno através da luz difusa da abóbada celeste e da luz refletida nos próprios componentes da tela.

Na iluminação diurna da Zona Limiar, o túnel falso foi idealizado para proporcionar autonomia em relação à iluminação artificial. Entretanto, embora este sistema tenha apresentado bom resultado inicialmente em algumas obras em que foi instalado, a agressividade do meio prejudicou rapidamente seu desempenho, mostrando a importância da luz refletida para atingir a iluminação necessária. Esta questão foi enfocada por Bijllaardt e Schreuder (SCHREUDER et al., Symposium on Tunnel Lighting, 1975, p. 95-8; 104) considerando que, na Holanda, apenas o Túnel

Schiphol, Amsterdã (IL.79 e 80) mantinha-se adequado, de acordo com as recomendações CIE.



ILUSTRAÇÃO 79 – Túnel Schiphol: Vista do Emboque Sul
FONTE – GRAAFF In: BOER, 1967, p.659

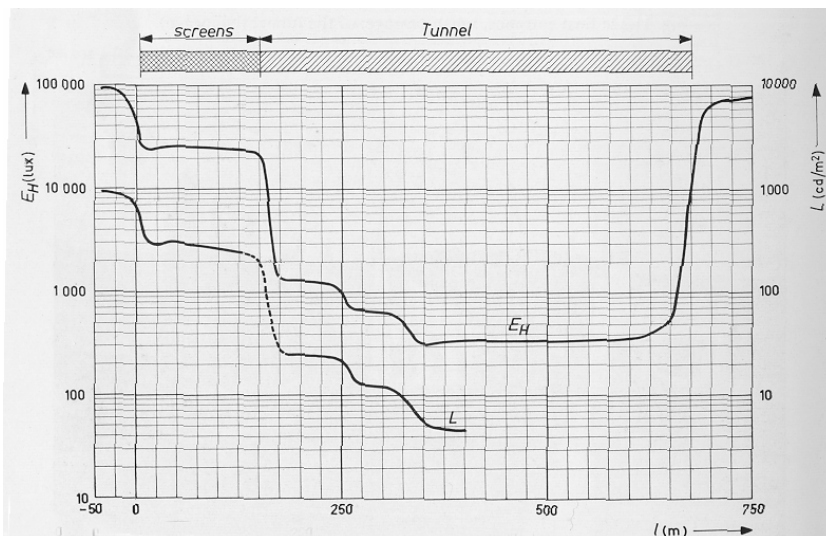


ILUSTRAÇÃO 80 – Túnel Schiphol: Iluminância e Luminância na Pista.
FONTE – GRAAFF In: BOER, 1967, p.658

Os túneis Coen (IL.81 e 82) e Velsen (IL.83 e 84) são alguns dos exemplos, identificados por Bijllaardt, em que o túnel falso apresentou problemas após um curto período de uso. Buscando melhorar a transmissão da luz, pensou-se em retirar algumas partes da tela, como no Túnel Coen (IL.85a) e no Túnel Benelux (IL.85b), mas esta experiência aumentou a possibilidade de penetração solar, prejudicando a visão do motorista.

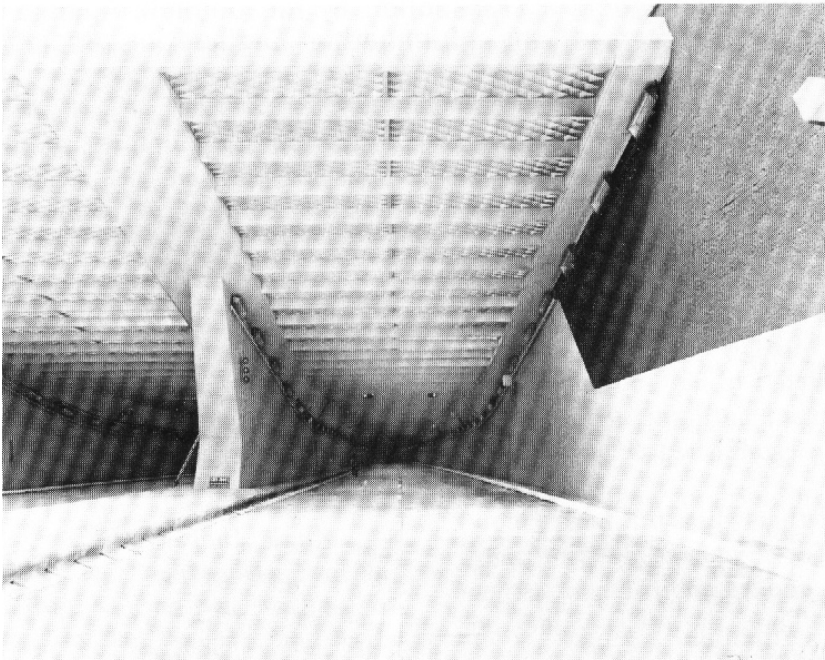


ILUSTRAÇÃO 81 - Túnel Coen: Vista do Emboque

FONTE - SUBCOMMITTEE ON LIGHTING OF TUNNELS AND UNDERPASSES IES, 1972, p.255

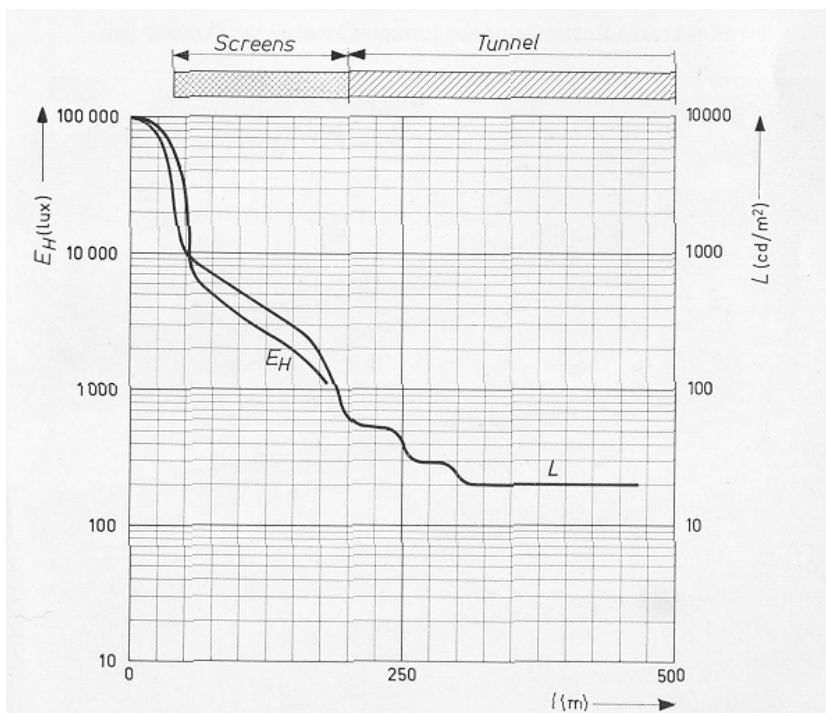


ILUSTRAÇÃO 82 - Túnel Coen: Iluminância e Luminância na Pista

FONTE - GRAAFF In: BOER, 1967, p.663

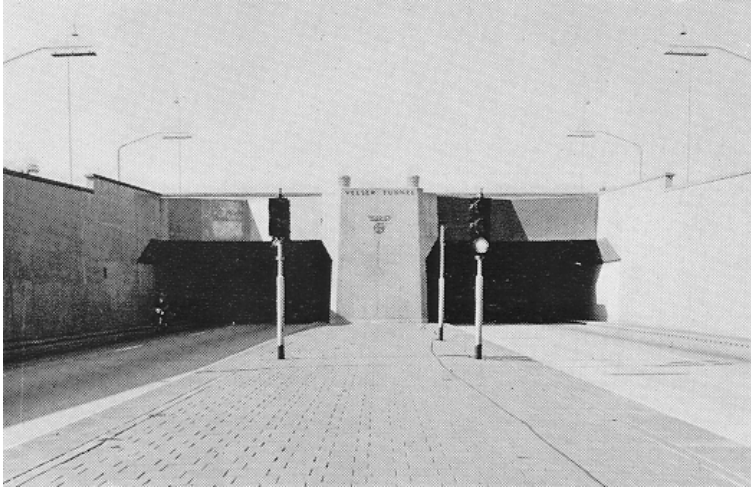


ILUSTRAÇÃO 83 – Túnel Velsen: Vista do Emboque Sul
FONTE – GRAAFF In: BOER, 1967. p.662

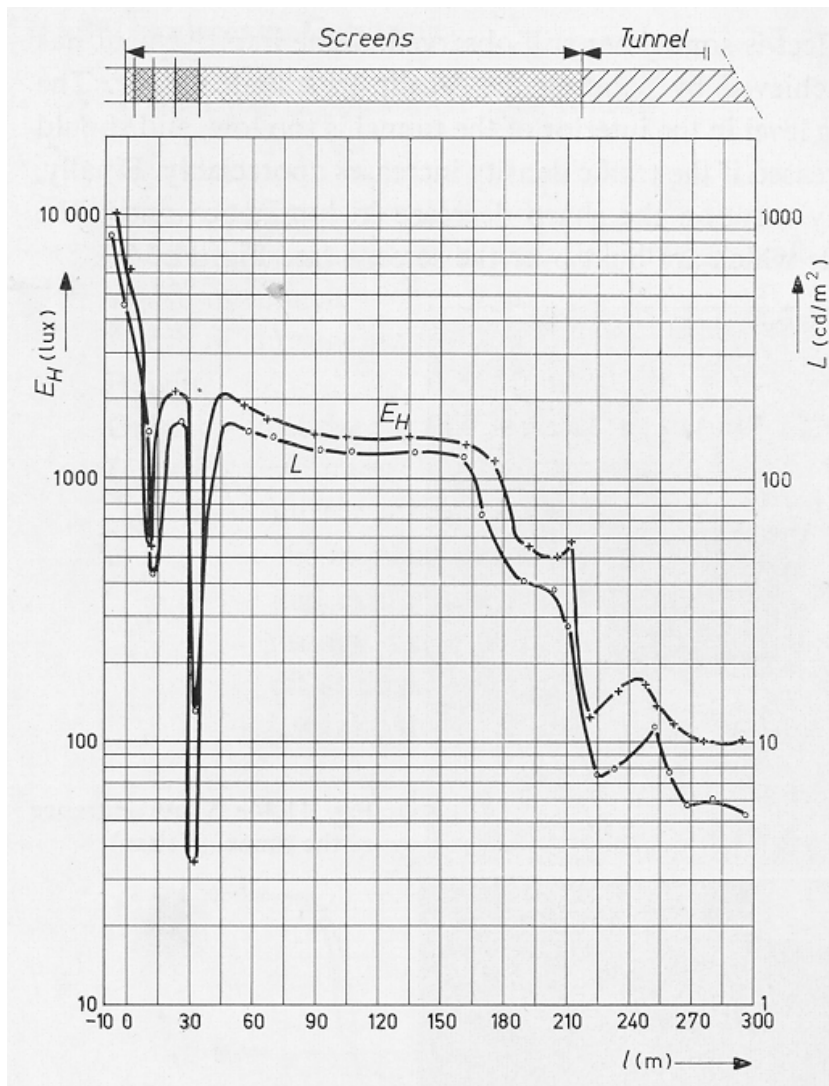


ILUSTRAÇÃO 84 – Túnel Velsen: Iluminância e Luminância na Pista
FONTE – GRAAFF In: BOER, 1967. p.663

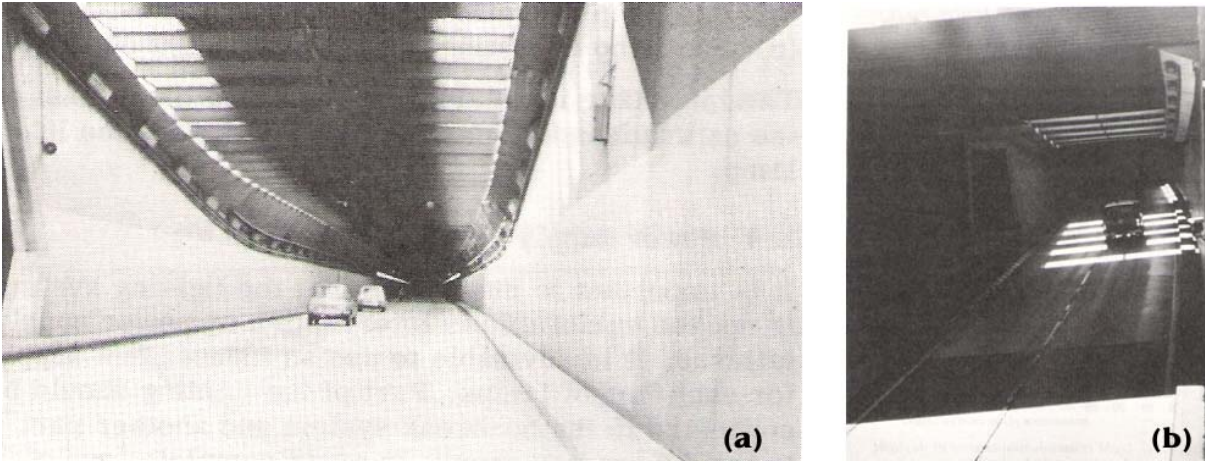


ILUSTRAÇÃO 85 – Remoção Parcial da Tela para Melhorar sua Transmissão

(a) Túnel Coen; (b) Túnel Benelux

FONTE – BIJLLAARDT In: SCHREUDER et al. 1975, p.96

Elementos construtivos opacos intercalados com vazios, na região próxima ao portal, criam vales e picos prejudiciais à visibilidade. Isto ocorre no Túnel Velsen, após a entrada do túnel falso, como se observa no gráfico do (IL.84), gerando uma ampla faixa de difícil adaptação visual no ponto crítico entre o exterior e o interior. Diferente dos demais, aqui a tela de iluminação natural foi construída em concreto, configurando uma estrutura pesada e de grades dimensões, comparada à tela metálica, resultando em problemas de intermitência.

No Túnel Nijmegen, o túnel falso apresenta uma característica peculiar pela ausência do fechamento lateral. Se por um lado favorece a iluminação difusa, a penetração solar também é abundante, comprometendo seu desempenho (IL.86 e 87).

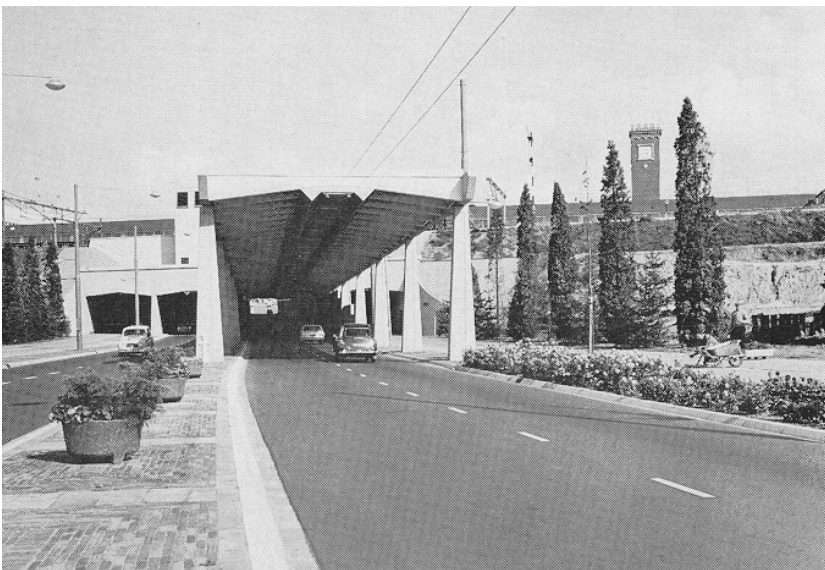


ILUSTRAÇÃO 86 – Túnel Nijmegen: Vista do Emboque Oeste

FONTE – GRAAFF In: BOER, 1967, p.657

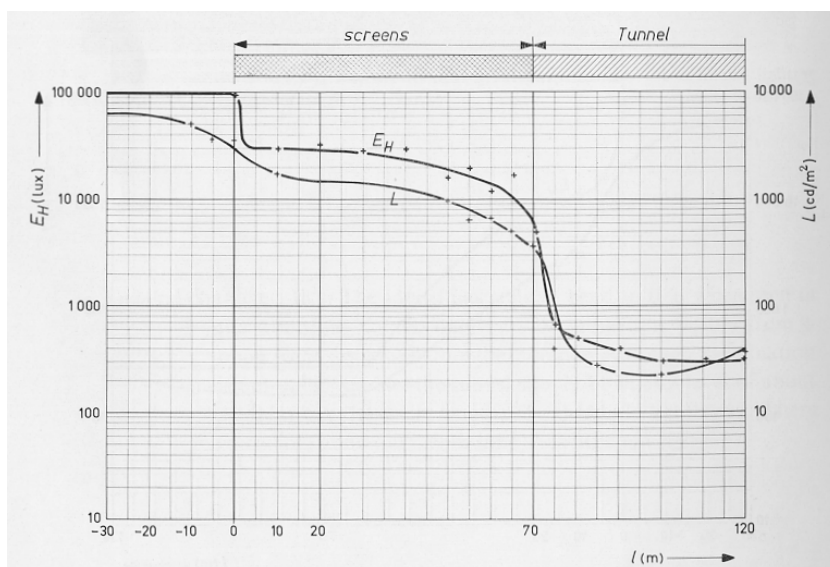


ILUSTRAÇÃO 87 – Túnel Nijmegen: Iluminância e Luminância na Pista
FONTE – GRAAFF In: BOER, 1967, p.

Analisando comparativamente as curvas de distribuição longitudinal da iluminação dos túneis Schiphol (IL.80), Coen (IL.82) e Velsen (IL.84), nota-se que, no Schiphol, além do elevado nível de iluminação atingido sob a tela, acima de 11.000 lx, a iluminância mantém-se constante, o que não ocorre no Coen, onde a iluminação decresce rapidamente entre o início e final do trecho sob a tela e, embora constante, o nível próximo de 1.500 lx no Velsen parece insuficiente, além dos saltos já observados que ocorrem no início da Zona Limiar.

Embora a curva de distribuição dos túneis Schiphol e Nijmegen aproximem-se, a penetração solar no último não garante o resultado na maior parte do período diurno, pois o Sol banha grande parte da pista. Observa-se na IL.86 o plantio de árvores altas com copa piramidal na lateral Sul do túnel falso, o que reduz a incidência do Sol na pista para o hemisfério Norte, mas esta solução não parece suficiente e talvez até aumente o problema causado pela intermitência entre claro e escuro. As características desses túneis estão resumidas na TAB.4

TABELA 4 – Túneis com Túnel Falso

Túnel	Local	Comprimento(m)		Largura (m)	Altura (m)	Orient.	Velocidade (km/h)	Observações
		Túnel	Tela					
Schiphol	Amsterdã	538	150	10,75 / 8,5	4,5	N/S	Sem Limite	Túnel sob Aeroporto
Coen	Mar do Norte	587	150	9	4,5	N/S	70	Túnel sob Canal
Velsen	Mar do Norte	768	225	9	4,5	N/S	Sem Limite	Túnel sob Canal
Nijmegen	Nijmegen	50	70	8	4,5	E/O	50	Túnel sob Viadito

FONTE – GRAAFF In: BOER, 1967, p. 655-65

4.3.3 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Este sistema de geração de energia é raro em túneis rodoviários, pois envolve alto custo de instalação e manutenção. O único exemplo encontrado está na Arábia Saudita (ERI; KACST, 2003, p.82-8), numa região montanhosa não atingida pela rede elétrica. O projeto envolvendo 13 túneis foi iniciado em 1985, optando-se por um sistema híbrido composto de módulos fotovoltaicos e geradores diesel. A escolha foi resultado da preocupação em utilizar alternativas aos combustíveis fósseis e também do baixo custo do diesel na Arábia Saudita, buscando encontrar uma solução viável. Considerando os custos de instalação e manutenção envolvidos nos dois sistemas, em 20 anos, o sistema fotovoltaico resultou no dobro do sistema diesel (TAB.5):

TABELA 5 – Custos dos Sistemas Fotovoltaico e Diesel (20 anos)

Sistema de Geração de Energia	Custos (US\$ milhões)		
	Instalação	Manutenção	Total
Fotovoltaico	4,1	1,3	5,4
Diesel	1,4	1,3	2,7

FONTE – ERI; KACST, 2003, p.87

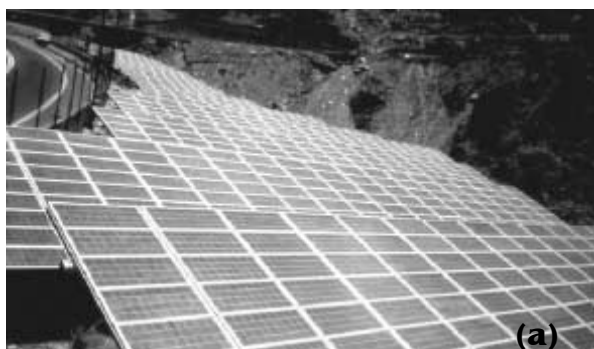


ILUSTRAÇÃO 88 – Túnel 9 Arábia Saudita
(a) Sistema Fotovoltaico (b) Vista do Emboque
FONTE – ERI; KACST, 2003, p.83-5

4.4 NORMAS E RECOMENDAÇÕES

Para uma análise comparativa³¹ selecionaram-se as seguintes normas e recomendações:

- **ABNT P-NB-318/1976:** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS;
- **ANSI/IESNA RP-22-96:** AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE / ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA;
- **CIE 88-1990:** COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE;
- **BSI BS 5458 Part 7–1992:** BRITISH STANDARDS INSTITUTION.

O critério de escolha considerou a ABNT por ser a representante brasileira perante a ISO, a IESNA e CIE por serem entidades de reconhecimento internacional, freqüentemente citadas em todo o mundo na área de iluminação, (além da IESNA ter sido aprovada pela ANSI) e a BSI como mais uma representante da ISO, mas em outro hemisfério e continente, com condições climáticas diferenciadas.

Embora haja certo consenso entre as publicações internacionais, alguns critérios diferem qualitativamente e quantitativamente. Para o propósito da iluminação, os túneis são classificados segundo suas características físicas.

4.4.1 CLASSIFICAÇÃO DOS TÚNEIS

A ABNT e ANSI/IESNA adotam duas categorias: Túnel Curto e Túnel Longo. As definições adotadas pela ABNT podem ser sintetizadas como segue:

- **Túnel Curto** – Túnel onde na ausência de tráfego, a saída é claramente visível antes da penetração no seu interior. Para objetivos de iluminação, um túnel curto tem o seu comprimento até 50m. Pode-se considerar igualmente como um túnel curto, um túnel cujo comprimento seja somente até 100m se for reto, nivelado e cuja saída pode ser claramente visível antes da penetração no seu interior;
- **Túnel Longo** – Túnel reto com mais de 50m ou túnel cuja saída não pode ser claramente visível antes da penetração no seu interior.

³¹ Esta análise é anterior às últimas edições da ANSI/IESNA (2005) e da CIE (2004) e, embora tenham sido consultadas, manteve-se a análise inicial, pois as alterações mais consistentes introduzidas ainda enfocam aspectos polêmicos, já mencionados no final da seção 4.2. Esta discussão será aprofundada na seção 4.4.8.

Para a ANSI/IESNA, os túneis são classificados em função da Distância Segura de Frenagem (*DSF*) conforme a TAB.6.

TABELA 6 – ANSI/IESNA: Velocidade X Distância Segura de Frenagem

Velocidade do Tráfego		Distância Segura de Frenagem (DSF)	
km/h	mph	m	ft
50	30	60	200
60	40	90	300
80	50	140	450
90	55	160	530
100	60	190	620
110	65	220	720

FONTE - ANSI/IESNA, 1996, p.2

- Túnel Curto – Túnel de comprimento total igual ou inferior à Distância Segura de Frenagem (*DSF*);
- Túnel Longo – Túnel de comprimento total superior à Distância Segura de Frenagem (*DSF*), ou com curvatura que impeça a visualização da saída.

A classificação é importante por influenciar o nível de iluminação no trecho crítico, a Zona Limiar. De maneira geral, o Túnel Curto não necessita de sistema de iluminação suplementar no período diurno. A penetração da iluminação exterior e o alto brilho do portal de saída são normalmente suficientes para garantir a visibilidade interior. Apenas em casos especiais como traçados em curva, ou quando a iluminação natural é restrita devido à depressão da rodovia, a iluminação suplementar pode ser requerida.

Ao considerar a influência das características do túnel, a CIE e BSI utilizam um fluxograma que relaciona o comprimento do túnel, visibilidade da saída, penetração da luz natural, refletância das paredes e volume de tráfego. A função deste fluxograma é fornecer um fator de ajuste para o nível de iluminação na Zona Limiar. A ANSI/IESNA adota o mesmo critério, mas fornece uma tabela adaptada do fluxograma recomendado pela CIE. O fator de ajuste pode ser 0%, 50% ou 100%.

4.4.2 NÍVEIS DE ILUMINAÇÃO NO INTERIOR DO TÚNEL

Como já foi observado, o ponto-chave a ser considerado no cálculo luminotécnico de túneis está na Zona Limiar.

Podem ser observados dois critérios nas recomendações pesquisadas para determinar o nível de iluminação na Zona Limiar: valores tabelados e métodos de cálculo. A ABNT adota o primeiro, a CIE e BSI o segundo, e a ANSI/IESNA adota os dois critérios. Quanto ao segundo critério, dois métodos de cálculo são adotados: **Método L_{20}** e **Método L_{seq}** que serão discutidos adiante.

4.4.2.1 ABNT

Para túneis longos, a ABNT admite uma iluminância média exterior de 54.000 lx na entrada do túnel, recomendando a seguinte seqüência de iluminâncias, no interior do túnel, em função do tempo percorrido a partir do portal de entrada:

Rodovia Aberta		54.000 lx
Portal de Entrada do Túnel		
Primeiro tempo	2s	2.700 lx
Segundo tempo	1s	900 lx
Terceiro tempo	1s	300 lx
Parte Central		100 lux

Se considerada a utilização de quebra-luz antes do portal de entrada, a seqüência de iluminâncias passa para os seguintes valores:

Rodovia Aberta		54.000 lux
Quebra-luz:		
Primeiro tempo	0,6s	16.000 lux
Segundo tempo	0,7s	5.000 lux
Terceiro tempo	0,7s	2.700 lux
Portal de Entrada do Túnel		
Primeiro tempo	1s	900 lux
Segundo tempo	1s	300 lux
Parte Central		100 lux

4.4.2.2 ANSI/IESNA, CIE E BSI

Diversamente da ABNT, a ANSI/IESNA, CIE e BSI adotam a luminância e não a iluminância como grandeza. A TAB.7 apresenta os valores para a luminância da Zona Limiar L_{th} conforme recomendação da ANSI/IESNA.

TABELA 7 – Luminância Média L_{th} para a Zona Limiar

Características do Emboque	Velocidade do Tráfego		Direção do Motorista		
			Sul (hs) Norte(hn)	Este/Oeste	Norte (hs) Sul(hn)
	km/h	mph	Luminância L_{th} (cd/m ²)		
Rodovia Aberta (cenas 1, 2, 3)	100	60	250	310	370
	80	50	220	260	320
	60	40	180	220	270
Túnel Urbano (cenas 4, 5, 6)	100	60	320	280	310
	80	50	280	240	270
	60	40	230	200	220
Túnel em Montanha (cenas 7, 8)	100	60	230	200	200
	80	50	200	170	170
	60	40	170	140	140

FONTE – ANSI/IESNA, 1996 p.7

A IL.89 mostra as cenas indicadas na primeira coluna da TAB.7.

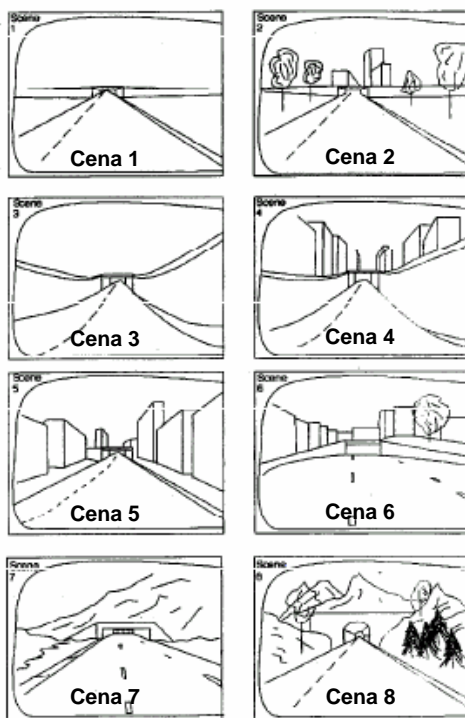


ILUSTRAÇÃO 89 – Cenas Prováveis dos Emboques
FONTE – ANSI/IESNA, 1996, p.6

Em relação ao método de cálculo, até as recentes publicações CIE (2004) e ANSI/IESNA (2005), a principal discussão no meio especializado vinha ocorrendo entre dois métodos conhecidos como **Método L_{seq}** (método da luminância de véu equivalente) e **Método L_{20}** (método da luminância média em um campo cônico de visão com abertura de 20°). Os dois métodos consistem em avaliar graficamente a influência dos elementos que interferem no campo visual do motorista posicionado no **Ponto de Fixação**.

Na seção 4.2 foi observado que, até a recente edição de 2004, a CIE propunha o **Método L_{20}** . Entretanto, considerava o método provisório e apresentava o **Método L_{seq}** em Anexo. A ANSI/IESNA citava as recomendações da CIE de maneira bastante vaga, mas enfatizava o **Método L_{seq}** , também em Anexo.

A principal crítica ao **Método L_{20}** é que, ao considerar a média das luminâncias, todos os elementos têm o mesmo impacto no campo visual, independente de sua distância em relação à linha de visão do observador. Além disso, a escolha do ângulo 20° deve-se ao equipamento de medição disponível na época, desenvolvido, especialmente, para iluminação viária (ADRIAN, 1990. p.125).

O diagrama polar proposto no **Método L_{seq}** parte de um círculo central correspondente ao ângulo cônico de 2° que é envolvido por nove anéis subdivididos em doze seções, consideradas como fontes individuais de ofuscamento (IL.90). Os ângulos de cada anel para construir o diagrama estão indicados na TAB.8.

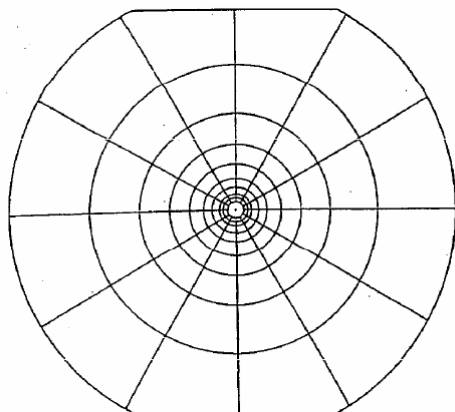


ILUSTRAÇÃO 90 – Diagrama Polar do Método L_{seq}
 FONTE - ANSI/IESNA, 1996, p.26

TABELA 8 – Ângulos para Construção do Diagrama Polar

Anel	Centro	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ângulo	2°	3°	4°	5,8°	8°	11,6°	16,6°	24°	36°	56,8°

FONTE – ANSI/IESNA, 2005 p.9

O diagrama é sobreposto a uma vista do emboque tomada a 160 m do portal de entrada, que corresponde à Distância Segura de Frenagem para a velocidade de 100 km/h (BSI, 1992, p.6). A esta distância, a altura da abertura do túnel praticamente coincide com o círculo central do diagrama. As luminâncias de cada seção dos anéis podem ser determinadas por medições *in loco* ou estimadas por valores tabelados. Como as áreas definidas pelos anéis aumentam ao se afastar do centro, sua contribuição é menor no sentido radial, pois o cálculo baseia-se no somatório das luminâncias das seções, e quanto maior a seção, menor sua influência.

Os valores de L_{seq} podem ser calculados pela equação:

$$L_{seq} = 0,5131 \cdot 10^{-3} \sum L_i \quad [\text{cd/m}^2] \quad (61)$$

Onde:

L_{seq} Luminância de véu equivalente;

L_i Luminância média de cada seção dos anéis.

A CIE apresenta dois procedimentos para a determinação de L_{20} . O primeiro fornece diretamente seu valor em função da porcentagem de céu no campo visual cônico de 20°, da orientação e características do emboque e da Distância Segura de Frenagem. O segundo procedimento é uma operação gráfica semelhante ao **Método** L_{seq} , envolvendo o somatório proporcional das luminâncias das áreas de cada elemento que é visualizado dentro do círculo representativo do ângulo cônico 20°.

Através dos valores de L_{seq} ou L_{20} , pode-se calcular a luminância do pavimento na Zona Limiar L_{th} .

O **Método** L_{20} estipula a razão $k = L_{th} / L_{20}$. O valor de k é tabelado em função da Distância Segura de Frenagem e do sistema de distribuição³² (TAB.9).

TABELA 9 – Sistema de Distribuição da Iluminação

	Sistema Simétrico ($L/E_v \leq 0.2$)	Sistema contra-fluxo ($L/E_v \geq 0.6$)
Distância Segura de Frenagem	$k = L_{th}/L_{20}$	$k = L_{th}/L_{20}$
60m	0,05	0,04
100m	0,06	0,05
160m	0,10	0,07

FONTE - CIE, 1990. p.21

³² Nas normas pesquisadas, a influência do sistema de distribuição é adotada efetivamente apenas pela CIE, em que L/E_v corresponde ao valor mínimo da razão entre a luminância do pavimento L e a luminância vertical E_v a 10 cm do pavimento, considerando uma grade de pontos definida em função da posição e altura de montagem das luminárias (ver seção 5.2.3).

Dois dos três sistemas de distribuição da iluminação no interior do túnel, apresentados na seção 4.2 (MC CULLOUGH; KETVIRTIS, 1983), são adotados pela CIE: simétrico e assimétrico com contraste negativo (contrafluxo). O sistema assimétrico com contraste positivo (pró-fluxo) não é abordado nas suas recomendações. O sistema simétrico, embora gere uma distribuição mais uniforme, apresenta baixo contraste e o sistema contrafluxo apresenta contraste negativo devido à baixa luminância do objeto em relação ao pavimento.

Alguns autores consideram o contrafluxo como o sistema mais eficiente e o pró-fluxo como o menos eficiente, sendo, portanto, descartado em novos projetos (PIMENTA, 2002). Embora pela tabela CIE observe-se uma redução de k e conseqüentemente de L_{th} no sistema contrafluxo, não há consenso quanto a este aspecto. A BSI considera que ainda falta uma comprovação satisfatória da maior eficiência do sistema contrafluxo. A CIE cita em suas referências os experimentos de Mc Cullough e Ketvirtis (1983), em que os sistemas assimétricos apresentaram melhor desempenho que o sistema simétrico, mas descarta o sistema pró-fluxo, considerado o mais eficiente em relação ao contraste, nesses experimentos. A ANSI/IESNA define os três sistemas de iluminação e suas características, mas não esclarece sobre sua aplicação.

Existem dois meios correlatos para determinar o valor de L_{th} , utilizando-se o **Método L_{seq}** : avaliação subjetiva experimental e contraste visível do objeto-alvo. Foram feitas simulações realísticas em grandes painéis fotográficos iluminados por trás para a obtenção das luminâncias como ocorre na prática. Com controle independente das luminâncias do entorno e da entrada do túnel, a avaliação do observador é feita segundo uma escala numérica, associada a um critério subjetivo SRN ³³ (TAB.10).

TABELA 10 – Critério Subjetivo de Avaliação

SRN	Critério
1	Buraco Negro
3	Inadequado, entrada muito escura
5	Justo, suficiente para uma entrada segura
7	Bom, o motorista sente segurança para entrar no túnel
9	Excelente

FONTE – ANSI/IESNA, 1996 p.28

³³ SRN: Safety Rating Number.

O valor de L_{th} pode ser obtido pela equação:

$$L_{th} = 10^{(SRN-4.1)/6} L_{seq} \quad [\text{cd/m}^2] \quad (62)$$

Aplicando-se a equação (62) para $SRN=5$, a razão L_{th}/L_{seq} é 1,413, portanto:

$$L_{th} = 1,413 L_{seq} \quad [\text{cd/m}^2] \quad (63)$$

Os valores da TAB.10 foram determinados para a distância de 160m do portal, correspondente à Distância Segura de Frenagem na velocidade de 100 km/h. À medida que se aproxima da entrada do túnel, as áreas no campo visual são mais escuras, pois a própria abertura do túnel é mais significativa. Como a distância do portal a ser considerada depende da velocidade, a TAB.11 relaciona a razão L_{th}/L_{seq} com a velocidade do tráfego.

TABELA 11 – Razão Recomendada L_{th} / L_{seq}

Velocidade do Tráfego	L_{th} / L_{seq}	
	SRN=5	SRN=4.7
100 km/h	1,41	1,26
80 km/h	1,26	1,09
60 km/h	1,04	0,93

FONTE - ANSI/IESNA, 1996, p.28

Se for adotado o contraste visível do objeto-alvo C , o valor de L_{th} é dado pela equação (64).

$$L_{th} = \frac{L_{seq}}{5,963 C - 1} \quad [\text{cd/m}^2] \quad (64)$$

A IL.91 representa as curvas de contraste C e SRN em função de L_{th} e L_{seq} .³⁴ O número de avaliação subjetiva SRN , representado na figura por linhas tracejadas, segue em paralelo às linhas determinadas pelo contraste C . Verifica-se que SRN igual a 5 corresponde ao contraste 0,285, dentro da faixa normalmente utilizada para caracterizar a tarefa visual do motorista em rodovias³⁵.

³⁴ L_{th} corresponde a L_2 no gráfico da IL.91.

³⁵ Considera-se o contraste nestes experimentos entre 0,25 e 0,30.

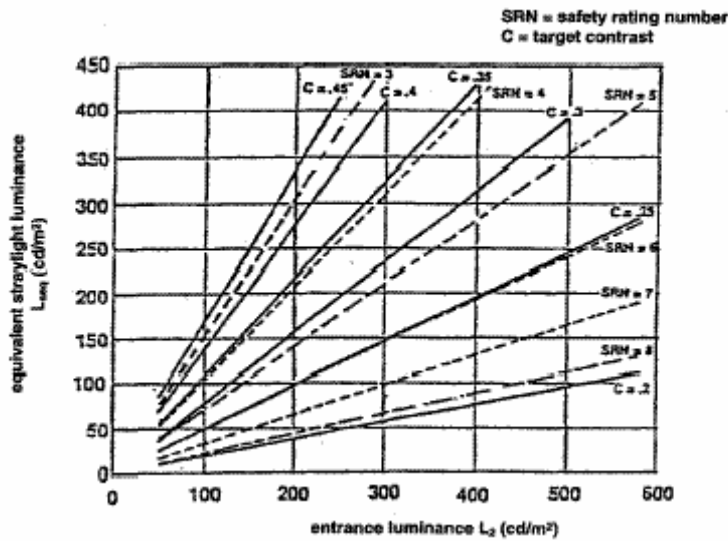


ILUSTRAÇÃO 91 - Contraste C e SRN em Função da Luminância
 FONTE - ANSI/IESNA, 1996, p.27

A estreita correlação observada permite a conversão entre o contraste visível do objeto-alvo C e o número subjetivo SRN (IL.92) e, portanto, pode-se aplicar qualquer um dos parâmetros para a obtenção de L_{th} .

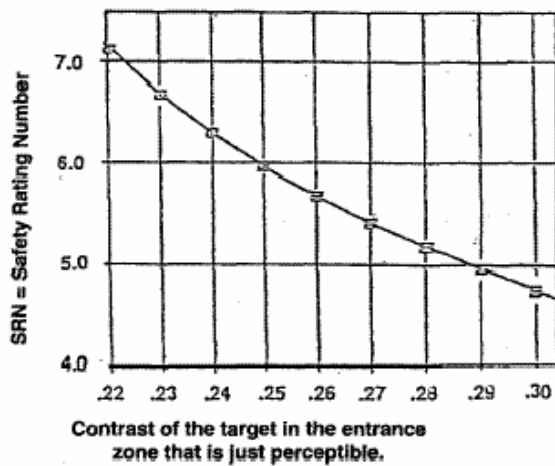


ILUSTRAÇÃO 92 - Relação entre SRN e Contraste
 FONTE - ANSI/IESNA, 1996, p.29

4.4.3 PONTO DE ADAPTAÇÃO

Outro conceito importante é o **Ponto de Adaptação**, que indica a posição em que a abertura do túnel toma todo o campo visual do motorista antes do início da Zona Limiar. Em algumas recomendações, o **Ponto de Adaptação** pode ser considerado o início da Zona Limiar, conseqüentemente diminuindo sua extensão. Quanto a este aspecto, verifica-se:

- A BSI adota o **Ponto de Adaptação** geometricamente onde o ângulo vertical de 10°, partindo do plano de visão do motorista (altura de 1,5m), encontra o topo da abertura do túnel³⁶;
- A ANSI/IESNA utiliza o mesmo procedimento, mas para uma altura de 1,45m e ângulo vertical entre 22° e 25°;
- A CIE desconsidera o **Ponto de Adaptação**.

A diferença de critério entre a BSI e ANSI/IESNA quanto à posição do **Ponto de Adaptação** pode ser atribuída à diferença de métodos recomendados. O ângulo 10° corresponde ao **Método L₂₀** e o ângulo entre 22° e 25°, ao **Método L_{seq}**.

4.4.4 EXTENSÕES DAS ZONAS

Quanto ao comprimento das zonas, a ANSI/IESNA recomenda para a Zona Limiar a Distância Segura de Frenagem D_{SF} subtraída da distância do emboque ao Ponto de Adaptação d .

A recomendação da BSI é semelhante. Apenas adiciona 20m à subtração e utiliza o maior valor entre 40m e $D_{SF} + 20 - d$.

A CIE adota diretamente o valor D_{SF} para o comprimento da Zona Limiar, mas permite um redutor nesta dimensão como será visto na Zona de Transição.

Para a Zona de Transição, a recomendação da ANSI/IESNA é o valor D_{SF} , diversamente da BSI e CIE, que propõem métodos gráficos. O método utilizado pela BSI é de relativa complexidade, utilizando curvas de redução da luminância em função da velocidade do tráfego. A CIE apresenta um gráfico mais simples, pela leitura direta da extensão em função da velocidade do tráfego e da luminância em relação percentual a L_{th} . Um aspecto importante mencionado pela CIE é a possibilidade em iniciar a diminuição gradual da luminância a partir de metade da Zona Limiar, redução esta que pode atingir até 0.4 L_{th} .

Em todas as recomendações, a graduação na Zona de Transição pode ser feita em patamares, o que facilita operacionalmente o sistema, embora o maior conforto para o motorista seja obtido acompanhando as curvas dos gráficos.

A luminância média necessária na zona interior L_{in} é obtida em função da velocidade e volume de tráfego. Embora o critério seja o mesmo, os valores variam.

³⁶ O Ponto de Adaptação recomendado pela BSI está detalhado na seção 7.1.5.1.

Nas tabelas da ANSI/IESNA e BSI, os valores de L_{in} variam entre 3 e 10 cd/m^2 . Nas recomendações da CIE, os valores vão de 1 a 15 cd/m^2 .

A Zona de Saída é a menos problemática. A adaptação visual para a alta luminância exterior ocorre rapidamente. A ANSI/IESNA não apresenta nenhuma recomendação para esta zona no período diurno. A CIE e a BSI observam que a iluminação deverá evitar que pequenos objetos possam ficar ocultos atrás de grandes veículos pelo ofuscamento da saída. Além disso, os motoristas deverão estar habilitados à visão pelo espelho retrovisor ao saírem do túnel, principalmente onde a ultrapassagem é permitida. Ambas consideram suficiente o valor de cinco vezes L_{in} . Para a BSI, a extensão deve ser, em metros, igual à velocidade permitida em quilômetros por hora e, para a CIE, 60 m antes do portal de saída.

4.4.5 INTERMITÊNCIA

Todas as normas pesquisadas fazem recomendações quanto ao efeito estroboscópico resultante da velocidade e do espaço entre luminárias. Adotam-se faixas de frequência a serem evitadas. Para a ABNT e ANSI/IESNA esta faixa está entre 5 e 10 Hz. A CIE adota que o efeito é desprezível abaixo de 2,5 Hz e acima de 15 Hz, e a BSI acrescenta o comprimento do túnel ou da zona na avaliação da intermitência, apresentando quatro gráficos para os comprimentos 125, 250, 500 e 1.000m. Considerando-se todos os gráficos, a faixa a ser evitada está entre 2,5 e 13 Hz aproximadamente. O valor mínimo é sempre o mesmo, mas o máximo varia entre 7 e 13 Hz.

4.4.6 UNIFORMIDADE

Apenas a ABNT não faz qualquer recomendação quanto à uniformidade. As demais normas adotam os seguintes valores como referência, relacionando as luminâncias mínima L_{min} , média L_{med} e máxima L_{max} :

- **BSI e CIE** $L_{min} / L_{med} = 0,6$ (eixo longitudinal de cada faixa)
- **CIE** $L_{min} / L_{med} = 0,4$ (pista e paredes até $h=2,00\text{m}$)
- **IESNA** $L_{min} / L_{med} = 1/2$ (pista)
- $L_{min} / L_{max} = 1/3,5$ (pista)

Para facilitar a visualização comparativa entre as normas e recomendações analisadas, elaborou-se uma tabela resumo (TAB. 12) com os principais aspectos observados.

4.4.7 ANÁLISE COMPARATIVA: TABELA RESUMO

TABELA 12 – Análise Comparativa: CIE; BSI; ANSI/IESNA; ABNT

(Continua)

CLASSIFICAÇÃO DOS TÚNEIS			
	Tipo	Comprimento (m)	Observações
CIE CIE 88-1990	Não Considera (ver obs.)	Indicado em Fluxograma < 25 entre 25 e 75 entre 75 e 125 > 125	Embora não considere o tipo do túnel (longo ou curto), o fluxograma adota uma classificação similar.
BSI BS 5489-92	Considera Túnel Curto e Túnel Longo	Indicado em Fluxograma < 25 entre 25 e 50 entre 50 e 100 > 100 (túnel longo)	Critério semelhante ao utilizado pela CIE
ANSI IESNA RP-22-96	Considera Túnel Curto e Túnel Longo em função de DSF (entre 60 e 220m) Curto < DSF < Longo	Indicado em Tabela < 25 entre 25 e 75 entre 75 e 125 > 125	Apresenta uma tabela adaptada do fluxograma CIE
ABNT P-NB-318	Considera Túnel Curto e Túnel Longo	Túnel Curto < 50m (100m)* Túnel Longo > 50m (100m)* * Para saída visível	Considera a visualização da saída do túnel na classificação

TABELA 12 – Análise Comparativa: CIE; BSI; ANSI/IESNA; ABNT

(Continua)

		ZONA LIMIAR			
		Comprimento	Luminância	Ponto de	
Método	(m)	L_{th}	(cd/m ²)	Adaptação	Observações
				(P.A.)	
CIE CIE 88-1990	L_{20}	D_{sf} 60 - 100 - 160	Não estimado	Não Considera	<p>Considera Tela de Iluminação Natural.</p> <p>O Sistema de Distribuição afeta L_{th}.</p> <p>Permite uma redução até 0,4 L_{th} a partir de metade do comprimento</p>
BSI BS 5489-92	L_{20}	$D_{sf} + 20 - d$ Dsf entre 50 e 215 d = função de P.A.	Não estimado	ângulo = 10°	<p>Considera Tela de Iluminação Natural.</p> <p>O Sistema de Distribuição não afeta L_{th}, embora cite os sistemas simétrico e assimétrico.</p> <p>Início da Zona Limiar no Ponto de Adaptação.</p>
ANSI IESNA RP-22-96	L_{seq}	$D_{sf} - d$ Dsf entre 60 e 220 d = função de P.A.	entre 140 e 370	ângulo entre 22° e 25°	<p>Considera Tela de Iluminação Natural.</p> <p>Considera os sistemas simétrico e assimétrico de distribuição, mas não esclarece sua aplicação</p> <p>Início da Zona Limiar no Ponto de Adaptação</p>
ABNT P-NB-318	Não utiliza	<p>Por tempo = 2s</p> <p>60km/h 33,3m</p> <p>100km/h 55,5m</p> <p>120km/h 66,6m</p>	<p>Recomenda iluminância = 2.700 lux</p> <p>Refletância entre 0,1 e 0,3</p> <p>Tem-se L_{th} entre 86 e 260</p>	<p>Não Considera. Adota uma redução de 110.000 para 54.000 lux na iluminância (Entrada do Túnel)</p>	<p>Considera Tela de Iluminação Natural.</p> <p>O Sistema de Distribuição não afeta L_{th}</p> <p>As recomendações são em lux (iluminância)</p> <p>O comprimento é em função do tempo</p>

TABELA 12 – Análise Comparativa: CIE; BSI; ANSI/IESNA; ABNT

(Continua)

ZONA DE TRANSIÇÃO			
	Método	Comprimento	Observações
CIE CIE 88-1990	Gráfico	Para 8s tem-se: 60km/h 133m 100km/h 222m 120km/h 266m	Para $L_{ti}=0,4 L_{th}$ reduz em 8s para 1/10 de L_{ti} Permite partamares 3:1 (Adotou-se L_{ti} como Luminância inicial da Zona de Transição)
BSI BS 5489-92	Gráfico	Para 10s tem-se: 60km/h 166m 100km/h 277m 120km/h 333m	Em 10s reduz para 1/10 L_{ti} Permite partamares 3:1 (Adotou-se L_{ti} como Luminância inicial da Zona de Transição)
ANSI IESNA RP-22-96	Gráfico	D_{sf} (entre 60 e 220)	Em 10s reduz para 1/10 L_{ti} Permite partamares 3:1 (Adotou-se L_{ti} como Luminância inicial da Zona de Transição)
ABNT P-NB-318	Não	Por tempo = 2s 60km/h 33,3m 100km/h 55,5m 120km/h 66,6m	Em 2s reduz para 1/9 E_{ti} Permite partamares 3:1 (Adotou-se E_{ti} como iluminância inicial da Zona de Transição)

TABELA 12 – Análise Comparativa: CIE; BSI; ANSI/IESNA; ABNT

(Continua)

ZONA INTERIOR / ZONA DE SAÍDA			
	Método	Zona Interior Luminância L_{in} (cd/m ²)	Zona de Saída Observações
CIE CIE 88-1990	Tabela em função do volume de tráfego. (Média Anual do Tráfego Diário) e velocidade	entre 1 e 15	Observar na Zona de Saída 1) Pequenos objetos ocultos atrás de grandes veículos; 2) Visão do espelho retrovisor; 3) $L_{saída} = 5 L_{interior}$; 4) Comprimento=60m.
BSI BS 5489-92	Tabela A luminância é obtida em função da velocidade e categoria da estrada	entre 3 e 10	Idem CIE 1; 2; 3 Comprimento = Velocidade
ANSI IESNA RP-22-96	Tabela em função do volume de tráfego. (Média Anual do Tráfego Diário) e velocidade	entre 3 e 10	Não faz qualquer recomendação para a Zona de Saída
ABNT P-NB-318	Indica iluminância fixa de 100 lux	iluminância 100 lux Refletância entre 0,1 e 0,3 Lin entre 3 e 10	Não faz qualquer recomendação para a Zona de Saída

TABELA 12 – Análise Comparativa: CIE; BSI; ANSI/IESNA; ABNT

(Conclusão)

Considerações Gerais			
	Intermitência	Uniformidade	Orientação do Portal
CIE CIE 88-1990	Desprezível abaixo de 2,5Hz e acima de 15Hz	Faixa : $L_{min}/L_{med}=0,6$ Pista e Parede até $h=2m$: $L_{min}/L_{med} = 0,4$	Considera
BSI BS 5489-92	Adiciona na avaliação o comprimento do túnel ou zona e apresenta 4 gráficos. Faixa a evitar entre 2,5 e 13Hz	Faixa : $L_{min}/L_{med}=0,6$	Considera
ANSI IESNA RP-22-96	Apresenta ábaco relacionando frequência e distância entre luminárias e velocidade do tráfego. Faixa a evitar entre 5 e 10Hz	$L_{min}/L_{med}=1/2$ $L_{min}/L_{max} = 1/3,5$	Considera
ABNT P-NB-318	Faixa a evitar entre 5 e 10Hz	Não Considera	Não Considera

4.4.8 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS RECENTES EDIÇÕES CIE E ANSI/IESNA

Algumas das principais alterações introduzidas nas edições atualizadas CIE (2004) e ANSI/IESNA (2005) já foram mencionadas no final da seção 4.2, destacando dois aspectos ainda polêmicos: a distribuição da luz, configurando os sistemas simétrico e assimétrico; a influência da atmosfera e da luz refletida no pára-brisa do veículo. Por outro lado, a aceitação de um único método de cálculo da iluminação para a Zona Limiar (**Método L_{seq}**) representa um importante avanço na teoria aplicada à iluminação de túneis aceita internacionalmente.

Entretanto, os dois aspectos ainda discutíveis que foram incorporados pela CIE influenciam sobremaneira no resultado. O primeiro possibilita sensível redução da luminância na Zona Limiar, mas o segundo incrementa a luminância de véu equivalente pela influência da atmosfera e da face interna do pára-brisa.

O método proposto fundamenta-se no conceito do contraste percebido e modifica a equação do **Método L_{seq}** para obtenção da luminância na Zona Limiar L_{th} , adotando a seguinte equação:

$$L_{th} = \frac{L_m}{\frac{1}{C_m} \left(\frac{\rho}{\pi \cdot q_c} - 1 \right) - 1} \quad [\text{cd/m}^2] \quad (65)$$

Onde:

$$L_m = \frac{(\tau_{ws} \cdot L_{atm} + L_{ws} + L_{seq})}{(\tau_{ws} \cdot \tau_{atm})}$$

C_m Contraste mínimo percebido (adotado -0,28);

ρ Refletância do objeto-crítico (adotado 0,20);

q_c Coeficiente de revelação do contraste;

τ_{ws} Transmitância do pára-brisa;

τ_{atm} Transmitância da atmosfera;

L_{atm} Luminância de véu da atmosfera;

L_{ws} Luminância de véu do pára-brisa;

L_{seq} Luminância de véu equivalente;

Para o coeficiente q_c a CIE adota 0,2 no sistema simétrico e 0,6 no sistema contrafluxo, não fazendo nenhuma recomendação para o sistema pró-fluxo.

Para ilustrar o método proposto, a CIE apresenta um exemplo em que a luminância de véu equivalente L_{seq} é 183 cd/m². Aplicando a equação (65), as luminâncias na Zona Limiar L_{th} para o sistema simétrico e assimétrico contrafluxo são, respectivamente, 386 e 253 cd/m². Pela equação (63), equação original proposta por Adrian em 1990, o resultado corresponde a 259 cd/m², praticamente o mesmo valor obtido pela CIE para o sistema assimétrico contrafluxo. Portanto, segundo o método proposto pela CIE, no sistema simétrico há um incremento da ordem de 50% na iluminação da Zona Limiar em relação ao sistema assimétrico. Se por um lado, parece procedente a preocupação com o acréscimo na luminância de véu pela influência da atmosfera e do pára-brisa do veículo, considerar esta influência sem admitir a redução do sistema contrafluxo pode levar a valores tão elevados que inviabilizem sua aplicação prática. No exemplo apresentado, foram admitidos valores médios para as luminâncias de véu da atmosfera e do pára-brisa, mas existem outras opções para estes valores que poderão reduzir ou aumentar o resultado no cálculo de L_{th} (TAB.13).

TABELA 13 – Luminâncias de Véu da Atmosfera e do Pára-Brisa

Níveis de Véu	Alto	Médio	Baixo
Luminância de Véu da Atmosfera (cd/m ²)	300	200	100
Luminância de Véu do Pára-Brisa (cd/m ²)	200	100	50

FONTE – CIE, 2004 p.8

Diversos fatores influenciam na luminância de véu. Se considerarmos a atmosfera, além das condições climáticas e do meio urbano ou rural, os gases emitidos pelos veículos, os períodos de calma ou a forte ocorrência de ventos irão compor diversos cenários e dificultarão a escolha nos níveis de véu indicados na TAB.13. Quando analisamos o pára-brisa, esta dificuldade aumenta, pois tanto a diversidade de cores e formas, que compõem os painéis e pára-brisas dos veículos, como a limpeza desses elementos e a altura solar interferem no fenômeno. Desta forma, o critério de escolha parece arbitrário, e a opção pelo nível médio que se observa no exemplo CIE pode revelar a falta de elementos necessários para uma escolha mais bem fundamentada.

A iluminação proveniente do portal do túnel não pode ser desprezada, sendo mais um agravante para o sistema contrafluxo, pois a penetração da luz diurna é desfavorável neste caso. A luz natural configura um sistema pró-fluxo no início da Zona Limiar, e haverá necessariamente um momento de transição quando se utiliza o sistema contrafluxo em um ponto crítico da iluminação, prejudicando a visibilidade.

Outra abordagem que mostra um novo enfoque, adotada pela CIE, é quanto à penetração solar pelas telas de iluminação natural. Observaram-se algumas críticas, na seção 4.2, em relação ao desempenho destas telas com o passar do tempo, pois sua transmitância decresce rapidamente devido à agressividade do meio. A obstrução total da luz solar direta pelas aberturas da tela sempre foi uma das premissas, mas atualmente, a CIE recomenda a penetração solar para suprir as deficiências detectadas nas telas existentes, desde que não provoque intermitência na faixa de desconforto.

Mesmo considerando o longo período passado das edições analisadas na seção 4.4, houve pouco avanço nas edições atualizadas quanto à teoria e prática aplicada à iluminação de túneis, mas o consenso internacional em certos aspectos corroborou noções fundamentais deste conhecimento. Assim, os parâmetros que serão adotados na pesquisa não incorporam as questões ainda discutíveis apresentadas nas recentes edições CIE e ANSI/IESNA, mantendo-se a referência nas edições anteriores, mas utilizando as edições atualizadas para complementação.

4.5 A PRÁTICA BRASILEIRA

O Projeto de Norma ABNT P-NB-318, ainda em estágio experimental, tem sido um referencial nos projetos luminotécnicos dos túneis brasileiros. Na análise comparativa da seção anterior, observou-se que a metodologia proposta pelo Projeto de Norma ABNT difere das normas internacionais, afetando significativamente nos resultados.

Embora a ABNT considere a possibilidade de utilização de quebra-luz³⁷, não há recomendação detalhada quanto a aspectos técnicos importantes em seu desempenho, e este fato pode ser observado nos emboques que adotaram tal recurso. Raramente o quebra-luz é concebido para controle da luz, mas para suprir

³⁷ O quebra-luz da norma corresponde ao DAV deste trabalho, que será discutido no Capítulo 5.

necessidades estruturais, comum em pérgolas que provocam uma intermitência de claro e escuro extremamente prejudicial à adaptação visual (IL.93).



ILUSTRAÇÃO 93 – Passagem Inferior Zerbini: Emboque com Pérgola

Em São Paulo, o vandalismo e furto das instalações elétricas têm levado a posturas extremas do poder público, desistindo da reposição em diversos casos, como na Praça Roosevelt e no Túnel Tribunal de Justiça, onde a iluminação suplementar na Zona Limiar não existe mais até a presente data. No Túnel da Mata Fria (Rodovia Fernão Dias), sem iluminação desde abril de 2004 até final de 2006, o DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Estrutura de Transportes optou pela instalação de uma placa avisando que, devido aos furtos, o túnel não tem iluminação, solicitando aos motoristas para reduzirem a velocidade e acenderem os faróis.

Como são raros os artigos técnicos nacionais que tratam do assunto, é grande a dificuldade de obter informações sobre a iluminação dos túneis brasileiros existentes. Através de consulta à documentação técnica no Departamento de Iluminação pública da Prefeitura de São Paulo (ILUME), foram coletadas informações sobre o sistema de iluminação dos seguintes túneis:

- Túnel Ayrton Senna;
- Túnel Max Feffer;
- Túnel Jânio Quadros;
- Túnel Tribunal de Justiça;
- Passagem Tom Jobim;
- Túnel Anhangabaú;
- Túnel Maria Maluf;
- Túnel Sebastião Camargo;

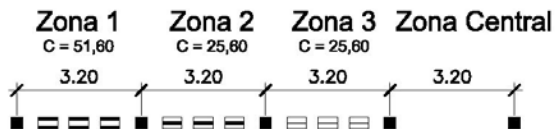
Observou-se em todos estes túneis a preocupação em seguir o Projeto de Norma ABNT P-NB-318, confirmando a importância das orientações normativas na prática brasileira. Os tempos recomendados configuram três zonas. A Memória de Cálculo do Túnel Maria Maluf adota exatamente os valores de tempo e iluminância recomendados pela ABNT. Nos demais túneis, os valores de iluminância foram considerados um pouco abaixo da recomendação e os comprimentos das zonas estão conforme a ABNT. A Zona 1 com comprimento em torno de 45m e as Zonas 2 e 3 com comprimentos de aproximadamente 23m, correspondendo aos tempos de 2 segundos para a Zona 1 e 1 segundo para as Zonas 2 e 3.

A IL.94 é uma representação esquemática das zonas e do posicionamento e tipo das luminárias instaladas em alguns destes túneis. Em cada zona está indicado seu comprimento total e a cota correspondente ao módulo adotado. As principais características observadas que diferenciam cada sistema são: a Iluminação indireta dos Túneis Ayrton Senna e Jânio Quadros, as luminárias com lâmpadas fluorescentes no Túnel Tribunal de Justiça, as luminárias assimétricas do Túnel Max Feffer e as luminárias utilizando sempre a mesma lâmpada no Túnel Maria Maluf.

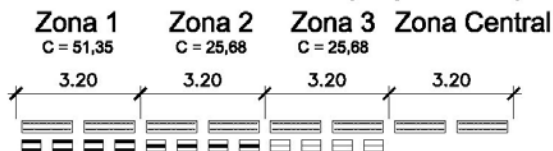
Túnel Ayrton Senna (70 km/h)



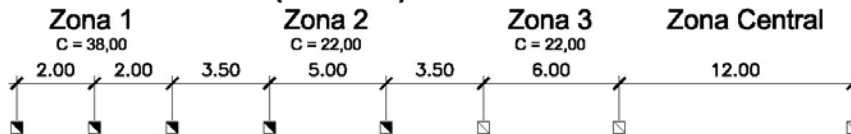
Túnel Jânio Quadros (70 km/h)



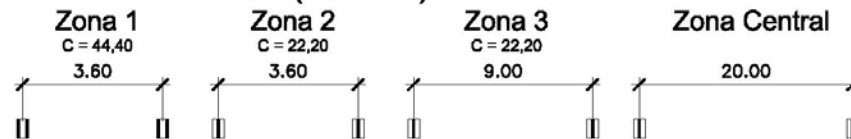
Túnel Tribunal da Justiça (70 km/h)



Túnel Max Feffer (60 km/h)



Túnel Maria Maluf (80 km/h)



Legenda

- ▬ ILUMINAÇÃO INDIRETA: PROJETOR 2x 400W VAPOR DE SÓDIO A.P.
- ▬ ILUMINAÇÃO INDIRETA: PROJETOR 1x 400W VAPOR DE SÓDIO A.P.
- ▬ ILUMINAÇÃO INDIRETA: PROJETOR 1x 250W VAPOR DE SÓDIO A.P.
- PROJETOR 1x 150W VAPOR DE SÓDIO A.P.
- ▣ PROJETOR ASSIMÉTRICO 1x 400W VAPOR DE SÓDIO A.P.
- ▣ PROJETOR ASSIMÉTRICO 1x 150W VAPOR DE SÓDIO A.P.
- PROJETOR ASSIMÉTRICO 1x 100W VAPOR DE SÓDIO A.P.
- ▬ LUMINÁRIA 2x 40W FLUORESCENTE
- ▬ PROJETOR 2x 400W VAPOR DE SÓDIO A.P.
- ▬ PROJETOR 1x 400W VAPOR DE SÓDIO A.P.
- C=28,00 COMPRIMENTO TOTAL DA ZONA (METRO)

ILUSTRAÇÃO 94 – Túneis de São Paulo: Arranjo das Luminárias
 FONTE – EMURB, 1993a; 1993b; 1995a; 1996b; 2003.

A iluminação indireta nos Túneis Ayrton Senna e Jânio Quadros favoreceu a distribuição da luz, mas implicou em significativo aumento na quantidade de luminárias por módulo. No Túnel Tribunal de Justiça, as lâmpadas fluorescentes também configuraram boa distribuição da luz, formando uma linha contínua em toda extensão do túnel, mas, além de apresentarem menor eficácia luminosa quando comparadas às lâmpadas de vapor de sódio, requerem manutenção mais freqüente devido à menor vida útil e maior quantidade de lâmpadas.

As luminárias assimétricas do Túnel Max Feffer têm o fecho direcionado ortogonalmente à pista. Desta forma, embora a luminária seja assimétrica, o sistema de distribuição no sentido do tráfego é simétrico. Esta opção tem sido observada em túneis mais recentes, como nos novos túneis da Rodovia dos Imigrantes (IL.95), e apresenta deficiências quanto à distribuição, demarcando o fecho de luz principalmente nas paredes laterais, com nítida variação entre claro e escuro. Tal aspecto pode acarretar em intermitência dentro da faixa de desconforto, como na Zona 1 do Túnel Max Feffer, cujo distanciamento de 2,00 m entre luminárias não está conforme as recomendações ABNT, devendo-se evitar o espaçamento entre 3,30 e 16.65 m na velocidade de 60 km/h para não provocar a intermitência entre 5 e 10 Hz.



ILUSTRAÇÃO 95 – Túnel da Rodovia dos Imigrantes (2005)
FONTE – CBT, 2006, p.12

No projeto de iluminação do Túnel Maria Maluf, utilizou-se a mesma lâmpada em todas as zonas (vapor de sódio alta pressão 400W), com pequena variação nas luminárias. Apenas na Zona 1, a luminária possui duas lâmpadas e, nas demais zonas, mantêm-se a luminária com uma lâmpada, ajustando o nível de iluminação através do distanciamento entre elas. Este procedimento facilita a instalação e manutenção do sistema.

De maneira geral, não há integração entre o projeto civil e luminotécnico. O pavimento de concreto na Zona de Aproximação é freqüente nos túneis observados e alguns elementos, que eventualmente ajudam a diminuir o ofuscamento do motorista, parecem ocasionais. A massa de vegetação no Túnel Maria Maluf (IL.96), embora também favoreça a iluminação do emboque de entrada, concentra-se no emboque de saída. O pavimento muda de asfalto para concreto ao se aproximar do emboque do túnel Max Feffer, aumentando a refletância da pista de rolamento antes de ingressar no túnel (IL.97) e o mesmo ocorre no Túnel Ayrton Senna e Jânio Quadros (IL.98 e 99).

**ILUSTRAÇÃO 96 – Túnel Maria Maluf: Anchieta/Imig****ILUSTRAÇÃO 97 – Túnel Max Feffer: Centro/Bairro****ILUSTRAÇÃO 98 – Túnel Ayrton Senna: Centro/Bairro****ILUSTRAÇÃO 99 – Túnel Jânio Quadros: Vista Geral**

Por vezes, a própria estrutura de concreto que antecede o portal de entrada, como no Túnel Jânio Quadros, poderia contribuir para atenuar o impacto visual entre a luz exterior e interior, mas nenhum controle da penetração solar foi previsto, impedindo seu aproveitamento para este fim (IL.100).



ILUSTRAÇÃO 100 – Túnel Jânio Quadros: Detalhe do Emboque

Soluções similares às encontradas na cidade de São Paulo são adotadas em todo estado com pequenas variações. Por vezes, a lâmpada de vapor metálico substitui a lâmpada de sódio, ou altera-se a posição ou tipo das luminárias, mas como regra geral, busca-se conformidade com as recomendações ABNT. O mesmo parece ocorrer por todo Brasil e, embora sem ter acesso a informações mais detalhadas do sistema de iluminação dos túneis em outros estados, as imagens observadas de diversos emboques revelam deficiências na iluminação da Zona Limiar, similar às identificadas em São Paulo, configurando o **Efeito Buraco Negro** em sua maioria, embora possivelmente atendam às instruções normativas ABNT.

A recente publicação do Comitê Brasileiro de Túneis – CBT (2006) além de imagens de túneis dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro, traz alguns exemplos de Florianópolis, Salvador e Belo Horizonte. Mesmo admitindo que as cenas onde aparecem os emboques não foram tomadas com o propósito de avaliar a iluminação, além das distorções provenientes da reprodução fotográfica, pois a sensibilidade do filme não corresponde à sensibilidade do olho humano, é possível estimar o resultado, analisando o posicionamento, distanciamento entre luminárias e extensão das diversas zonas, e a iluminação mostra-se sempre insuficiente.

Nos emboques dos túneis da Via Expressa Sul, Florianópolis (2001), tanto o registro fotográfico como a observação *in loco* mostraram problemas no sistema de iluminação artificial, sem evitar o **Efeito Buraco Negro** na aproximação do portal. As

luminárias estão posicionadas de forma a não direcionar o foco luminoso na direção do motorista, para evitar o possível ofuscamento provocado pela fonte de luz. Observa-se na IL.101 que as fontes de luz são visíveis no emboque de saída (lado esquerdo), o que não ocorre no emboque de entrada (lado direito).



ILUSTRAÇÃO 101 – Túneis da Via Expressa Sul Florianópolis, SC

Este procedimento foi também adotado no projeto luminotécnico dos túneis do Rodoanel Mário Covas. Segundo depoimento do Eng. Luiz Antonio G. da Fonseca, TERWAN³⁸, que acompanhou as obras de instalações elétricas, o projeto previa um pequeno ângulo nas luminárias, de 5° em relação ao eixo da pista, direcionado no sentido da linha de visão do motorista para evitar o ofuscamento. Quando foram posicionadas desta maneira em um dos túneis, a avaliação dos técnicos presentes não aprovou o resultado, mesmo atingindo o nível de iluminação de 4.000 lx na Zona Limiar. As luminárias foram reposicionadas paralelas ao eixo da pista, e a iluminação foi considerada adequada.

O exemplo do Rodoanel Mário Covas é elucidativo, quanto à precariedade da iluminação na pista. De fato, a inclinação das luminárias tem pouco ou nenhum impacto no nível de iluminação da pista, mas serve de balizamento para o motorista, antes de ingressar no túnel, quando a fonte de luz é visível. Esta é a principal característica que foi alterada nesta experiência prática, e um recurso auxiliar, que normalmente é utilizado apenas como um artifício complementar, mostrou-se imprescindível para orientar o motorista na entrada do túnel.

³⁸ Informação verbal em março de 2005.

Pela mesma razão, a sensação visual de segurança, observada anteriormente nos túneis da Via Expressa Sul em Florianópolis, é maior nos emboques de saída que nos emboques de entrada, mesmo sendo mais elevado o nível de iluminação nos emboques de entrada. Isto não significa que basta ajustar o posicionamento das luminárias para obter uma iluminação correta, e sim que a iluminação não está permitindo a visualização mínima da pista, tornando necessário um referencial adicional.

O Túnel Morro do Boi (1997), também em Santa Catarina, na BR 101 entre os municípios de Itapema e Balneário Camboriú, mesmo com um alto nível de iluminação no primeiro trecho após a entrada do túnel, não apresenta extensão suficiente, com implicações no ofuscamento e na adaptação visual do motorista. O mesmo emboque, que parece bem iluminado ao entardecer (IL.102), mostra-se inadequado, quando o entorno do portal recebe radiação solar direta (IL.103).



ILUSTRAÇÃO 102 – Túnel Morro do Boi (s/ insolação)
FONTE – TURISMO CATARINENSE, 2006



ILUSTRAÇÃO 103 – Túnel Morro do Boi (c/ insolação)
FONTE - MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, 2006

Em outros exemplos como o Túnel Teodoro Sampaio, Salvador (1964) Túnel da Lagoinha, Belo Horizonte (1970; 1986) e Túnel Santa Bárbara, Rio de Janeiro (1963) a pequena quantidade de luminárias instaladas já é suficiente para revelar o desempenho insatisfatório da iluminação (IL.104, 105 e 106).

O nível de iluminação recomendado pela ABNT, próximo de 3.000 lx, é suficiente de maneira geral ou talvez até ultrapasse o nível adequado, mas outras exigências, incluindo o comprimento das diversas zonas, estão sempre aquém do que deveriam para permitir a visualização do interior do túnel, dentro da Distância Segura de Frenagem, e proporcionar o tempo necessário de adaptação da visão do motorista. Se por um lado, a iluminação diurna dos túneis brasileiros é insuficiente,

por outro “encontramos túneis excessivamente iluminados durante a noite, desperdiçando quantidade considerável de energia.” (PIMENTA, 2002, p.90).

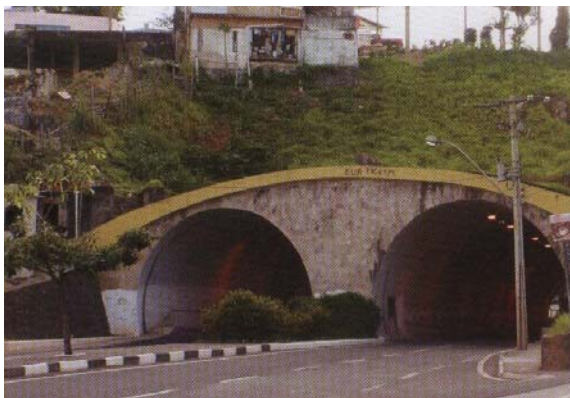


ILUSTRAÇÃO 104 – Túnel Teodoro Sampaio
FONTE – CBT, 2006, p.105

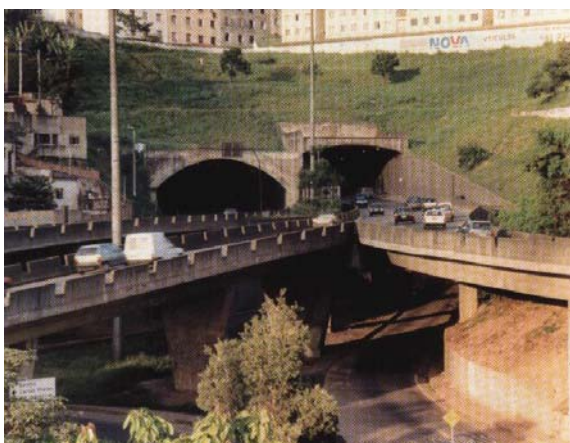


ILUSTRAÇÃO 105 – Túnel da Lagoinha
FONTE – CBT, 2006, p.107



ILUSTRAÇÃO 106 – Túnel Santa Bárbara
FONTE – CBT, 2006, p.83

Conclui-se que, no Brasil, ainda não existe um túnel rodoviário, dentro da classificação túnel longo, que atenda adequadamente aos requisitos de iluminação no período diurno. Esta afirmação possui alto grau de falseabilidade, bastando encontrar um exemplar que a refute. Entretanto, mesmo com a escassez de documentação sobre o tema no Brasil, um túnel brasileiro iluminado de acordo com os estudos desenvolvidos em todo o mundo certamente seria identificado em algum momento, o que não ocorreu durante a pesquisa, e talvez esteja aqui uma das principais causas para manter nosso panorama atual: a falta de uma referência.

Capítulo 5: BASE EMPÍRICA E CÁLCULO DA LUMINÂNCIA NA ZONA LIMIAR (L_{th})

Em 24 de julho de 2003 foi realizada uma visita técnica ao Rodoanel Mário Covas para o levantamento de dados primários nos túneis do Trecho Oeste. Os equipamentos foram fornecidos pelo LABAUT – Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética – FAUUSP e pela Seção Técnica de Fotometria do Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP.

Os principais fatores que influenciaram na escolha da amostra devem-se à disponibilidade de recursos, tanto pela proximidade do local como pelo acesso à documentação técnica, à velocidade máxima permitida de 100 km/h, afetando o tempo da adaptação visual do motorista, e à característica recente da obra, representando soluções atuais de engenharia e de iluminação viária. Uma característica peculiar nos túneis do Rodoanel Mário Covas é a largura de 18,42m e altura entre 9,30 e 10,55m impostas pela seção do gabarito interno, para abranger as quatro faixas de rolamento, excedendo as dimensões normalmente encontradas em portais de túneis rodoviários no Brasil.

Os dados coletados foram referenciados nas recomendações nacionais e internacionais pesquisadas para análise posterior dos seguintes aspectos:

- Efeito Buraco Negro;
- Iluminação nas diversas zonas;
- Distribuição da iluminação: simétrica, pró-fluxo e contrafluxo;
- Refletância do pavimento.

As medições externas foram tomadas para permitir o cálculo da luminância na Zona Limiar L_{th} , segundo as recomendações internacionais. Objetivou-se, além de compor a base empírica da pesquisa, avaliar o desempenho do sistema executado, identificando possíveis deficiências e inadequações, como também eventuais acertos e inovações. As informações coletadas foram complementadas pela documentação técnica fornecida pela DERSA (Anexo 1) e por meio de entrevistas com profissionais que participaram do empreendimento, permitindo um diagnóstico de todo o processo envolvido: concepção, projeto, cálculo e obra.

5.1 DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS

O Rodoanel Mário Covas, localizado na Região Metropolitana de São Paulo / Brasil, tem sua construção programada em quatro trechos: Oeste, Norte, Leste e Sul. O trecho Oeste foi entregue em outubro de 2002, com extensão de 32 km. O trecho Sul está em execução e os demais trechos encontram-se em fase de planejamento, devendo ser detalhados após a construção do trecho Sul. Quando concluídos os quatro trechos, o anel viário terá uma extensão total de 172 km, contornando a Região Metropolitana de São Paulo num distanciamento de 20 a 40 km do centro do município (DERSA, 2007).

Existem duas pistas no Rodoanel: Pista Externa e Pista Interna. O fluxo de veículos da Pista Externa tem sentido anti-horário e o da Pista Interna tem sentido horário. A principal característica funcional da obra está em desviar o tráfego de passagem pela metrópole, interligando as seguintes rodovias que convergem para a cidade de São Paulo:

- Régis Bittencourt;
- Raposo Tavares;
- Castello Branco;
- Anhangüera;
- Bandeirantes;
- Fernão Dias;
- Dutra;
- Ayrton Senna;
- Anchieta;
- Imigrantes.

O trecho Oeste, em amarelo na IL.107b, engloba as cinco primeiras, sendo o que interliga o maior número de rodovias. Esse trecho contém três túneis com emboques nas orientações Sul, Sudoeste e Nordeste. A numeração dos túneis foi invertida na obra e não coincide com a numeração do projeto. Assim, o Túnel 1 do projeto foi alterado para Túnel 3, o Túnel 2 manteve a numeração e o Túnel 3 passou para Túnel 1. Neste trabalho, adotou-se a numeração da obra.

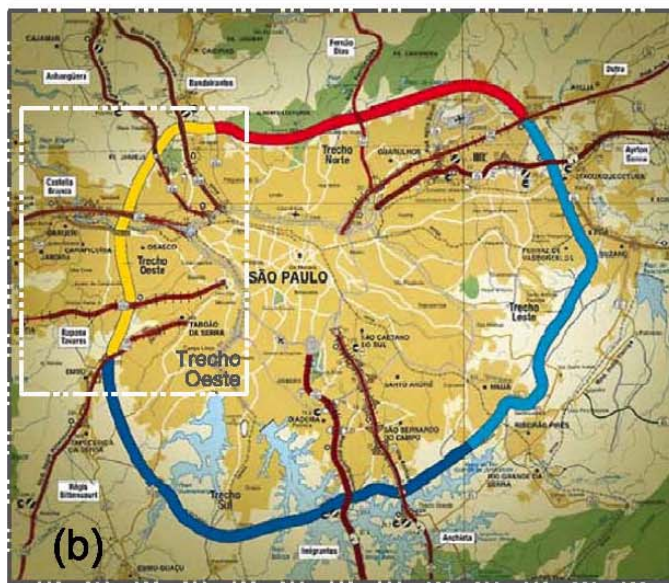


ILUSTRAÇÃO 107 – Rodoanel Mário Covas: Localização
 (a) Situação no Brasil. (b) São Paulo: Os Quatro Trechos do Rodoanel. (c) Detalhe do Trecho Oeste.
 FONTE – DERSA, 2007; GUIANET, 2007. adaptação nossa

Nos emboques de entrada dos túneis, há uma placa com o código que os identifica. A nomenclatura TE ou TI significa, respectivamente, Túnel Pista Externa e Túnel Pista Interna, seguida do número de ordem correspondente (TAB.14).

TABELA 14 – Orientações dos Emboques dos Túneis do Rodoanel

Mapa (IL.107c)	Código Obra	Emboque	Orientação
A	TE-1	Jesus	45° NE
B	TI-1	Itahyê	30° SO
C	TE-2	Parque Imperial	20° NE
D	TI-2	Tamboré	40° SO
E	TE-3	Gramado	20° NE
F	TI-3	Vista Alegre	0° S

FONTE – DERSA, 1998; 1999, adaptação nossa

Apenas para iluminação, os túneis apresentam o seguinte consumo de energia (TAB.15)

:

TABELA 15 – Iluminação dos Túneis do Rodoanel: Consumo Mensal

	Túnel 1 - 1750m Anhanguera	Túnel 2 - 650m Tamboré	Túnel 3 - 450m Régis Bittencourt	Consumo Total (x2) (kWh/mês)
Adaptação Visual (diurno)				
Limiar + Transição				
Quantidade de Lâmpadas	178	178	178	
Potência + Perda (W)	440	440	440	
horas/mês	360	360	360	
Consumo (kWh/mês)	28.195	28.195	28.195	169.171
Porcentagem do Consumo	22,25%	41,59%	54,27%	34,32%
Interior (diuturno)				
Quantidade de Lâmpadas	298	112	64	
Potência + Perda	440	440	440	
horas/mês	720	720	720	
Consumo (kWh/mês)	94.406	35.482	20.275	300.326
Porcentagem do Consumo	74,50%	52,34%	39,02%	60,93%
Exterior (noturno)				
Quantidade de Lâmpadas	26	26	22	
Potência + Perda	440	440	440	
horas/mês	360	360	360	
Consumo (kWh/mês)	4.118	4.118	3.485	23.443
Porcentagem do Consumo	3,25%	6,07%	6,71%	4,76%
Consumo por Túnel (kWh/mês)	126.720	67.795	51.955	
Consumo por Túnel (x2)	253.440	135.590	103.910	492.941

FONTE – DERSA, 2001, adaptação nossa

OBS: - diurno e noturno 12h/dia – 360 h/mês
- diuturno 24h/dia – 720 h/mês

O volume de tráfego é estimado em função da Média Anual de Veículos por Dia (MAVD). No Rodoanel existem duas estimativas de volume de tráfego: 2000 e 2020. Somente para o Trecho Oeste, o volume total previsto está entre 20.532 e 49.023 veículos/dia, passando à faixa de 48.646 a 72.665 veículos/dia para o

Rodoanel completo, com os quatro trechos (horizonte 2000). Por estes dados, segundo a ANSI/IESNA (2005, p.14) o fluxo do tráfego deve ser classificado como pesado ($MAVD > 24.000$).

5.2 LEVANTAMENTOS E MEDIÇÕES

Além dos procedimentos habituais neste tipo de atividade, envolvendo a pesquisa das instruções normativas aplicáveis, treinamento para uso dos equipamentos, preparação do material, acessórios e equipe de apoio, foi necessário adequar-se às exigências legais, para instalação e utilização dos equipamentos, e às adversidades próprias do local: transporte, segurança e obtenção das condições climáticas ideais, implicando num planejamento detalhado das atividades e procedimentos envolvidos para o sucesso das medições.

5.2.1 PLANEJAMENTO

No planejamento das medições foram considerados os seguintes tópicos:

- Definição do período das medições em função do período crítico para análise do **Efeito Buraco Negro**. Nos emboques com orientação 20° NE, este período está entre 11 e 12 h do solstício de inverno, devido à incidência de radiação solar direta nas imediações do portal;
- Verificação das condições meteorológicas;
- Visita no dia anterior às medições para reconhecimento das condições locais;
- Solicitação de autorização junto à DERSA. A autorização foi obtida com validade para uma semana, dada a necessidade de céu claro no dia das medições;
- Solicitação de documentação técnica junto à DERSA: projeto de iluminação e memorial descritivo para estudo prévio das amostras;
- Verificação das instruções normativas quanto às medições para aplicação dos métodos de cálculo (**Método L_{seq}** e **Método L_{20}**) e para avaliação do sistema de distribuição da luz artificial;
- Equipamentos: seleção, obtenção e treinamento: contato com laboratórios (LABAUT e IEEUSP) para verificar a disponibilidade e condições de uso dos equipamentos, calibragem e operação;
- Obtenção dos acessórios necessários (tripé e trena) e elaboração de dois gabaritos para fixação das fotocélulas dos luxímetros para as medições de iluminância horizontal E_h a 20 cm do pavimento e vertical E_v a 10 cm do

pavimento. Estas distâncias foram definidas em função do objeto-crítico (ver glossário);

- Equipe de apoio: auxiliar técnico e segurança;
- Definição dos procedimentos de medição: PR-1, PR-2 e procedimentos complementares.

Foram programados dois procedimentos de medição: o Procedimento 1 (PR-1), para identificar o sistema de distribuição da iluminação artificial existente (simétrico ou contrafluxo), e o Procedimento 2 (PR-2), para obtenção dos dados necessários para o cálculo da luminância da Zona Limiar, avaliando o potencial de ofuscamento do entorno do portal de entrada. Portanto, PR-1 foi executado internamente e PR-2 externamente ao túnel, seguindo as recomendações CIE (1990) e ANSI/IESNA (1996). Procedimentos complementares também foram previstos, como medições de iluminância em todas as zonas internas do túnel e identificação da refletância do pavimento.

Como foi utilizado o mesmo critério no projeto luminotécnico de todos os túneis do trecho oeste, e devido às dificuldades operacionais para se fazerem as medições internas, escolheu-se TE-2 para PR-1. Havia obras no emboque e no interior do túnel com as duas faixas esquerdas interditadas, o que foi detectado na visita de reconhecimento (IL.108). Pela simetria da seção do túnel e posicionamento das luminárias, as duas faixas permitiram uma avaliação total do sistema.



ILUSTRAÇÃO 108 – Vista das Faixas Interditadas no Interior do Túnel (TE-2)

Para PR-2, os equipamentos foram montados no acostamento. Embora esta posição não pareça a ideal, pois o verdadeiro observador estaria nas faixas de rolamento, pequenas variações do ponto de observação são desprezíveis, admitindo o comportamento das superfícies envolvidas próximo ao difusor perfeito. Exceto para o TE-2, foi possível posicionar o Luminancímetro na pista, devido às obras citadas.

5.2.2 EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS

Para as medições da iluminação dos túneis foram utilizados os seguintes equipamentos (IL.109):

1. Tripé para fixação do luminancímetro
2. Trena 30m
3. Gabarito para E_h (iluminância horizontal) $h=20\text{cm}$
4. Gabarito para E_v (iluminância vertical) $h=10\text{cm}$
5. Luxímetro digital HOMIS Modelo 824 – Faixa 0 a 200.000 lx
6. Luxímetro analógico Yokogawa – Faixa 0 a 3.000 lx
7. Luminancímetro LMT – L 1003
8. Luminancímetro Minolta LS-110 –CAL.:10/04/00 DUE: 10/04/01 by S.A.S.



ILUSTRAÇÃO 109 – Equipamentos e Acessórios para as Medições nos Túneis

Acrescenta-se a essa lista uma Câmera digital “Nikon” – Coolpix 5700

O equipamento necessário para o determinar o nível de iluminação na Zona Limiar de túneis é o luminômetro. O LABAUT possui um luminômetro “LMT L 1003”. Estima-se que a aquisição do equipamento tenha ocorrido há mais de vinte anos e, como nunca foi calibrado, não é confiável. Com o empréstimo pelo IEEUSP do luminômetro “Minolta – LS110”, pode-se fazer uma avaliação comparativa que acusou um desvio negativo do “LMT L 1003” em relação ao “Minolta – LS110” entre 12 e 26%. Estas medições foram registradas simultaneamente sob luz natural e artificial, com os dois equipamentos fixos, estabelecendo a curva correlativa.

No Túnel 2 (TE-2 Emboque Pq Imperial), devido à melhor condição para as medições proporcionada pela obra, utilizaram-se os dois luminômetros para PR-2, e apenas o “Minolta – LS110” nos demais túneis (IL.110 e 111). O item 1 dos equipamentos (tripé de fixação) foi fundamental neste tipo de medição, pois qualquer movimento influencia nos registros e dificulta a precisão das leituras. Neste sentido, o controle remoto do LMT é um recurso prático e eficiente, pois o gatilho do cabo sempre provoca alguma oscilação no equipamento.



ILUSTRAÇÃO 110 – PR-2: Medições com “LMT L 1003”



ILUSTRAÇÃO 111 – PR-2: Medições com “LS-110”

Como a iluminância mínima na Zona Limiar pelo Projeto de Norma ABNT PNB-318 é 2.700 lux, optou-se por não levar para campo o item 6 (Luxímetro analógico Yokogawa). O limite máximo do equipamento (3.000 lx) está próximo do mínimo para esta zona, e medidas muito superiores, como as encontradas acima de 8.000 lux perto do portal, poderiam danificar o equipamento. Entretanto, utilizou-se o Luxímetro Yokogawa para averiguação do item 5 (Luxímetro digital HOMIS), os quais apresentaram a mesma leitura.

Foram preparados dois gabaritos em madeira para fixação da fotocélula do luxímetro: o primeiro (item 3), para iluminância horizontal a 20cm do pavimento; o segundo (item 4), para iluminância vertical a 10cm do pavimento (IL.112).

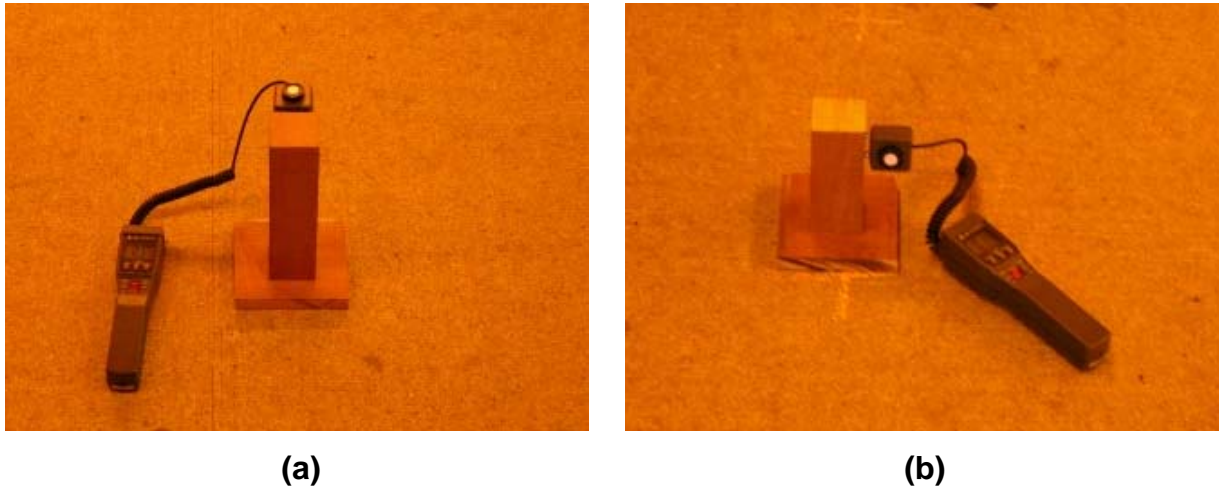


ILUSTRAÇÃO 112 – Gabarito. (a) Iluminância Horizontal. (b) Iluminância Vertical.

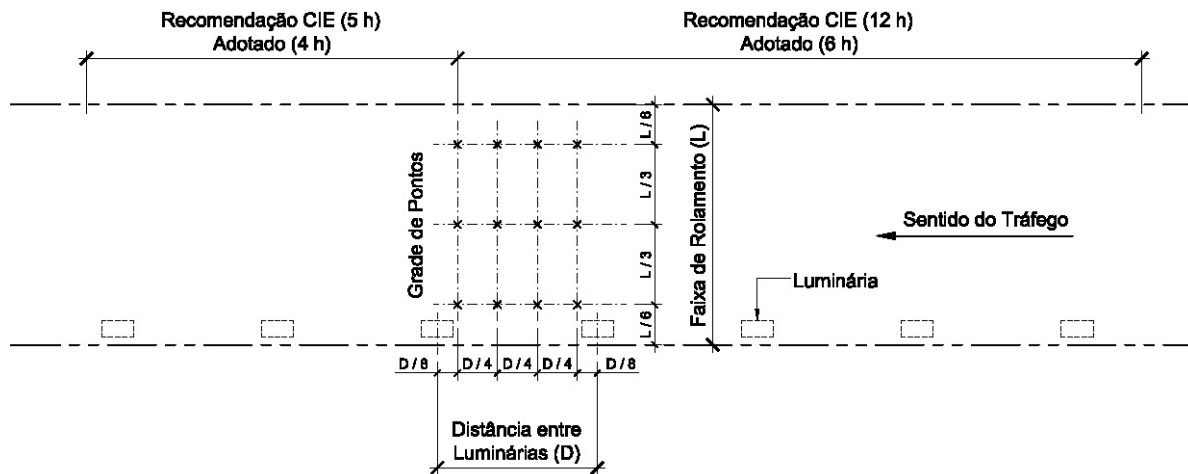
5.2.3 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO1 (PR-1)

As medições iniciaram-se às 9 horas pelo Procedimento 1 (PR-1), pois o melhor horário para as medições externas (PR-2) ocorreria a partir das 11 horas. O dia apresentava céu claro, condição imprescindível para PR-2.

Consideraram-se como amostragem, quanto à verificação do sistema de distribuição da iluminação, as duas faixas de rolamento da esquerda (terceira e quarta) do TE-2, seguindo as recomendações da CIE com algumas adaptações necessárias devido à extensão da Zona Limiar.

Segundo a CIE, a posição da grade de pontos deve estar entre duas luminárias consecutivas, avaliando-se o desempenho das luminárias inseridas na soma das seguintes distâncias: 5h no sentido do tráfego e 12h no sentido contrário³⁹. Nos túneis do Rodoanel, a altura h é 6m, acarretando numa extensão total para análise de 102m pela recomendação CIE, correspondente a 17h. Como no Rodoanel a extensão total da Zona Limiar é 60m, foi necessária uma adequação, posicionando a grade a 35m do portal. Desta forma, além de adotar uma localização próxima ao ponto médio da Zona Limiar, aproximou-se a extensão 5h para 4h no sentido do tráfego e a extensão 12h para 6h no sentido oposto (IL.113).

³⁹ h =altura de montagem das luminárias.



Planta

ILUSTRAÇÃO 113 – Grade de Pontos para Análise do Sistema de Distribuição

Foram feitas três medições em cada ponto da grade:

- L – Luminância do pavimento (IL.114);
- E_h – Iluminância horizontal a 20cm do pavimento (IL.115);
- E_v – Iluminância vertical a 10cm do pavimento (IL.116).

Os dados obtidos foram tabelados para obtenção do valor mínimo da razão L/E_v , que irá determinar o sistema de distribuição da iluminação artificial⁴⁰. O valor E_h não consta na recomendação CIE, mas foi registrado para complementação dos dados coletados. A uniformidade da iluminação nos pontos da grade também foi calculada pela razão entre a luminância mínima L_{min} e a luminância média L_{med} .

Os pontos da grade foram marcados no pavimento com giz,⁴¹ referenciando o posicionamento dos gabaritos, para obtenção das iluminâncias E_h e E_v , e a leitura das luminância do pavimento L , evitando-se a interferência do observador, dos equipamentos e das próprias marcas de referência nas medições.

⁴⁰ Sistema simétrico: L/E_v (mínimo) $\leq 0,2$. Sistema contrafluxo: L/E_v (mínimo) $\geq 0,6$ (CIE, 1990, p.8).

⁴¹ As marcas apresentadas nas fotos foram reforçadas posteriormente para facilitar sua visualização.



ILUSTRAÇÃO 114 – PR-1: Medição da Luminância do Pavimento (TE-2)



ILUSTRAÇÃO 115 – PR-1: Medição de E_h (TE-2)



ILUSTRAÇÃO 116 - Medição de E_v (TE-2)

As TAB.16 e 17 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos na grade de pontos para as faixas 3 e 4.

TABELA 16 – TE-2 Faixa 3: Sistema de Distribuição da Iluminação

Sistema Simétrico: L / Ev (min) < 0.2		Sistema Assimétrico: L / Ev (min) > 0.6		Eh (lux)	Ev (lux)	L (cd/m ²)	
Eh	2870	Eh	2900	Eh	2920	Eh	2980
Ev	2330	Ev	2410	Ev	2490	Ev	2570
L	338	L	337	L	326	L	324
Eh	3010	Eh	3040	Eh	3080	Eh	3080
Ev	2370	Ev	2410	Ev	2400	Ev	2480
L	303	L	297	L	308	L	270
Eh	3670	Eh	3720	Eh	3760	Eh	3790
Ev	2630	Ev	2660	Ev	2650	Ev	2620
L	395	L	391	L	403	L	367
						L (média)	338
						Uniformidade: Lmin/Lmed	0,80
L / Ev	0,15	0,14	0,13	0,13	0,13	0,14	0,11
	0,13	0,12	0,13	0,13	0,11	0,14	
	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14	
						L / Ev (min)	0,11

TABELA 17 – TE-2 Faixa 4: Sistema de Distribuição da Iluminação

Sistema Simétrico: L / Ev (min) < 0.2		Sistema Assimétrico: L / Ev (min) > 0.6		Eh (lux)	Ev (lux)	L (cd/m ²)	
Eh	3460	Eh	3540	Eh	3510	Eh	3420
Ev	2350	Ev	2330	Ev	2260	Ev	2220
L	332	L	329	L	336	L	333
Eh	2260	Eh	2260	Eh	2250	Eh	2300
Ev	1980	Ev	2020	Ev	1950	Ev	1900
L	242	L	248	L	242	L	233
Eh	1810	Eh	1830	Eh	1850	Eh	1890
Ev	1820	Ev	1850	Ev	1870	Ev	1840
L	227	L	226	L	236	L	231
						L (média)	268
						Uniformidade: Lmin/Lmed	0,84
L / Ev	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,13	0,12
	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12
	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12
						L / Ev (min)	0,12

As razões L/Ev (min) = 0,11 para faixa 3, e 0,12 para faixa 4, mostram que o sistema de distribuição é simétrico pelo critério CIE.

5.2.4 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO 2 (PR-2)

Existem dois métodos básicos, que já foram citados, para avaliar a iluminação necessária na Zona Limiar: L_{20} (Luminância Média em um campo de visão de 20°) e L_{seq} (Luminância de Véu Equivalente). Embora este procedimento tenha sido planejado para aplicação do **Método L_{seq}** , o critério utilizado nas medições permitiu obter os dados necessários para aplicar ambos os métodos, possibilitando um estudo comparativo semelhante ao elaborado por Adrian (1990). Para isto, a distância de 160m do portal foi adotada no ponto de vista das fotos e no posicionamento do luminômetro, correspondendo à Distância Segura de Frenagem para a velocidade de 100 km/h.

As etapas cumpridas no PR-2 foram as seguintes:

- Posicionar o luxímetro a 160m do portal;
- Fotografar o portal da mesma posição do luxímetro, coincidindo o centro da imagem com o centro da abertura do túnel;
- Elaborar croqui auxiliar do cenário registrado na foto;
- Anotar no croqui as luminâncias do entorno do portal, identificando as regiões com diferentes valores;

A primeira medição, realizada no Emboque Parque Imperial TE-2 com início às 11h, além das melhores condições locais, pela interdição de duas faixas de rolamento, abrangeu o horário de maior incidência solar direta no plano do portal. Foram executadas duas medições neste emboque, uma com LMT-L 1003 e outra com Minolta LS-110, utilizando apenas a última no cálculo. As medições estenderam-se até as 17:10h, mostrando grande variação em função do horário e das orientações dos emboques.

5.2.5 PROCEDIMENTOS COMPLEMENTARES

Foram registradas as iluminâncias em toda extensão do Túnel 2 (TE-2), obtendo-se 8.800 lx próximo ao portal, 2.700 e 380 lx, respectivamente, no início e fim da Zona de Transição. As medições da Zona Interior indicaram, aproximadamente, 370 lx no alinhamento das luminárias e, entre luminárias, 210 lx.



ILUSTRAÇÃO 117 - Vista da Zona Interior para a Zona Limiar (TE-2)

Foram tomadas as luminâncias da pista às 16:15h (IL.118) para cálculo da refletância do pavimento de concreto, utilizando a equação (5)⁴². Adotou-se uma folha de papel sulfite como referência para averiguação dos resultados (IL.119), cuja refletância (85%) foi medida em laboratório. As superfícies da pista apresentaram as seguintes refletâncias (TAB.18):

TABELA 18 – Refletâncias da Pista

	Papel Sulfite Referência	Pavimento		
		Concreto	Faixa Preta	Faixa Branca
Luminância (cd/m ²)	6233	2230	297	5393
Iluminância horizontal (lx)	23037	23037	23037	23037
Refletância (ρ)	85%	30%	4%	74%



ILUSTRAÇÃO 118 – Refletâncias da Pista: Medições



ILUSTRAÇÃO 119 – Refletâncias da Pista: Referência

⁴² Ver seção 2.2.1

5.3 CÁLCULO DA LUMINÂNCIA NA ZONA LIMIAR

Os dados primários coletados na visita técnica ao Rodoanel Mário Covas foram analisados quanto à conformidade com as recomendações nacionais e internacionais, nos aspectos determinantes do projeto luminotécnico. Dentre estes aspectos, a verificação comparativa entre os métodos L_{seq} e L_{20} , normalmente utilizados para determinar a luminância na Zona Limiar L_{th} , mostrou a maior precisão do primeiro, sendo o método adotado para o cálculo.

O **Método L_{seq}** foi aplicado nos três túneis pertencentes ao trecho Oeste do Rodoanel Mário Covas, determinando a luminância necessária na Zona Limiar L_{th} dos seis emboques, e fornecendo os subsídios para dimensionamento e concepção do **SAV** em cada situação específica.

5.3.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO L_{SEQ} (MÉTODO DE LUMINÂNCIA DE VÉU EQUIVALENTE)

O Diagrama é composto de um círculo central, já apresentado na seção 4.4.2.2, que representa o campo visual central de 2° , e nove anéis concêntricos dispostos ao seu redor. Cada anel é dividido em doze seções iguais e, à medida que se afasta do círculo central, a área dos setores aumenta.

O método recomenda ajustar a altura do túnel ao círculo central, que corresponde ao ângulo cônico de 2° . Inicialmente, foi feita uma adaptação quanto a este aspecto, pois o ângulo de 2° define uma altura aproximada de 5,60m à distância de 160m. No Rodoanel, como a altura dos portais dos túneis se aproxima de 10m, optou-se por ajustar o terceiro círculo do diagrama ao portal. Essa adaptação, embora pareça coerente, dispõe diversas seções dentro da área a ser determinada, ou seja, aumenta a área correspondente à incógnita do problema. Além disso, o cálculo mostrou sensível redução no valor de L_{th} por esta alternativa. Tal constatação é importante, por mostrar um recurso que poderá ser utilizado no projeto do **SAV**, pelo simples aumento do diâmetro do portal. Entretanto, optou-se pela situação mais desfavorável, passando a ajustar o círculo central à altura do portal. Desta forma, a segurança no cálculo é favorecida, além de ampliar a abrangência da fundamentação teórica, visto que algumas recomendações adotam valores maiores para a Distância Segura de Frenagem.

5.3.2 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

Sobre a fotografia de cada emboque anotam-se as luminâncias dos elementos significativos. Estes valores podem ser obtidos por medição, ou em tabelas que fornecem luminâncias típicas para diversos materiais. As tabelas devem ser utilizadas com certo cuidado, pois pressupõem condições de iluminação natural que podem não corresponder à situação analisada.

O Diagrama Polar é sobreposto à imagem com os valores anotados, ajustando o círculo central menor ao portal do túnel. A luminância de cada seção dos anéis é obtida pela média aritmética das contribuições dos diversos elementos inseridos na sua área. Já foi observado anteriormente que, como a área dos anéis aumenta à medida que se afasta do centro do diagrama, o peso proporcional entre elas diminui. Portanto, os anéis próximos ao campo visual central são mais significativos no cômputo final.

A luminância na Zona Limiar L_{th} é obtida em função da Luminância de Veu Equivalente L_{seq} que por sua vez é obtida em função do somatório das Luminâncias médias de cada seção dos anéis, segundo as seguintes equações⁴³:

$$L_{seq} = 0,5131 \cdot 10^{-3} \sum L_i$$

$$L_{th} = F_{SRN5} \cdot L_{seq}$$

Onde:

L_{seq} Luminância de véu equivalente;

L_i Luminância média de cada seção dos anéis;

L_{th} Luminância na Zona Limiar;

F_{SRN5} Fator para SRN=5 que corresponde a 1,41

Neste trabalho adotou-se a identificação literal para os anéis, e numérica para as seções do Diagrama Polar (IL.120).

⁴³ Estas equações foram mais bem detalhadas na seção 4.4.2.2, sendo reproduzidas aqui para facilitar a compreensão da Tabela Exemplo de Cálculo apresentada na IL.121.

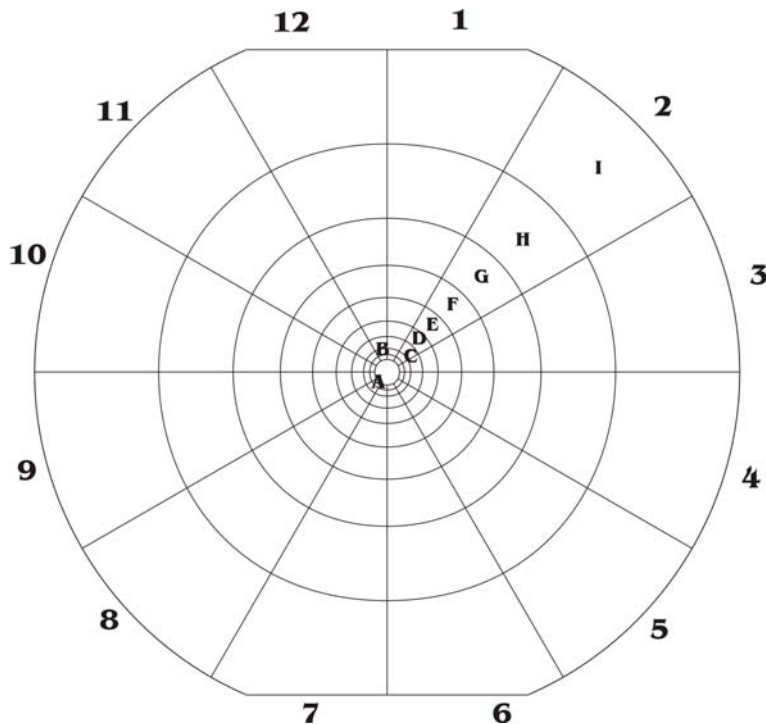


ILUSTRAÇÃO 120 - Diagrama Polar do Método L_{seq} : Identificação dos Elementos
FONTES - ANSI/IESNA, 1996, p.26, adaptação nossa

A numeração das seções do Diagrama Polar é feita no sentido horário, iniciando pela seção superior direita. Nos exemplos de cálculo pesquisados, as seções *II*, *I6*, *I7* e *II2* não são consideradas. Embora não esteja explicado nesses exemplos, presume-se que as seções desconsideradas estejam fora do campo visual do motorista, recortadas pelo limite superior e inferior do pára-brisa.

A IL.121 apresenta uma tabela-exemplo adaptada da RP-22-05 (ANSI/IESNA, 2005, p.13). Os valores médios das luminâncias dentro cada setor sobreposto à imagem é transportado para a tabela para calcular L_{seq} e L_{th} . Foi adicionado o cálculo da Iluminância na Zona Limiar E_{th} .

Nota-se que algumas seções estão dispostas no interior do túnel, cuja luminância é a incógnita do problema L_{th} . Ao exemplificar seu método, Adrian (1990) aplicou nestas seções $0,25 \text{ kcd/m}^2$, que corresponde a um valor estimativo médio para L_{th} . Este mesmo valor foi adotado no cálculo dos túneis do Rodoanel, e o resultado mostrou-se adequado, pois o cálculo foi refeito, em alguns emboques, por aproximações sucessivas, transferindo o valor calculado para essas sessões até estabilizar o valor calculado com o valor transferido, e a diferença entre o valor inicial e final de L_{th} mostrou-se desprezível.

TABELA EXEMPLO

Cálculo de L_{th} - Luminância da Zona Limiar (Método L_{seq})
RODOANEL METROPOLITANO MÁRIO COVAS

Túnel: 3 - Régis Bittencourt

Extensão: 450m

Emboque: Gramado (TE-3)

data: 24/7/2003

Orientação: 20°NE

hora: 12:45 às 13:00

Seções	ANEIS									SOMA
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	4,82	4,82	4,82	3,35	0,79	1,28	4,34	4,34	NÃO	28,56
2	4,82	4,82	4,40	3,20	0,87	0,94	2,53	3,59	3,59	28,76
3	0,25	0,25 valor adotado para seções no interior do túnel			0,94	0,94	0,94	1,47	1,60	9,34
4	0,25				3,94	3,24	1,06	1,23	1,23	16,75
5	0,25				6,28	7,60	6,96	5,03	3,09	45,53
6	6,96	6,96	6,96	4,82	6,28	7,60	7,60	7,60	NÃO	54,64
7	6,96	6,96	6,96	5,82	4,68	6,28	6,28	7,60	NÃO	51,54
8	0,25	3,60	6,96	6,96	6,00	6,14	5,48	6,28	6,28	47,95
9	0,25	1,16	4,82	6,96	5,82	6,08	6,05	6,00	6,00	43,14
10	0,25	4,82	4,82	4,82	4,79	4,62	4,82	3,77	1,95	34,66
11	4,82	4,82	4,82	4,82	3,58	3,20	2,15	3,19	3,75	35,15
12	4,82	4,82	4,82	3,35	1,58	1,58	4,34	4,34	NÃO	29,65
ΣLi (kcd/m ²) =										425,67
OBS: Sol direto predominante										
										L_{seq} (cd/m ²) = 218
										L_{th} (cd/m ²) = 308
										ρ (pavimento) = 0,30
										E_{th} (lx) = 3225

Somatória total das seções do Diagrama Polar

$$L_{seq} = 0,5131 \cdot 10^{-3} \cdot \Sigma Li$$

$$L_{th} = 1,41 \cdot L_{seq}$$

$$E_{th} = L_{th} \cdot \pi / \rho$$

ILUSTRAÇÃO 121- Método L_{seq} : Tabela-Exemplo de Cálculo

A seguir serão apresentados os cálculos analíticos de L_{seq} , L_{th} , e E_{th} para todos os emboques dos túneis pelo **Método L_{seq}** . Acrescentou-se apenas um exemplo de cálculo pelo **Método L_{20}** para ilustrar sua aplicação e a diferença nos resultados (IL.128; TAB.25). O emboque escolhido para este exemplo (TE-2 Emboque Parque Imperial) foi o que apresentou os maiores valores de luminância no entorno do portal, sendo considerado o mais adequado para a verificação comparativa entre os dois métodos por representar a situação crítica, com maior potencial de ofuscamento.

5.3.3 MÉTODO L_{seq} : TÚNEL 1 - ANHANGUERA: EMBOQUE JESUS (TE-1)

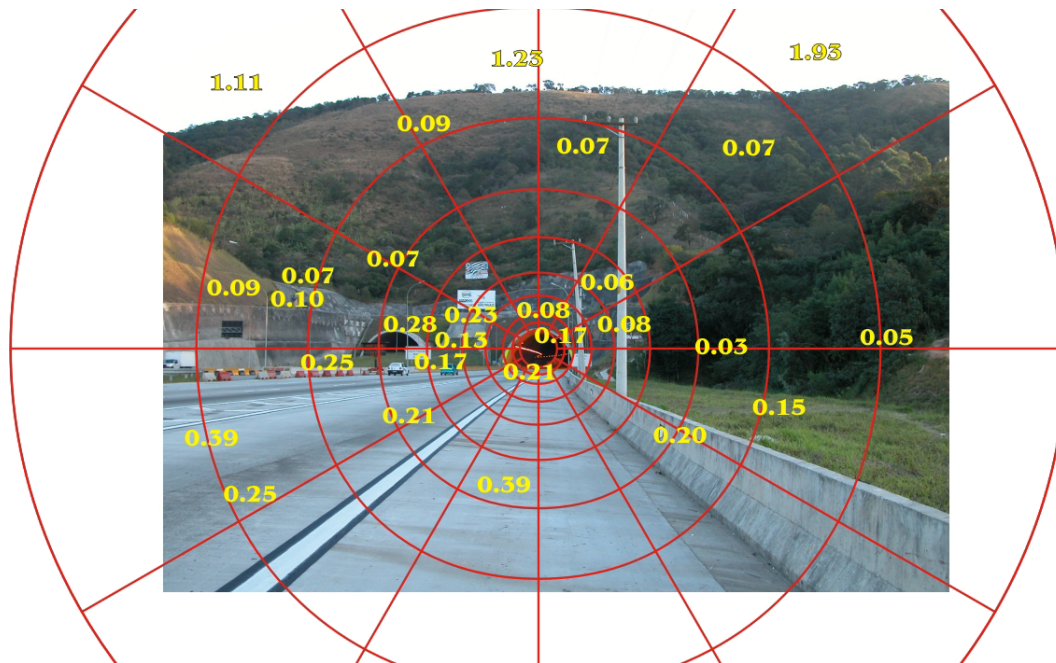


ILUSTRAÇÃO 122 - Emboque Jesus (TE-1): Método L_{seq}

TABELA 19 - Emboque Jesus (TE-1): Cálculo de L_{th} (Método L_{seq})

Túnel: 1 - Anhanguera										
Extensão: 1750m										
Emboque: Jesus (TE-1)										
Orientação: 45°NE										
data: 24/7/2003										
hora: 17:00 às 17:10										
	ANEIS									
Seções	A	B	C	D	E	F	G	H	I	SOMA
1	0,17	0,08	0,08	0,06	0,07	0,07	0,07	0,88	NÃO	1,48
2	0,17	0,08	0,08	0,06	0,06	0,07	0,07	0,26	1,56	2,41
3	0,25	0,08	0,08	0,08	0,08	0,03	0,03	0,05	0,05	0,73
4	0,25	0,25	0,15	0,08	0,12	0,09	0,10	0,10	0,10	1,24
5	0,25	0,21	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	1,86
6	0,21	0,21	0,21	0,21	0,39	0,39	0,39	0,39	NÃO	2,40
7	0,21	0,21	0,21	0,21	0,39	0,39	0,39	0,39	NÃO	2,40
8	0,25	0,21	0,21	0,21	0,39	0,35	0,35	0,30	0,30	2,57
9	0,25	0,25	0,12	0,16	0,19	0,20	0,22	0,22	0,22	1,83
10	0,25	0,08	0,08	0,20	0,20	0,15	0,08	0,09	0,50	1,63
11	0,17	0,08	0,08	0,23	0,10	0,07	0,07	0,29	1,00	2,09
12	0,17	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	1,00	NÃO	1,62
									ΣLi (kcd/m ²)	22,26
OBS: Todos os pontos em sombra										
									L_{seq} (cd/m ²)	11
									L_{th} (cd/m ²)	16
									ρ (pavimento)	0,30
									E_{th} (lx)	169

5.3.4 MÉTODO L_{seq} : TÚNEL 1 - ANHANGUERA: EMBOQUE ITAHYÊ (TI-1)

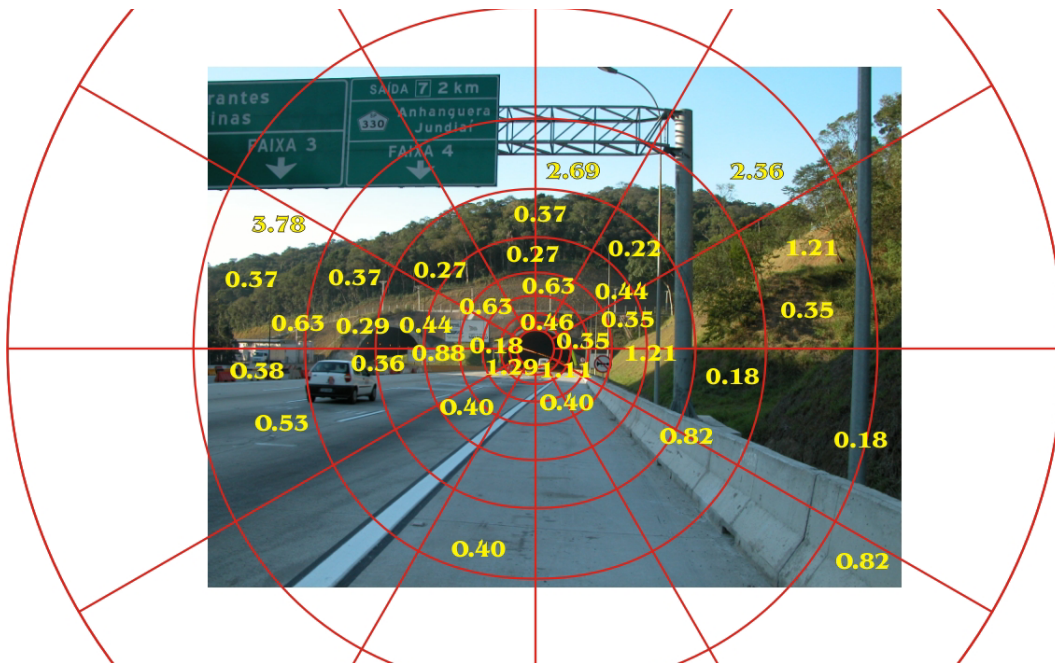


ILUSTRAÇÃO 123 – Emboque Itahyê (TI-1): Método L_{seq}

TABELA 20 – Emboque Itahyê (TI-1): Cálculo de L_{th} (Método L_{seq})

Túnel: 1 Anhanguera

Extensão: 1750m

Emboque: Itahyê (TI-1)

data: 24/7/2003

Orientação: 30°SO

hora: 16:25 às 16:40

Seções	ANEIS									SOMA
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	0,46	0,35	0,63	0,63	0,27	0,37	2,69	2,69	NÃO	8,09
2	0,35	0,35	0,45	0,63	0,44	0,30	0,83	2,36	2,36	8,07
3	0,25	0,38	0,35	0,35	0,66	0,71	0,60	0,78	0,78	4,86
4	0,25	0,25	0,38	0,78	1,21	0,49	0,31	0,31	0,31	4,29
5	0,25	0,59	0,82	0,40	0,57	0,60	0,57	0,61	0,61	5,02
6	1,11	1,11	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	NÃO	4,62
7	1,11	1,11	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	NÃO	4,62
8	0,25	0,80	0,77	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	4,22
9	0,25	0,25	0,53	0,48	0,64	0,49	0,39	0,50	0,50	4,03
10	0,25	0,61	0,61	0,61	0,51	0,44	0,43	1,59	2,00	7,05
11	0,35	0,61	0,61	0,63	0,45	0,32	3,10	3,78	3,78	13,63
12	0,46	0,61	0,63	0,63	0,27	0,37	2,69	2,69	NÃO	8,35
ΣLi (kcd/m ²)										76,85
Lseq (cd/m ²)										39
Lth (cd/m ²)										56
ρ (pavimento)										0,30
Eth (lx)										582

OBS: Sol direto apenas próximo ao plano do portal

5.3.5 MÉTODO L_{seq} : TÚNEL 2 - TAMBORÉ: EMBOQUE PARQUE IMPERIAL (TE-2)

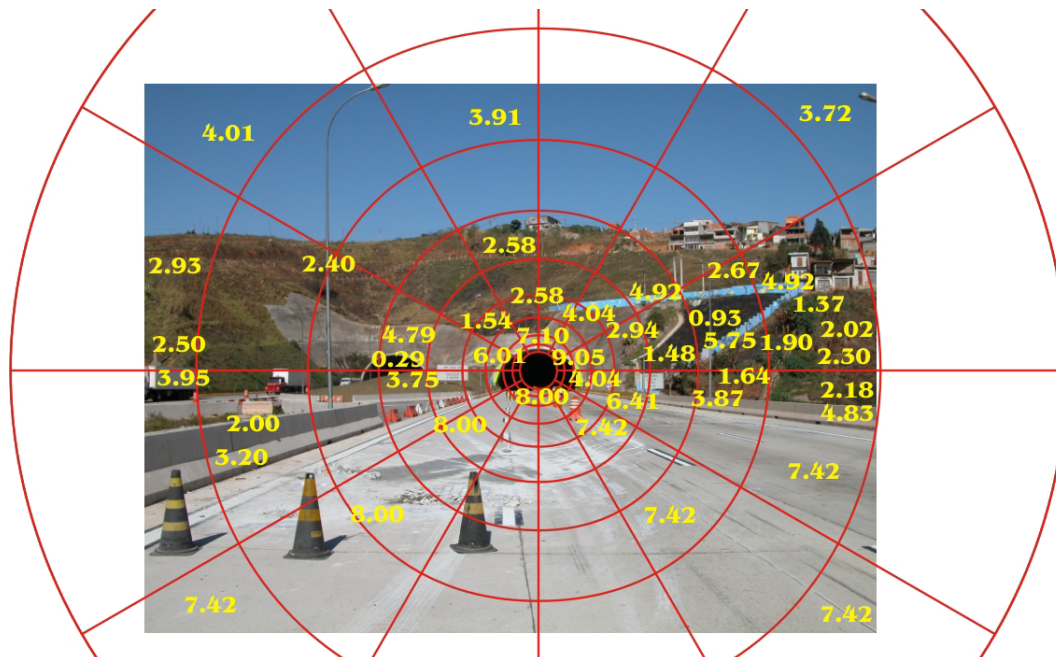


ILUSTRAÇÃO 124 – Emboque Parque Imperial (TE-2): Método L_{seq}

TABELA 21 – Emboque P. Imperial (TE-2): Cálculo de L_{th} (Método L_{seq})

Túnel: 2 Tamboré

Extensão: 650m

Emboque: Pq. Imperial (TE-2)

data: 24/7/2003

Orientação: 20°NE

hora: 11:00 às 12:00

Seções	ANÉIS									SOMA
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	8,50	7,10	5,99	3,29	2,58	2,84	3,91	3,91	NÃO	38,12
2	2,20	7,10	4,04	4,04	3,02	3,05	3,29	3,91	3,72	34,37
3	0,25	1,42	4,04	4,04	2,94	2,21	2,44	2,00	2,68	22,02
4	0,25	0,25	3,40	5,40	4,67	4,24	5,91	6,11	6,11	36,34
5	0,25	6,45	8,00	8,00	7,42	7,42	7,42	7,42	7,42	59,80
6	8,00	8,00	8,00	8,00	7,42	7,42	7,42	7,42	NÃO	61,68
7	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	7,42	8,00	8,00	NÃO	63,42
8	0,25	6,45	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	7,42	62,12
9	0,25	0,25	3,50	4,60	6,00	5,87	5,12	5,12	5,30	36,01
10	0,25	1,42	6,01	6,00	4,79	3,60	3,56	2,56	3,12	31,31
11	2,20	7,10	5,99	1,54	2,58	2,58	3,15	4,01	4,01	33,16
12	8,50	7,10	2,65	2,58	2,58	2,84	3,91	3,91	NÃO	34,07
									ΣL_i (kcd/m ²)	512,42
OBS: Sol direto em todos os pontos									L_{seq} (cd/m ²)	263
									L_{th} (cd/m ²)	371
									ρ (pavimento)	0,30
									E_{th} (lx)	3882

5.3.6 MÉTODO L_{seq} : TÚNEL 2 - TAMBORÉ: EMBOQUE TAMBORÉ (TI-2)

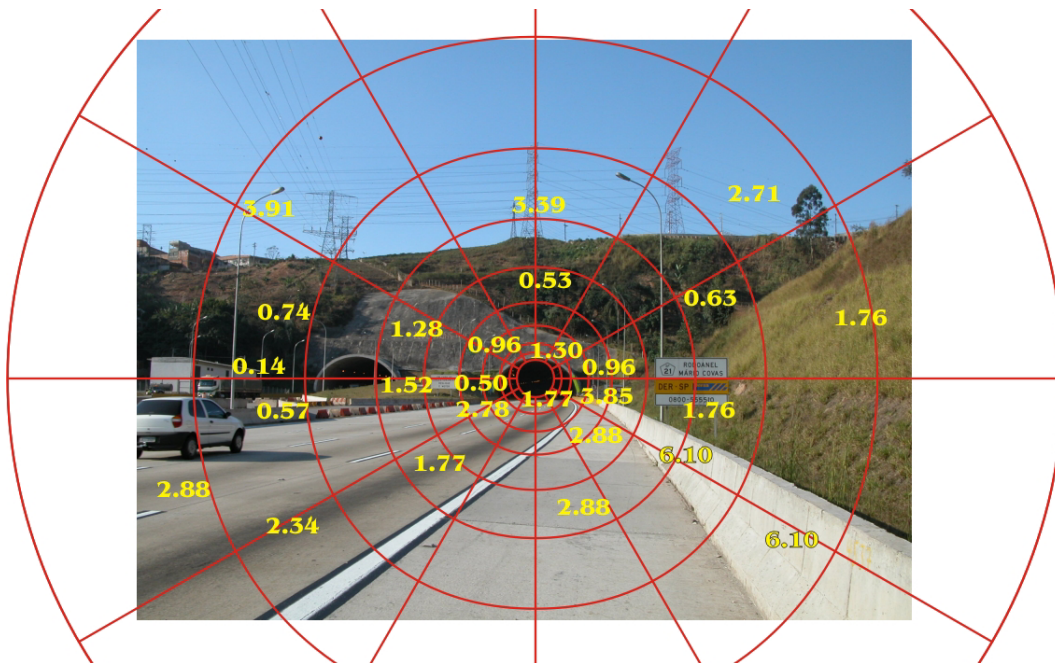


ILUSTRAÇÃO 125 – Emboque Tamboré (TI-2): Método L_{seq}

TABELA 22 – Emboque Tamboré (TI-2): Cálculo de L_{th} (Método L_{seq})

Túnel: 2 Tamboré

Extensão: 650m

Emboque: Tamboré (TI-2)

data: 24/7/2003

Orientação: 40°SO

hora: 15:45 às 16:15

Seções	ANEIS									SOMA
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	1,30	0,96	0,91	0,53	0,53	1,40	3,39	3,39	NÃO	12,41
2	0,77	0,96	0,96	0,53	0,53	0,53	1,73	2,71	2,71	11,43
3	0,25	0,61	0,96	0,75	0,75	0,63	1,20	1,53	1,90	8,58
4	0,25	0,25	0,50	2,30	2,12	3,50	3,06	2,63	2,63	17,24
5	0,25	1,01	1,77	2,88	2,88	2,88	3,85	4,49	4,95	24,96
6	1,77	1,77	1,77	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	NÃO	19,71
7	1,77	1,77	1,77	2,32	2,33	2,88	2,88	2,88	NÃO	18,60
8	0,25	1,01	2,78	2,78	1,77	1,77	2,00	2,34	2,34	17,04
9	0,25	0,25	0,50	1,18	2,15	2,15	2,34	2,42	2,42	13,66
10	0,25	0,61	0,96	0,96	1,28	1,28	1,01	1,37	1,37	9,09
11	0,77	0,96	0,96	0,96	1,13	0,91	2,60	3,91	3,91	16,11
12	1,30	0,96	0,96	0,66	0,53	1,40	3,39	3,39	NÃO	12,59
ΣLi (kcd/m ²)										181,42
Lseq (cd/m ²)										93
Lth (cd/m ²)										131
ρ (pavimento)										0,30
Eth (lx)										1374

OBS: Sol direto em todos os pontos

5.3.7 MÉTODO L_{seq} : TÚNEL 3 – R. BITTENCOURT: EMBOQUE GRAMADO (TE-3)

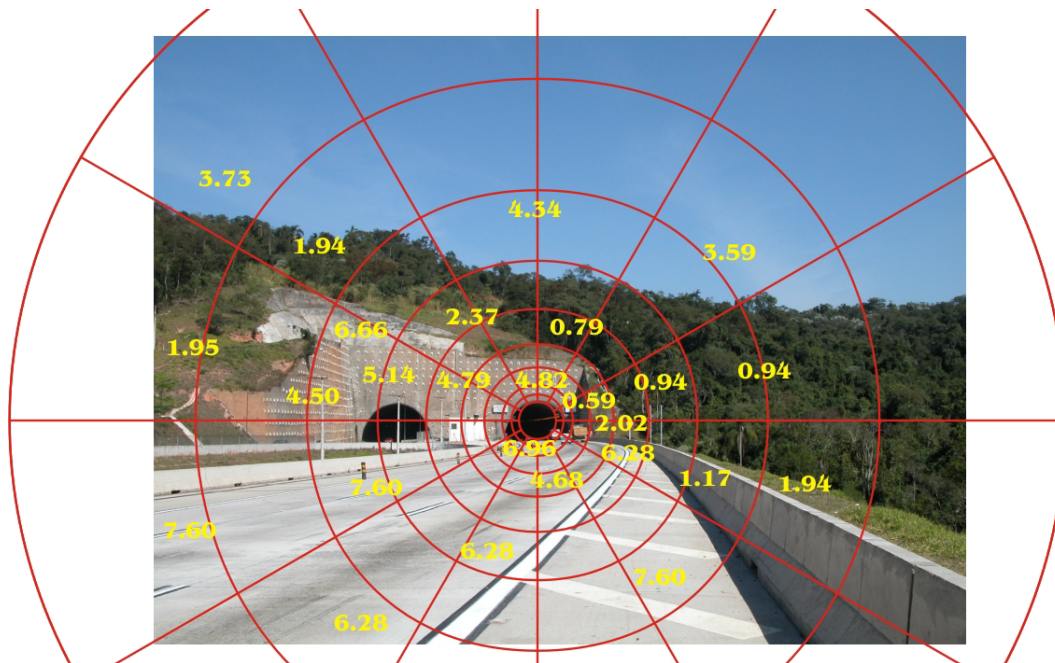


ILUSTRAÇÃO 126 – Emboque Gramado (TE-3): Método L_{seq}

TABELA 23 – Emboque Gramado (TE-3): Cálculo de L_{th} (Método L_{seq})

Túnel: 3 - Régis Bittencourt

Extensão: 450m

Emboque: Gramado (TE-3)

data: 24/7/2003

Orientação: 20°NE

hora: 12:45 às 13:00

Seções	ANEIS									SOMA
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	4,82	4,82	4,82	3,35	0,79	1,28	4,34	4,34	NÃO	28,56
2	4,82	4,82	4,40	3,20	0,87	0,94	2,53	3,59	3,59	28,76
3	0,25	0,59	0,59	2,02	0,94	0,94	0,94	1,47	1,60	9,34
4	0,25	0,59	1,86	3,35	3,94	3,24	1,06	1,23	1,23	16,75
5	0,25	6,96	4,68	4,68	6,28	7,60	6,96	5,03	3,09	45,53
6	6,96	6,96	6,96	4,68	6,28	7,60	7,60	7,60	NÃO	54,64
7	6,96	6,96	6,96	5,82	4,68	6,28	6,28	7,60	NÃO	51,54
8	0,25	3,60	6,96	6,96	6,00	6,14	5,48	6,28	6,28	47,95
9	0,25	1,16	4,82	6,96	5,82	6,08	6,05	6,00	6,00	43,14
10	0,25	4,82	4,82	4,82	4,79	4,62	4,82	3,77	1,95	34,66
11	4,82	4,82	4,82	4,82	3,58	3,20	2,15	3,19	3,75	35,15
12	4,82	4,82	4,82	3,35	1,58	1,58	4,34	4,34	NÃO	29,65
									ΣLi (kcd/m ²)	425,67
OBS: Sol direto predominante									L_{seq} (cd/m ²)	218
									L_{th} (cd/m ²)	308
									ρ (pavimento)	0,30
									E_{th} (lx)	3225

5.3.8 MÉTODO L_{seq} : TÚNEL 3 – R. BITTENCOURT: EMBOQUE V. ALEGRE (TI-3)

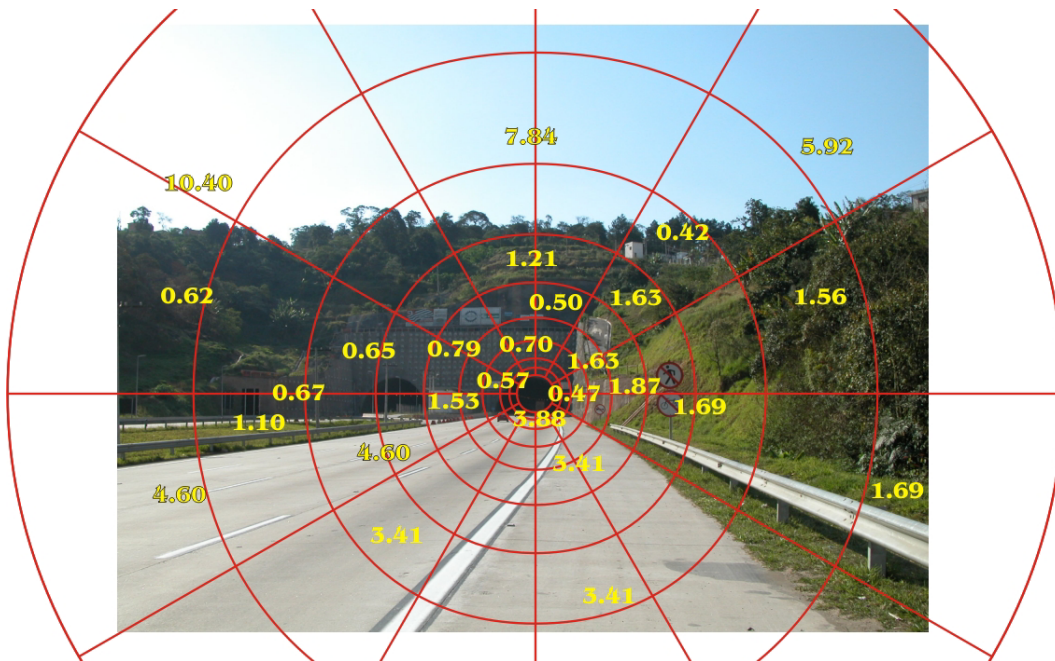


ILUSTRAÇÃO 127 – Emboque Vista Alegre (TI-3): Método L_{seq}

TABELA 24 – Emboque Vista Alegre (TI-3): Cálculo de L_{th} (Método L_{seq})

Túnel: 3 - Régis Bittencourt

Extensão: 450m

Emboque: Vista Alegre (TI-3)

data: 24/7/2003

Orientação: 0°S

hora: 14:45 às 15:20

Seções	ANEIS									SOMA
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	0,70	0,70	0,70	0,70	0,50	1,21	7,84	7,84	NÃO	20,19
2	0,50	0,70	0,79	1,44	1,63	1,63	1,16	4,61	5,92	18,38
3	0,25	0,47	1,54	1,87	1,72	1,69	1,60	1,56	1,70	12,40
4	0,25	0,47	1,50	1,87	1,77	1,69	1,69	1,60	1,60	12,44
5	0,50	2,18	3,88	3,41	3,41	3,41	3,30	3,30	3,30	26,69
6	2,18	3,88	3,88	3,41	3,41	3,41	3,41	3,41	NÃO	26,99
7	2,18	3,88	3,88	3,41	3,41	3,41	3,41	3,41	NÃO	26,99
8	0,60	2,18	3,88	3,88	3,88	3,60	3,41	3,41	3,41	28,25
9	0,25	0,57	0,57	2,22	3,07	3,00	3,03	3,10	3,15	18,96
10	0,25	0,57	0,57	0,57	0,79	0,70	0,65	0,65	3,55	8,30
11	0,50	0,70	0,70	0,70	0,65	1,10	1,34	4,61	10,40	20,70
12	0,70	0,70	0,70	0,70	0,50	1,21	7,84	7,84	NÃO	20,19
ΣLi (kcd/m ²)										240,48
OBS: Pista sob Sol direto. Plano do portal sob sombra										
L_{seq} (cd/m ²)										123
L_{th} (cd/m ²)										174
ρ (pavimento)										0,30
E_{th} (lx)										1822

5.3.9 MÉTODO L_{20} : TÚNEL 2 - TAMBORÉ: EMBOQUE PARQUE IMPERIAL (TE-2)

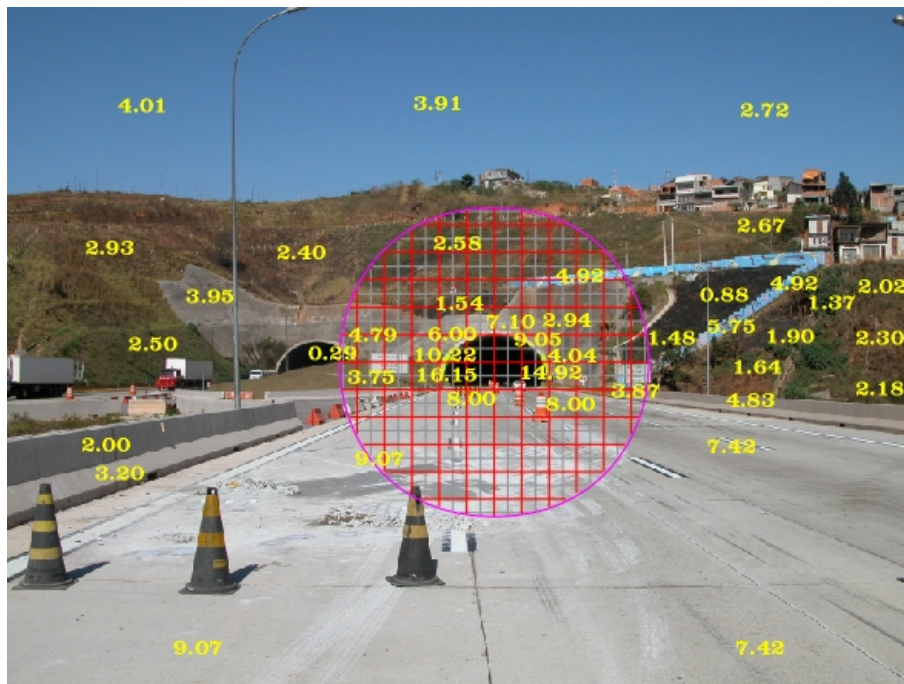


ILUSTRAÇÃO 128 - Emboque Parque Imperial (TE-2): Método L_{20}

TABELA 25 - Emboque P. Imperial (TE-2): Cálculo de L_{th} (Método L_{20})

Túnel:	TE-2 Emboque Parque Imperial		k=	0,100
item	Descrição	fator (F)	L (kcd/m ²)	F x L
1	céu	0,000		0,000
2	entorno portal - vegetação clara	0,225	2,58	0,581
3	entorno portal - vegetação escura	0,030	1,50	0,045
4	entorno portal - concreto claro	0,030	4,80	0,144
5	entorno portal - concreto escuro	0,175	2,94	0,515
5	entorno portal - outros claro	0,010	4,92	0,049
6	entorno portal - outros médio	0,075	3,00	0,225
7	pista	0,390	8,00	3,120
8	Interior do túnel	0,065	0,00	0,000
Total (F)		1,000	Total (kcd/m²)	4,678
$L_{th} = k \cdot L_{20}$			L20 (cd/m ²)	4678
			Lth (cd/m ²)	468
			ρ (pavimento)	0,30
			Eth (lx)	4899

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A verificação comparativa entre os métodos L_{seq} e L_{20} confirmou os estudos de Adrian (1990, p.131-133). A luminância na Zona Limiar L_{th} calculada pelo **Método L_{20}** esteve 26% maior em relação à obtida pelo **Método L_{seq}** . Para Adrian, a mesma relação ficou em torno de 50%, devido à maior proporção da área de céu dentro do ângulo cônico de 20° nos seus experimentos. Já no TE-2: Emboque Parque Imperial, o ângulo cônico de 20° não chegou a abranger o céu, e a maior proporção inserida neste ângulo foi ocupada pela pista. Mesmo assim, a luminância L_{th} pelo **Método L_{20}** permaneceu significativamente acima da obtida pelo **Método L_{seq}** , o qual foi admitido mais adequado para o cálculo por considerar a influência da distância entre a fonte de ofuscamento e o campo visual central, avaliando com maior precisão todo o cenário observado pelo motorista.

Houve grande variação nos valores encontrados para L_{th} , e conseqüentemente para E_{th} , em função do horário da medição e orientação do portal de cada túnel. Na latitude de São Paulo ($23^\circ 37'$ Sul), a data escolhida para as medições, próxima ao solstício de inverno, configurou a condição crítica para a orientação Norte em torno das 12:00h. Nos emboques TE-2 e TE-3, que melhor representaram essa condição, a iluminância na Zona Limiar E_{th} calculada se aproximou da registrada nas medições no interior do túnel, como também da iluminância média adotada no projeto luminotécnico para a Zona Limiar (3.800 lx) e da luminância L_{th} recomendada pelas normas internacionais pesquisadas, mas está acima da recomendação ABNT. Já nos demais emboques, os valores calculados de E_{th} estão significativamente abaixo em relação à iluminância média adotada no projeto luminotécnico e aos valores medidos *in loco* no neste trecho, principalmente ao aproximar-se o final da tarde (TAB.26).

TABELA 26 – Método L_{seq} : Resumo dos Resultados

Código	Emboque	Orientação	Horário	Posição do Sol		L_{th} (cd/m ²)	E_{th} (lx)
				A	h		
TE-1	Jesus	45° NE	17:00 às 17:10	294°	4°	16	169
TI-1	Itahyê	30° SO	16:25 às 16:40	297°	9°	56	582
TE-2	Parque Imperial	20° NE	11:00 às 12:00	12°	45°	371	3.882
TI-2	Tamboré	40° SO	15:45 às 16:15	302°	18°	131	1.374
TE-3	Gramado	20° NE	12:45 às 13:00	342°	45°	308	3.225
TI-3	Vista Alegre	0° S	14:45 às 15:20	312°	28°	174	1.822

Esta variação mostrou a importância de analisar as características específicas de cada emboque para determinar níveis diferenciados de iluminação, em função de um período crítico a ser identificado. Como a luz solar direta no entorno do portal é normalmente um dos elementos principais a ser considerado, a condição crítica deve ser estimada pela posição solar. Outros elementos também poderão ser significativos, como a parcela de céu visível, a topografia e o entorno imediato, mas como no Rodoanel as cenas dos emboques caracterizam túneis em montanha, a análise da insolação é suficiente para uma estimativa preliminar do período crítico.

Os traçados de máscaras (IL.129, 130, 131, 132, 133 e 134) possibilitam visualizar os períodos de insolação no plano vertical, assumido como o plano definido pelo portal de cada emboque. A área não hachurada corresponde ao período em que o Sol incide no plano vertical e as indicações A e h referem-se, respectivamente, ao azimute e altura solar no momento das medições.

No Emboque Jesus (TE-1), a luz solar direta atinge o plano vertical no período da manhã, durante o ano todo. À tarde, o período de insolação aumenta gradualmente a partir do solstício de verão, até atingir as 15:00h no solstício de inverno. Os demais emboques da Pista Externa (TE) têm comportamento semelhante. Devido à menor inclinação do portal em relação à trajetória aparente do Sol nesses emboques, há uma pequena diminuição, próximo ao solstício de verão, do período de insolação durante a manhã. Já no período da tarde, ocorre um aumento significativo, com insolação do plano vertical, durante todo o período diurno próximo ao solstício de inverno.

Tal situação se inverte nos emboques da Pista Interna (TI). Pela manhã, a orientação Sudoeste impede a insolação do plano vertical, que passa a ocorrer a partir das 12:00h no solstício de verão, com gradual diminuição até atingir, no solstício de inverno, o intervalo mínimo de incidência solar. Apenas o Emboque Vista Alegre (TI-3) difere por sua orientação Sul, com insolação praticamente total, próximo ao solstício de verão, mas nula a partir do equinócio até o solstício de inverno. Esse emboque, mesmo com orientação Sul, mostrou grande potencial de ofuscamento. Observa-se que, embora com o entorno do portal em sombra, as elevadas luminâncias da pista e da parcela de céu visível direcionam um alto fluxo luminoso no sentido do observador. Esta situação deve ser agravada no solstício de verão, quando o azimute e a altura solar acarretam em aumento da insolação na pista, atingindo ainda o plano do portal em certos períodos.

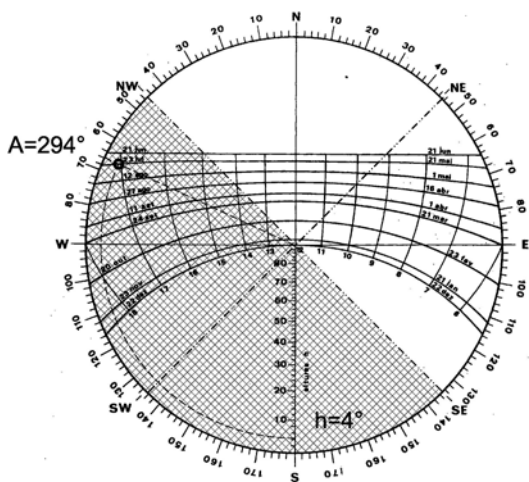


ILUSTRAÇÃO 129 – Máscara TE-1: Pl. Vertical (45°NE)

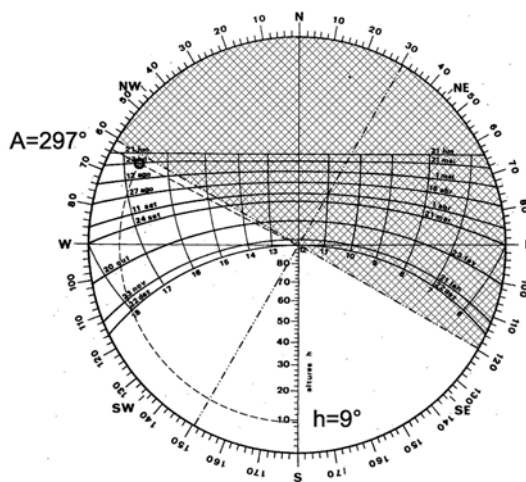


ILUSTRAÇÃO 130 – Máscara TI-1: Pl. Vertical (30°SO)

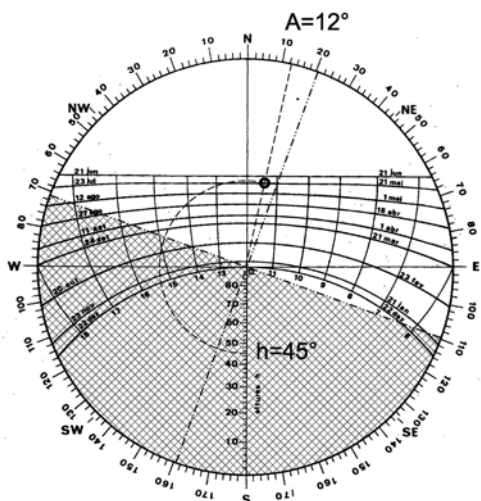


ILUSTRAÇÃO 131 – Máscara TE-2: Pl. Vertical (20°NE)

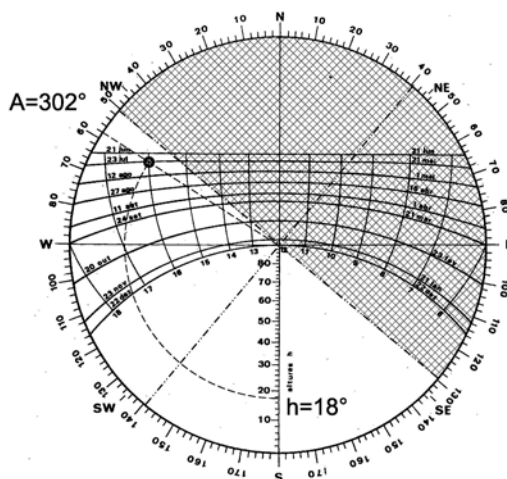


ILUSTRAÇÃO 132 – Máscara TI-2: Pl. Vertical (40°SO)

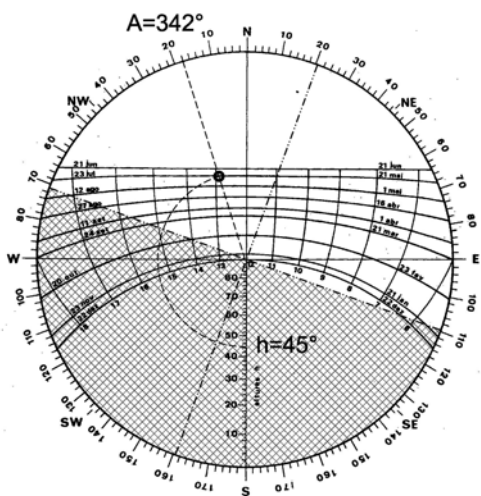


ILUSTRAÇÃO 133 – Máscara TE-3: Pl. Vertical (20°NE)

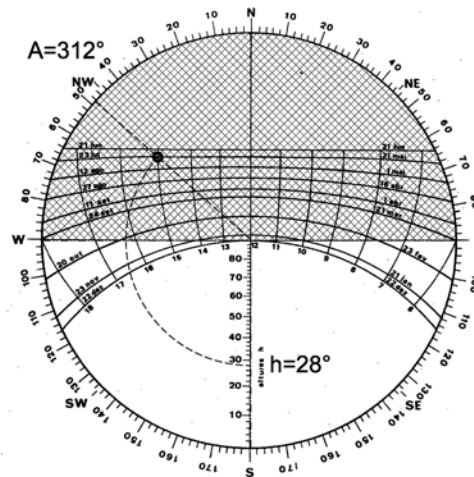


ILUSTRAÇÃO 134 – Máscara TI-3: Pl. Vertical (0°S)

Devido à inclinação dos raios solares em relação ao plano vertical e horizontal, a luminância é variável nas imediações do portal durante o período de insolação. Na data escolhida para as medições, a altura solar aproximava-se de 40° às 12:00h, parecendo ideal por sua posição quase equivalente em relação aos planos vertical e horizontal na orientação Norte. Entretanto, a alta refletância do pavimento caracterizou um desequilíbrio na influência desses planos, aumentando o potencial da pista em relação ao plano do portal. Esta questão poderá ser relevante, mas envolve outros elementos como a proximidade do campo visual central e as variações da luminância, da parcela de céu visível, em função da altura solar. Além disso, a refletância do pavimento é um dos elementos constituintes do **SAV**, que poderá ser composto, em conjunto ou exclusivamente, pelos tratamentos de superfície.

Considera-se que as medidas tomadas nos emboques com a orientação 20° NE (TE-2 e TE-3) confirmaram as premissas adotadas e podem ser admitidas como representativas do momento crítico nesses emboques, sendo ainda ampliadas para o Emboque Jesus (TE-1), pois além de atenderem às condicionantes geométricas analisadas previamente, aproximaram-se dos valores recomendados nas normas internacionais pesquisadas.

Além do **Método** L_{seq} , segundo a ANSI/IESNA (1996, p.7; 2005, p.6), a luminância na Zona Limiar L_{th} pode ser obtida em função das características do emboque, velocidade do tráfego e direção do motorista⁴⁴. Por este procedimento, os valores de referência para L_{th} nos emboques Norte (direção Sul do motorista) e Sul (direção Norte do motorista) seriam, respectivamente, 230 e 200 cd/m^2 . No primeiro caso, o valor de referência está abaixo dos obtidos pelo **Método** L_{seq} nos emboques TE-2 e TE-3, que correspondem a 371 e 308 cd/m^2 , mas para o emboque TI-3, orientação 0° Sul, o valor calculado (174 cd/m^2) está abaixo dos valores de referência ANSI/IESNA.

Atribuíram-se à refletância do pavimento de concreto os resultados mais altos calculados para os emboques TE-2 e TE-3 e, ao horário das medições, os valores mais baixos obtidos no emboque TI-3. A tabela ANSI/IESNA que fornece os valores de referência não especifica o pavimento. A refletância do asfalto está em torno de 0,15; enquanto a refletância medida no pavimento do Rodoanel foi de 0,30. No caso

⁴⁴ Ver TAB.7 e IL.89 na seção 4.4.2.2.

do TE-2, por estar em obra no momento da medição, havia diversas manchas muito claras na pista, o que deve ter influenciado no aumento do resultado.

Por fim, destacam-se os seguintes aspectos:

- Em relação ao melhor período para efetuar as medições, a norma inglesa BS 5489 recomenda escolher o período anual de luminância máxima no entorno do portal, que na Inglaterra deve corresponder ao solstício de verão (latitude acima de 50°). A norma ainda alerta sobre a possibilidade de tal fenômeno ocorrer no inverno, devido à neve nas imediações do portal, e também quanto à necessidade de efetuar medições em diversos dias. Embora os recursos disponíveis na pesquisa dificultem aplicar certos procedimentos recomendados, como diversas medições durante o ano, os cálculos confirmaram o planejamento das medições adotado no Rodoanel Mário Covas, buscando obter a condição mais desfavorável nos emboques da Pista Externa. As luminâncias registradas ao redor do portal mostraram-se elevadas, de acordo com os valores estimativos pesquisados, e a luminância na Zona Limiar L_{th} obtida pode ser considerada representativa do momento crítico nos emboques orientados para Norte;
- Nos emboques da Pista Interna (orientação S e SO), predominaram valores significativamente mais baixos para L_{th} , em relação aos da Pista Externa (orientação NE). Mesmo que, nos túneis da Pista Interna, as medições não tenham correspondido ao momento crítico, os valores calculados de L_{th} revelaram um potencial de conservação de energia apenas pela observação dos horários e do período anual, o que poderá otimizar a automação do sistema artificial de iluminação;
- As luminâncias dos diversos tipos de revestimentos ao redor do portal mostraram grande variação, com importante influência nos resultados obtidos para L_{th} ;
- Para diminuir o ofuscamento, e conseqüentemente o **Efeito Buraco Negro** na entrada do túnel, é fundamental diminuir a luminância nas imediações do portal. Nesse sentido, as vegetações de pequeno a grande porte, mesmo quando sob radiação solar direta, apresentaram bom desempenho se comparadas a outros materiais. Por sua constituição peculiar de cheios e vazios, conseguem absorver a luz para seu interior, equilibrando as regiões

claras e escuras. Já as forrações como gramados, comuns ao redor de rodovias, não são tão eficazes. Embora melhores que outros materiais como concreto, não conseguem o mesmo efeito que vegetações maiores, direcionando a luz por reflexão. Na IL.126, a grande massa de vegetação ao lado direito do Emboque Gramado não ultrapassa $0,94 \text{ kcd/m}^2$, enquanto as áreas gramadas estão em torno de $1,95 \text{ kcd/m}^2$ e as empenas de concreto ultrapassam 6 kcd/m^2 ;

- Ao adotar uma recomendação única para a iluminação da Zona Limiar, o Projeto de Norma ABNT desconsidera elementos significativos abordados pelas normas internacionais, divergindo substancialmente destas por não adotar um método de cálculo que avalie as condições do emboque de entrada do túnel. O Projeto de Norma ABNT está em revisão, segundo informações obtidas no IEEUSP, que participa da comissão de estudo. Entretanto, é urgente a sua conclusão, pois a prática brasileira tem utilizado suas recomendações que, pelo presente estudo, não atendem às necessidades de iluminação diurna em túneis rodoviários.

Capítulo 6: DISPOSITIVO PARA ADAPTAÇÃO VISUAL (DAV)

Na seção 4.3 foram apresentados alguns exemplos de sistemas aplicados para prover a iluminação de túneis rodoviários. A maior quantidade observada de exemplos existentes foi o túnel falso, configurando um dispositivo com iluminação zenital proporcionada através de uma tela à prova de penetração solar. A luz natural difusa passa pelas aberturas da tela e a luz solar direta é refletida nos seus próprios componentes, antes de penetrar no espaço confinado.

Dentre as alternativas identificadas para compor o **Sistema para Adaptação Visual (SAV)**, o túnel falso foi a que mostrou maior complexidade e potencial pelo enfoque da pesquisa. É preciso desenvolver um projeto arquitetônico com tal geometria que proporcione, através da luz natural, a iluminação necessária na Zona Limiar L_{th} , durante o período diurno. Este capítulo está direcionado para a análise desta alternativa, adotando-se, para o túnel falso, a nomenclatura **Dispositivo para Adaptação Visual (DAV)**, o qual deve estar localizado na Zona de Aproximação – trecho da rodovia aberta, contíguo ao portal de entrada do túnel – para onde são transferidas a Zona Limiar e a Zona de Transição. Assim, o portal de interesse para o estudo do **Efeito Buraco Negro** passa a ser o portal do **DAV** e a Zona de Aproximação também é deslocada para além do novo portal (IL.135).

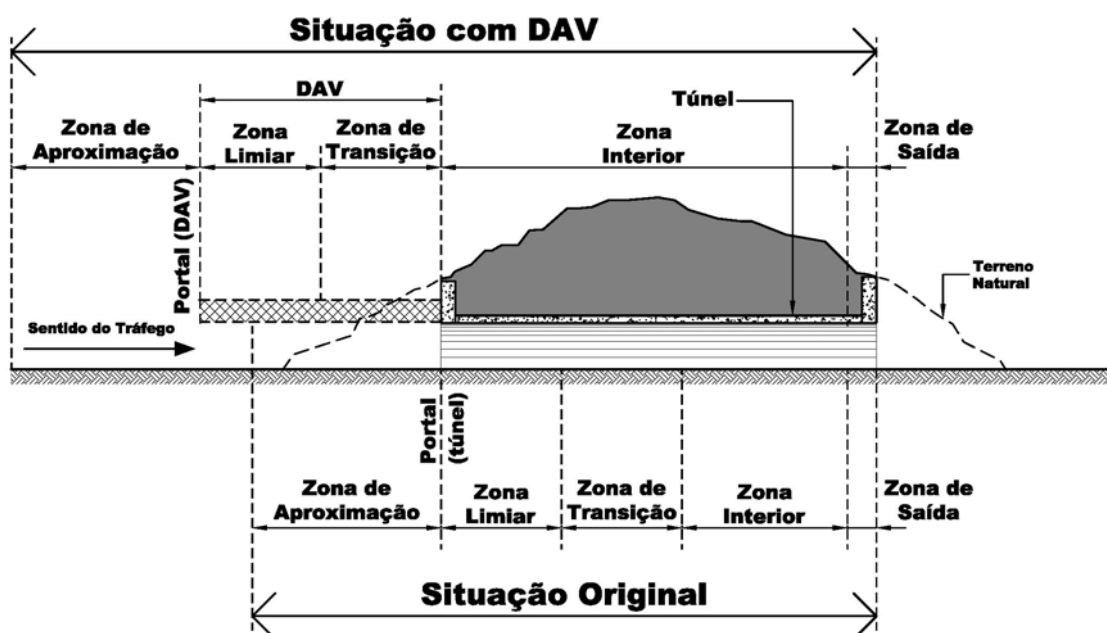


ILUSTRAÇÃO 135 – Posicionamento do DAV: Corte Longitudinal
 FONTE – SCHREUDER, 1967, p.158; ANSI/IESNA, 2005, p.2, adaptação nossa.

Buscando obter uma avaliação prévia do desempenho de iluminação do DAV, foram analisadas tipologias de iluminação zenital para aplicação em um dos túneis do Rodoanel Mário Covas. Procurou-se selecionar o emboque que apresentasse as condições mais adversas para o projeto. O primeiro aspecto analisado foi a exigência quanto ao nível de iluminação na Zona Limiar. Conforme previsto, devido à insolação no plano vertical, as luminâncias mais elevadas predominaram nos emboques da Pista Externa, orientados para Nordeste. Destes, dois possuem orientação 20°NE (TE-2: Emboque Parque Imperial e TE-3: Emboque Gramado) e apenas o TE-1: Emboque Jesus está orientado 45°NE.

Embora o cálculo no emboque TE-1 tenha apresentado valores significativamente mais baixos para L_{th} , sua avaliação foi prejudicada pelo horário das medições. A maior parcela de céu no campo visual do motorista e a orientação dos emboques TE-2 e TE-3 estão coerentes com o cálculo, resultando nos valores mais elevados para L_{th} dos seis emboques analisados.

Outro aspecto a ser observado é quanto à orientação 20°NE. Por implicar em uma obliquidade de 20° com a direção Norte / Sul, resulta em maior dificuldade no projeto do **DAV**, pois elementos com pequenos desvios do curso da estrada prejudicam a referência do motorista. Já a orientação 45°NE, que poderia parecer mais desfavorável, define um alinhamento paralelo e outro ortogonal pelas diagonais de um quadrado imaginário com dois vértices na borda da pista, resultando em dois lados orientados Norte e Sul, e facilitando a disposição de aberturas zenitais com melhor aproveitamento da luz natural.

No capítulo anterior, observou-se que o maior nível de iluminação necessário na Zona Limiar ocorreu no TE-2: Emboque Parque Imperial, e que as obras em execução no momento das medições influenciaram nas leituras, deixando áreas muito claras na pista. Assim, consideraram-se mais realísticas as condições registradas no Emboque Gramado (TE-3), sendo este o emboque escolhido para análise.

Pelo **Método L_{seq}** , a Zona Limiar no Emboque Gramado (TE-3) deve ter uma iluminância média acima de 3.225 lx, mas também precisa apresentar boa uniformidade na iluminação.

Considerando as características geométricas do **DAV** e os requisitos da iluminação, as aberturas zenitais parecem apropriadas, pois normalmente proporcionam boa distribuição e bom desempenho quantitativo, condição

fundamental pelo alto nível exigido na pista. Além disso, não pode haver penetração solar no interior do dispositivo em nenhum momento, e as aberturas devem ser precisamente determinadas para o aproveitamento apenas da luz difusa. Tal aspecto, para a latitude da cidade de São Paulo, restringe, principalmente, as possibilidades das aberturas zenitais, limitando sua orientação para Sul. Mesmo sendo utilizados fechamentos translúcidos, a alta potência da luz solar direta impede equilibrar os períodos em que tal situação não ocorre, além da dificuldade em garantir a transmissão luminosa destes elementos devido à agressividade do meio, implicando em constante manutenção.

As diversas tipologias de iluminação zenital projetadas foram testadas para atender aos requisitos de iluminação na Zona Limiar. A avaliação do desempenho luminoso de cada uma foi elaborada através da técnica Radiance / Ecotect, a qual consiste em utilizar o algoritmo do Radiance dentro da interface mais amigável do Ecotect. Esta técnica é proposta pelo próprio aplicativo Ecotect e foi corroborada durante a pesquisa, mostrando resultados confiáveis, quando comparados a medições em modelos físicos. Através da migração entre os aplicativos, a técnica alia a facilidade operacional do Ecotect com um algoritmo considerado validado, como foi visto na seção 3.4.

6.1 TIPOLOGIA 1: ABERTURA ZENITAL EM *SHED*

A primeira tipologia estudada para compor o **DAV** utilizou o sistema *shed* de iluminação zenital. Como o Emboque Gramado possui orientação 20°NE, as aberturas dos *sheds* deverão ter orientação inversa (20°SO) para seguir o alinhamento da pista e evitar a penetração solar, parecendo ser uma boa opção pelas condicionantes locais.

Segundo o traçado de máscaras (IL.136), nesta orientação são necessárias duas obstruções verticais infinitas, uma com ângulo de sombra⁴⁵ βd de 44°, e outra com ângulo de sombra βe de 84°.

⁴⁵ O ângulo de sombra será denominado β da esquerda (βe) ou da direita (βd), em função de sua localização em relação à normal ao plano da abertura pelo lado externo (FROTA; SCHIFFER, 2000, p.94-6).

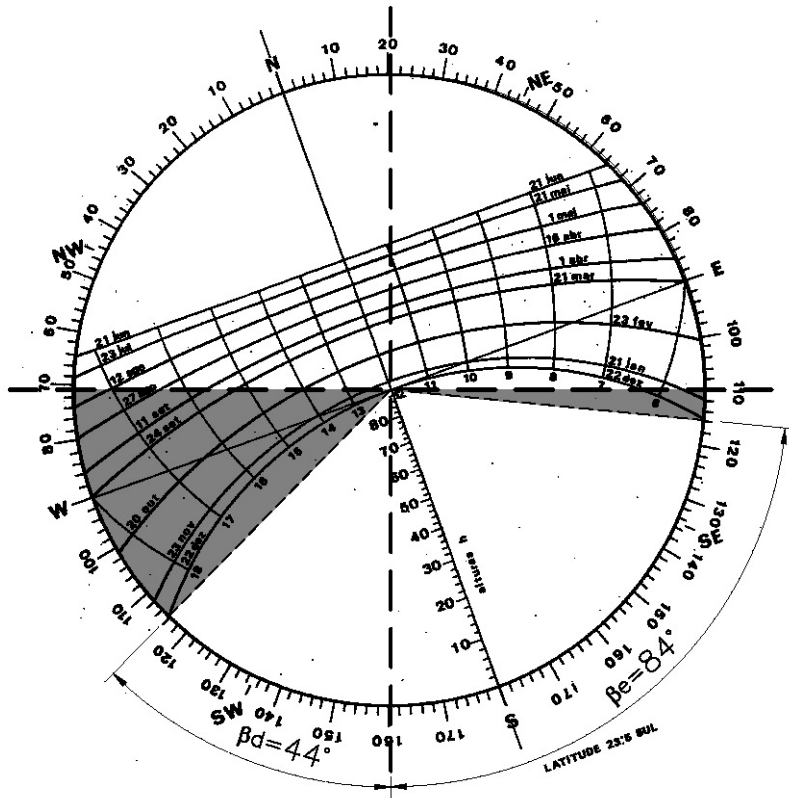


ILUSTRAÇÃO 136 - Tipologia1: Traçado de Máscaras

Adotando a geometria encontrada no traçado de máscaras, elaboraram-se duas alternativas: Tipologia 1a e Tipologia 1b.

A Tipologia 1 foi simulada no Radiance/Ecotect, adotando os parâmetros da TAB.27.

TABELA 27 – Tipologia 1: Parâmetros das Simulações

Tipologia	Orientação da Abertura	Grade	Cobertura e Paredes		Pista		Data	Hora	Tipo de Céu
			Refletância* [Material] %	Reflexão Especular %	Refletância* [Material] %	Reflexão Especular %			
1a	20° SO	8x8	[Plástico Cinza] 50	0	[Plástico Cinza] 30	0	22/jun	12:00	CC
1b	20° SO	8x8	[Plástico Cinza] 50	0	[Plástico Cinza] 30	0	22/jun	12:00	CC

* Apenas para face 20°NE refletância = 0%

A Tipologia 1a possui superfícies opacas inclinadas a 18° e placas verticais de obstrução dividindo toda extensão das aberturas dos sheds (IL.137). As placas devem ser iguais – pois a placa esquerda de uma parcela da abertura é a placa direita da próxima parcela e vice-versa – e o seu dimensionamento é feito para a pior

situação, resultando em $\beta d = \beta e = 44^\circ$. Observa-se, ainda, que as laterais do **DAV**, com orientação Leste e Oeste, apresentam pouca possibilidade de luz complementar sem penetração solar.

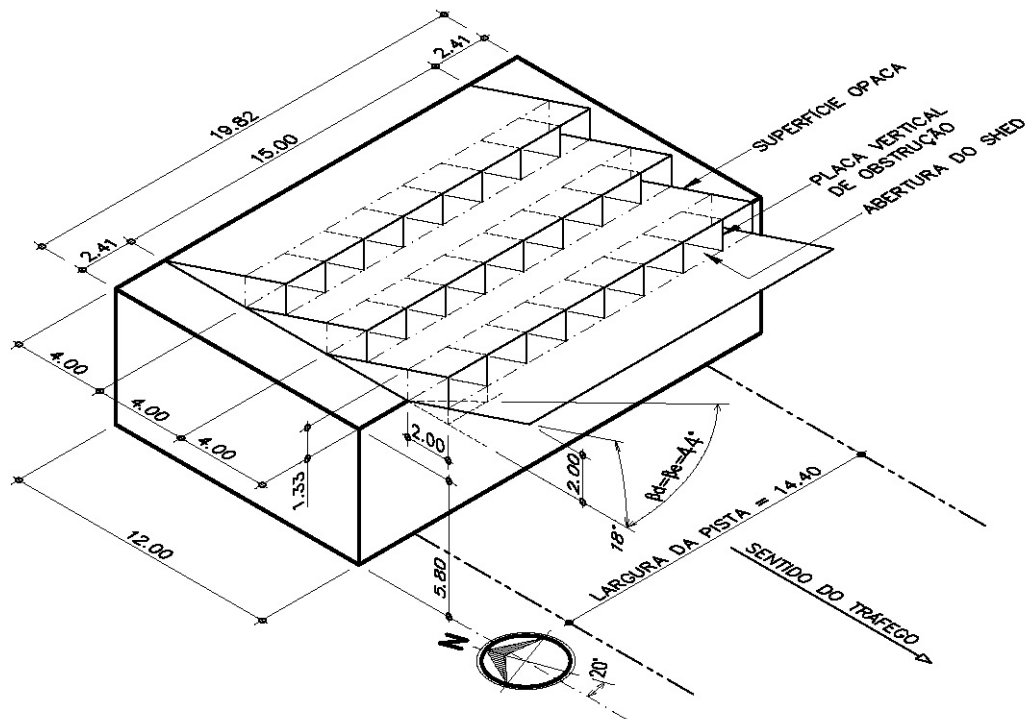


ILUSTRAÇÃO 137 - Tipologia 1a: Dimensionamento (Perspectiva Isométrica)

Como a largura disponível para a implantação do **DAV** é 19,82m, adotou-se um módulo para estudo de 19,82 x 12,00 x 5,80m, com uma faixa central para as aberturas zenitais de 15,00m de largura por 12,00m de comprimento. Cada *shed* ocupa 4,00m desta faixa no sentido do comprimento, resultando em três *sheds* por módulo.

Os fechamentos NE e SO, ortogonais à pista, não existem na realidade, sendo um artifício na composição do módulo. Entretanto, apenas o fechamento NE distorce significativamente os resultados, pois as aberturas dos *sheds* estão direcionadas para esta superfície, incrementando a iluminação em suas imediações. Já na face SO, o fechamento substitui o potencial luminoso das aberturas do módulo seguinte, influenciando negativamente no resultado, mas em menor grau comparado à face NE. Portanto, nas simulações (IL.138 e 139) aplicou-se refletância nula na face 20°NE e manteve-se, na face 20°SO, a mesma refletância das demais superfícies.

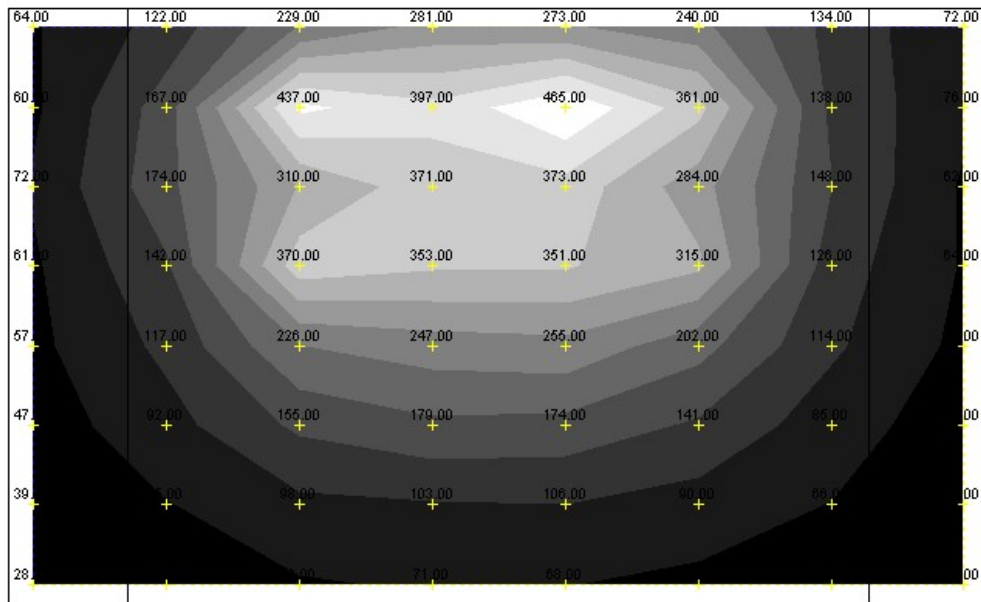
Analysis Grid

Radiance Grid Pts

Contour Range: 27 - 427 lx

In Steps of: 40 lx

© ECOTECT v5



lx

427+

387 - 427

347 - 387

307 - 347

267 - 307

227 - 267

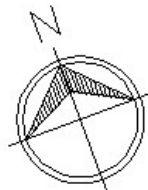
187 - 227

147 - 187

107 - 147

67 - 107

27 - 67



Average Value: 160.89 lx

Visible Nodes: 64

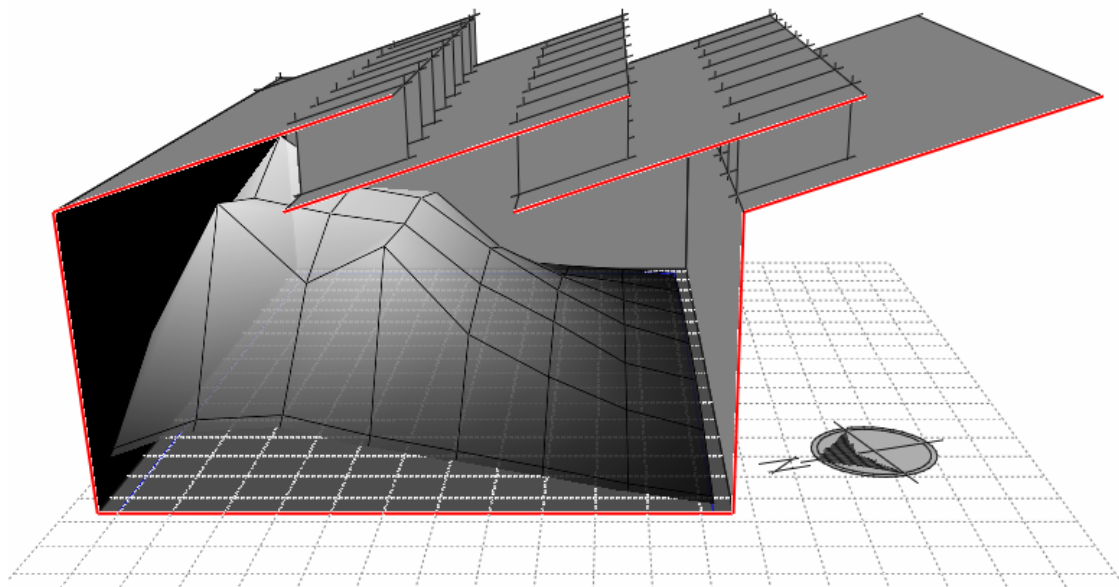
ILUSTRAÇÃO 138 - Tipologia 1a: Simulação RADIANCE/ECOTECT (Planta)

Analysis Grid

Radiance Grid Pts

Value Range: 27 - 427 lx

© ECOTECT v5



lx

427+

387-427

347-387

307-347

267-307

227-267

187-227

147-187

107-147

67-107

27-67

ILUSTRAÇÃO 139 - Tipologia 1a: Simulação RADIANCE/ECOTECT (Vista Lateral)

O resultado mostrou níveis de iluminação muito baixos. Os valores máximo e médio obtidos (466 e 161 lx) representam apenas 14,45% e 5% da iluminância calculada para a Zona Limiar (3.225 lx).

A inclinação 18° (32,5%) das superfícies opacas foi adotada por ser um valor médio normalmente utilizado em coberturas de grandes galpões, abrangendo a maioria das telhas utilizadas para esse fim. A inclinação pode ser alterada, mas o seu aumento também implica em maiores dimensões das placas verticais, com reflexos na complexidade construtiva.

Na Tipologia 1b, a inclinação das superfícies opacas é de 36° (72,6%). Mantendo os mesmos parâmetros da simulação anterior, foi observado um acréscimo significativo no nível de iluminação. Além do aumento da altura das aberturas, a nova inclinação aproximou o ângulo de incidência da luz solar direta à normal das superfícies opacas da cobertura, melhorando o aproveitamento da luz por reflexão (IL.140, 141 e 142).

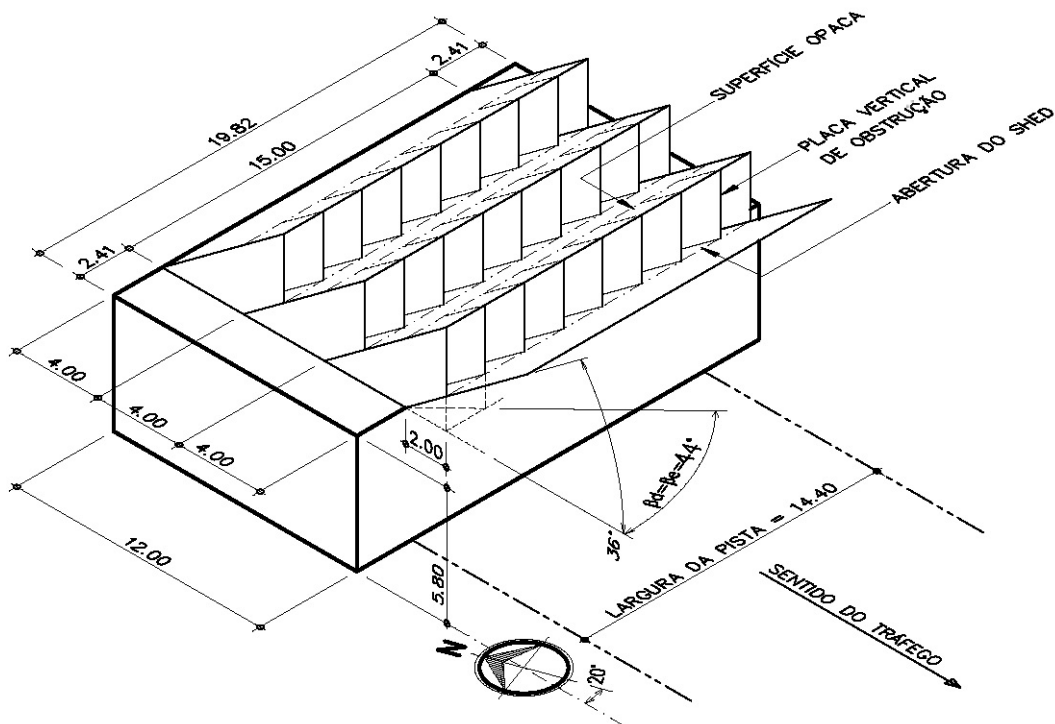
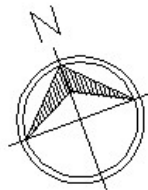
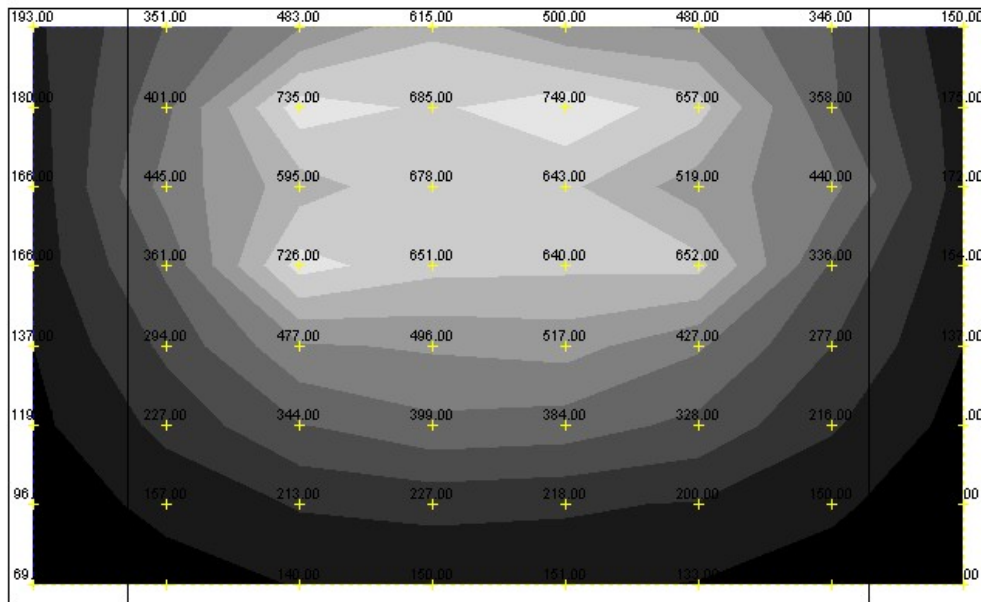


ILUSTRAÇÃO 140 – Tipologia 1b: Dimensionamento (Perspectiva Isométrica)

Analysis Grid

Radiance Grid Pts
Contour Range: 67 - 767 lx
In Steps of: 70 lx
© ECOTECT v5



Average Value: 336.88 lx
Visible Nodes: 64

ILUSTRAÇÃO 141 - Tipologia 1b: Simulação RADIANCE/ECOTECT (Planta)

Analysis Grid

Radiance Grid Pts
Value Range: 67 - 767 lx
© ECOTECT v5

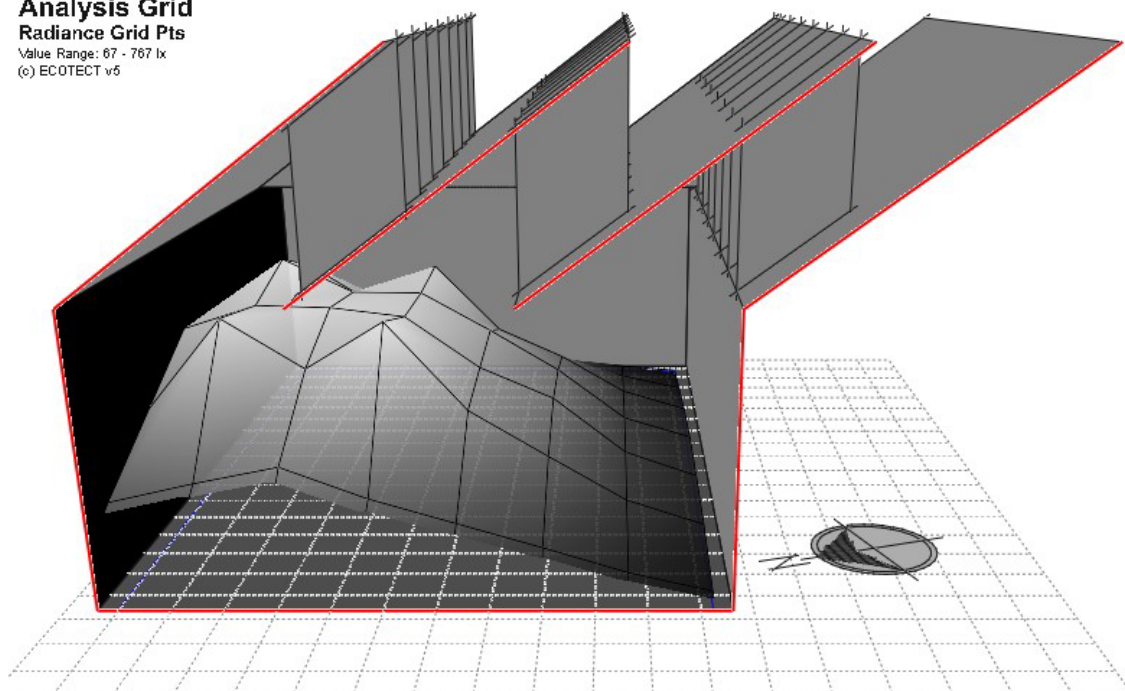


ILUSTRAÇÃO 142 - Tipologia 1b: Simulação RADIANCE/ECOTECT (Vista Lateral)

Mesmo com melhor desempenho, os valores máximo (750 lx) e médio (337 lx) atingidos na Tipologia 1b aproximam-se de 23% e 10% da iluminância necessária na Zona Limiar. Considerando que as aberturas estão na orientação com maior potencial de aproveitamento da luz difusa, e que a luz solar direta refletida também foi bem aproveitada – pois as superfícies opacas da cobertura estão voltadas para Norte, com inclinação próxima à latitude acrescida de 12°, resultando em um ângulo de incidência dos raios solares, de aproximadamente 104° às 12:00h do solstício de inverno – os resultados mostraram-se insuficientes pelos seguintes aspectos:

- Mesmo considerando o valor máximo da Tipologia 1b, o custo e complexidade da obra não justificam sua aplicação para suprir apenas 23% do necessário para a Zona Limiar;
- Os planos de cobertura implicam em captação de águas pluviais, configurando mais um complicador para sua implantação;
- O sistema construtivo não é apropriado para se adequar à geometria da pista. A curvatura e diferença de nível em toda a extensão exigirão artifícios e adaptações que podem dificultar, ou até comprometer o desempenho, projeto e construção do dispositivo;
- Devido à pouca maleabilidade do sistema construtivo, poucos recursos podem ser utilizados para o resultado arquitetônico da obra. A Tipologia 1b, de melhor desempenho, apresenta o perfil característico “dente de serra” dos galpões industriais, restringindo as possibilidades plásticas para integrar o dispositivo à paisagem;
- Os planos da cobertura orientados para Norte – que funcionam como elemento refletor para o interior do dispositivo e, por isso, deverão ser em cor clara – podem aumentar o potencial de ofuscamento no entorno do portal, prejudicando a função essencial do dispositivo. Além disso, a agressividade do meio e dificuldade de acesso a essas superfícies podem comprometer seu desempenho, exigindo constante manutenção com reflexos no custo operacional do sistema.

Os aspectos mencionados, somados aos resultados das simulações, não comprovam, até aqui, a hipótese da pesquisa. Embora seja a primeira concepção, as aberturas zenitais orientadas para Sul na latitude de São Paulo configuram um dos

recursos de maior potencial em projetos convencionais, para o aproveitamento da luz difusa sem penetração solar. Assim, uma importante alternativa mostrou-se deficiente para compor o **DAV**, tornando necessário um retorno às bases da pesquisa para se encontrarem possíveis respostas.

6.2 REVISÃO DO PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

A obstrução total da penetração solar resulta, geralmente, em dispositivos abrangendo área maior que a necessária, devido ao próprio desenho do elemento, ou para facilitar sua execução. Na Tipologia 1, formam-se duas obstruções horizontais infinitas: a primeira devido ao avanço de 2,00m da cobertura no alinhamento da abertura para compor as obstruções verticais infinitas; a segunda é originada pela própria inclinação da cobertura, que obstrui a abertura contígua. Além disso, a repetição do ângulo de sombra direito $\beta d = 44^\circ$ no lado esquerdo, onde é preciso apenas 84° , rejeita uma significativa parcela da abóbada que poderia ser aproveitada.

As IL.143b e 144b mostram as máscaras das obstruções para as Tipologias 1a e 1b. A área na cor cinza sólida representa a máscara necessária das obstruções, para que não haja penetração solar, e a área hachurada representa a máscara resultante do desenho das tipologias.

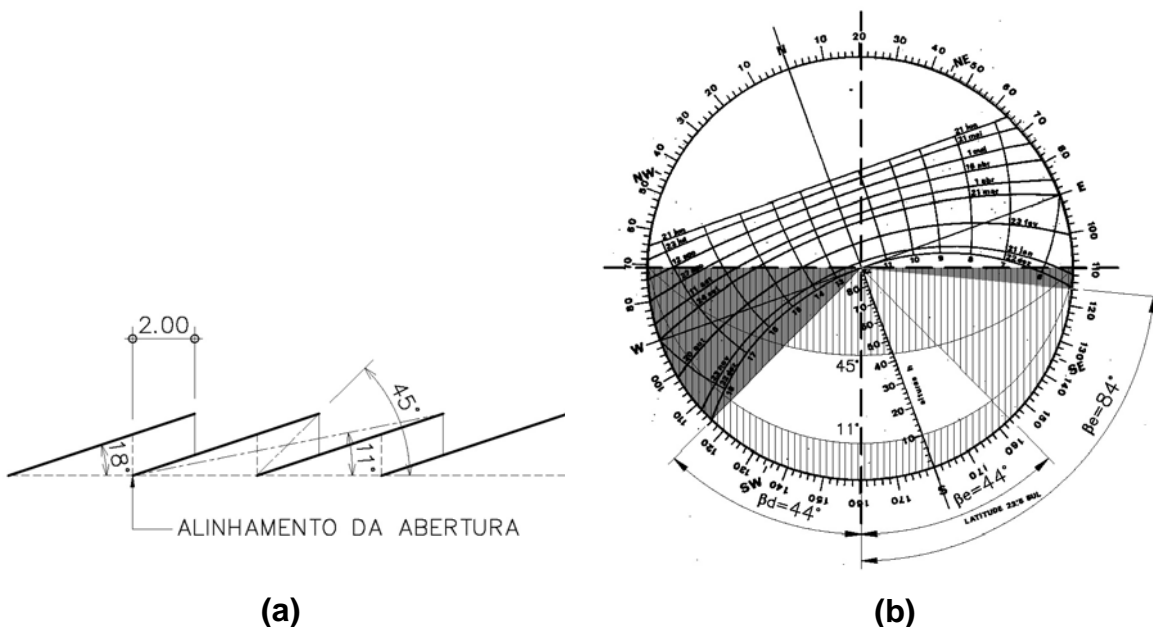


ILUSTRAÇÃO 143 – Tipologia 1a: (a) Corte Esquemático; (b) Máscara das Obstruções

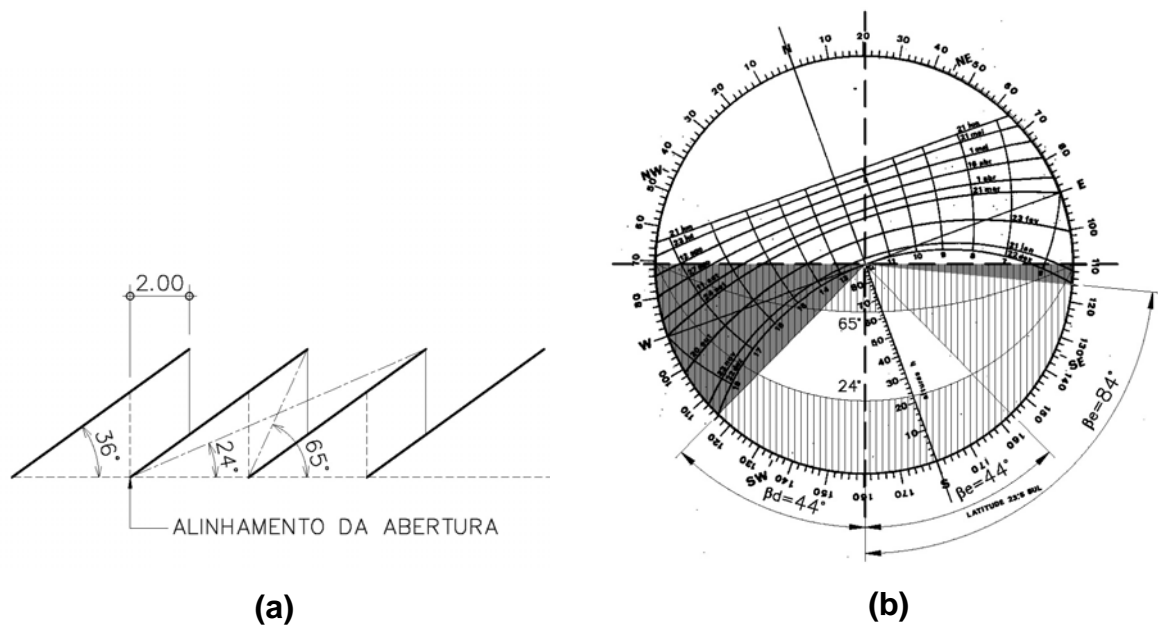


ILUSTRAÇÃO 144 – Tipologia 1b: (a) Corte Esquemático; (b) Máscara das Obstruções

Observa-se que grande parcela da abóbada celeste foi obstruída desnecessariamente. Embora possam ser elaborados alguns recortes para aproximar a área efetivamente obstruída da área necessária, são poucos os planos passíveis deste recurso. Apenas o avanço de 2,00 metros da cobertura poderia ser chanfrado entre as placas verticais, mas este procedimento dificultaria sobretudo a execução e acabamento, sendo talvez inviável pela parcela de melhora na iluminação. Entretanto, esta constatação leva a uma reflexão sobre o potencial de luz difusa que não está sendo aproveitado nas alternativas da Tipologia 1.

6.2.1 O MÉTODO DE SWIERSTRA

Pelo nível atingido na Tipologia 1b, aproximadamente um quarto do necessário, a área da abóbada obstruída desnecessariamente (IL.144b) deve suprir o déficit identificado nas simulações. Portanto, uma nova tipologia que apresente maior eficiência no traçado de máscaras poderá atender aos requisitos de iluminação e viabilizar a implantação do **DAV**.

Swierstra (1952 apud SCHREUDER, 1964, p. 33) desenvolveu um método específico para determinar a forma geométrica das aberturas de uma tela horizontal que seja à prova de penetração solar. Por esse método, define-se a borda da malha da tela em função de $h \cot \varepsilon$, onde h é a altura da malha e ε é a altura solar máxima em determinada direção. A IL.145 mostra um diagrama que é a aplicação desse método para o desenho da malha da tela instalada no Túnel Velsen. O diagrama é

válido apenas para a latitude 52°, admitindo as lâminas da malha em posição vertical com $h=1$.

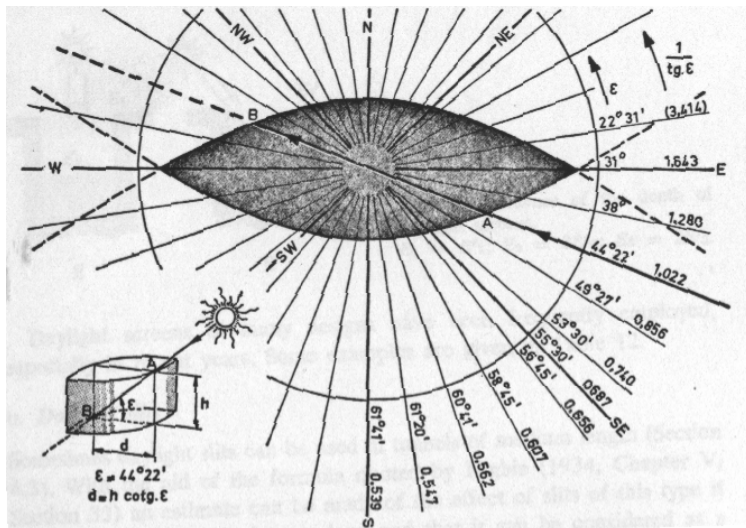


ILUSTRAÇÃO 145 - Diagrama para Determinação da Tela à Prova de Sol: Lat. 52°N
FONTE - WENTINK, 1962 apud SCHREUDER, 1964. p.34

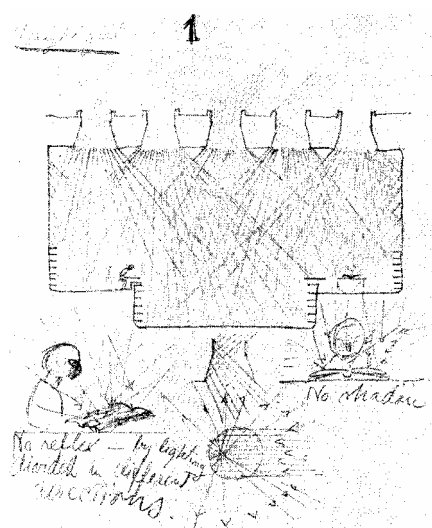


ILUSTRAÇÃO 146 - Biblioteca Viipuri: Estudo de Iluminação Natural
FONTE - WESTON, 1995, p.67

Existem similaridades entre a tela à prova de penetração solar do Túnel Velsen (WENTINK, 1962 apud SCHREUDER, 1964, p. 33) e a iluminação zenital em algumas obras de Alvar Aalto. Na Biblioteca “Viipuri”, Viborg, 1932-1935, num clima em que a luz natural é preciosa pela elevada latitude, Aalto consegue dosar a luz de forma surpreendente. As proporções geométricas dos poços de iluminação com aproximadamente 1,80m de diâmetro são cuidadosamente determinadas pela altura do Sol, e a luz solar direta é obstruída e refletida para o ambiente. Consegue, assim, uma iluminação difusa uniforme, livre de sombras e de ofuscamento (IL.146).

Tanto os estudos de Aalto como os de Wentink são aplicados em elevadas latitudes, onde a altura solar nunca alcança o Zênite. Nestas condições, a idéia de uma célula em um plano horizontal à prova de penetração solar mostra-se eficaz para o aproveitamento da luz difusa. Em algumas obras na Holanda, como Coentunnel, Schipholtunnel e Velsen, aplicando-se a tela no emboque dos túneis, alcançaram-se níveis elevados, atingindo médias em torno de 25.000 lux em alguns casos. Entretanto, para latitudes abaixo ou próximas de 23,5°, como é o caso de praticamente todo o território brasileiro, a tela horizontal de lâminas verticais nunca será à prova de penetração solar, pois em algum momento o Sol passará pelo Zênite, penetrando através da tela. Contudo, algumas adaptações poderão ampliar a

aplicação do método de Swierstra, configurando uma nova célula com obstrução total da luz solar direta para qualquer latitude, como será apresentado a seguir.

6.2.2 ADAPTAÇÃO DO MÉTODO DE SWIERSTRA PARA QUALQUER LATITUDE

Uma das primeiras idéias, advinda da discussão introduzida na seção anterior sobre o método de Swierstra, é a inclinação das lâminas da tela. Desta forma, aproxima-se da Tipologia 1, pois as lâminas formariam pequenos *sheds*, com desempenho semelhante aos resultados das simulações apresentadas na seção 6.1.

Outra opção está na inclinação da tela, mantendo as lâminas ortogonais ao seu plano. Assim, pode-se aplicar o mesmo método proposto por Swierstra, se o eixo de inclinação do plano da tela estiver orientado na linha Norte e Sul. O plano inclinado em uma latitude X irá corresponder ao plano horizontal em uma latitude Y, permitindo sempre encontrar, para qualquer latitude, um plano equivalente ao plano horizontal da latitude em que não ocorre penetração solar pela tela.

Esta constatação pode resultar numa alternativa a ser testada no **DAV**. Entretanto, os planos inclinados configuram um desenho semelhante ao aplicado na Tipologia 1, com alguns inconvenientes já mencionados. Aqui há uma alteração na região iluminante. As aberturas da tela estão no próprio plano inclinado, e os planos verticais, onde ficavam as aberturas na Tipologia 1, são vedados e voltados para Norte, como um *shed* invertido. Esta alternativa apresenta certas vantagens em relação à Tipologia 1. Com os planos inclinados compostos por telas, não há necessidade de captação de águas pluviais. A inclinação dos planos poderá ser diminuída em relação à Tipologia 1b. Para São Paulo, latitude 23,5° Sul, se quisermos adotar o diagrama aplicado para a latitude 52°, teremos a inclinação de 28,5° para o plano da tela direcionado para Sul, que corresponde à subtração das duas latitudes (IL.147).

A principal desvantagem desta opção é que a inclinação deve acompanhar a linha Norte / Sul verdadeira. Como o portal do TE-3 tem orientação 20°N, e a pista é praticamente ortogonal ao portal, os planos não poderão estar alinhados com a pista. Esta é uma desvantagem significativa, pois além das implicações construtivas, prejudica a referência do motorista, por definir linhas esconsas ao alinhamento da pista.

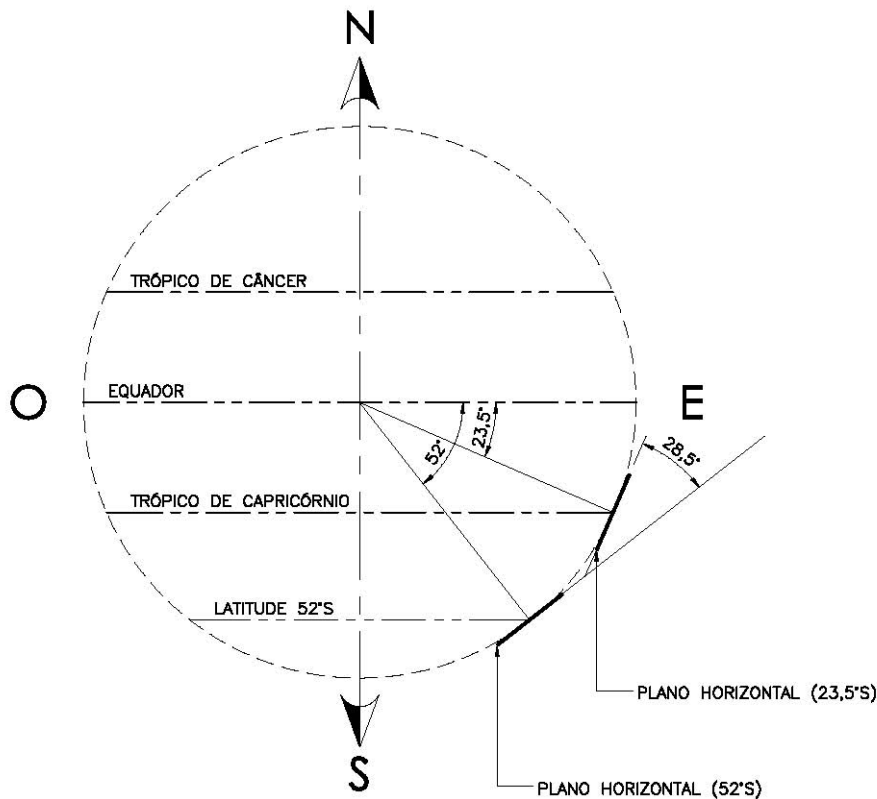


ILUSTRAÇÃO 147 – Plano Equivalente à Prova de Penetração Solar

Buscando aproveitar as características favoráveis do plano inclinado, concentrou-se no estudo do comportamento de apenas uma malha, admitida como uma célula que, ao ser multiplicada, formaria uma tela equivalente à tela original em análise.

Para facilitar sua multiplicação, partiu-se de uma célula-prisma de base quadrada com dois lados alinhados à lateral da pista, formando 20° com a linha Norte e Sul. Utilizaram-se dois diagramas de projeção ortogonal para determinação do maior ângulo de incidência solar no plano da base do prisma:

- Carta Solar, extraída do aplicativo ECOTECH;
- Transferidor de ângulo de incidência (FROTA, 2004. p.242).⁴⁶

Sobrepondo à Carta Solar o transferidor correspondente à inclinação da base, obtém-se a maior altura solar no plano da base. As IL.148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156 e 157 apresentam os diagramas sobrepostos para diversas inclinações da base (*Ai*).

⁴⁶ O transferidor de ângulo de incidência (FROTA) foi adaptado para o sistema de projeção ortogonal para se ajustar à carta solar ECOTECH. Embora este sistema dificulte a leitura de ângulos próximos do horizonte, mostrou-se adequado para uma análise preliminar, pois os pontos de interesse estão nas imediações do Zênite.

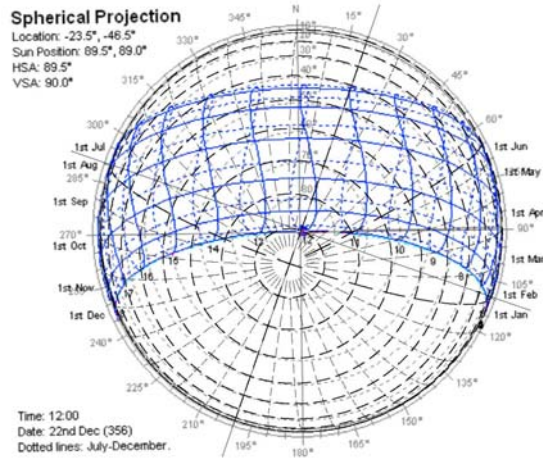


ILUSTRAÇÃO 148 – Diagramas Sobrepostos: $A_i=10^\circ$

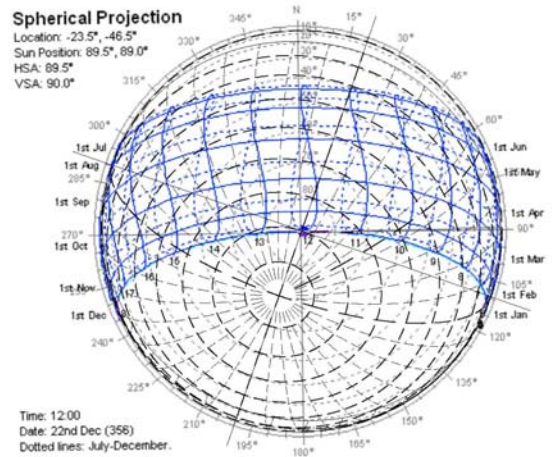


ILUSTRAÇÃO 149 – Diagramas Sobrepostos: $A_i=20^\circ$

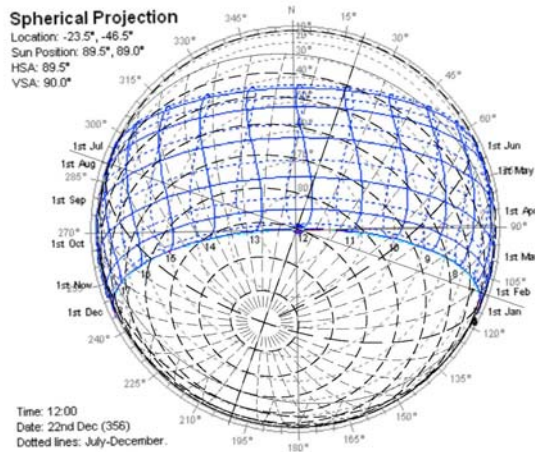


ILUSTRAÇÃO 150 – Diagramas Sobrepostos: $A_i=30^\circ$

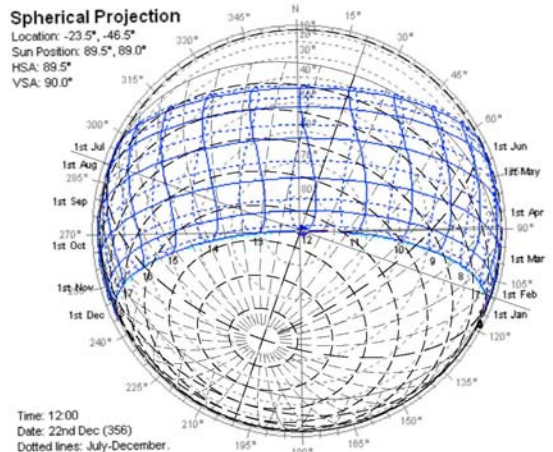


ILUSTRAÇÃO 151 – Diagramas Sobrepostos: $A_i=35^\circ$

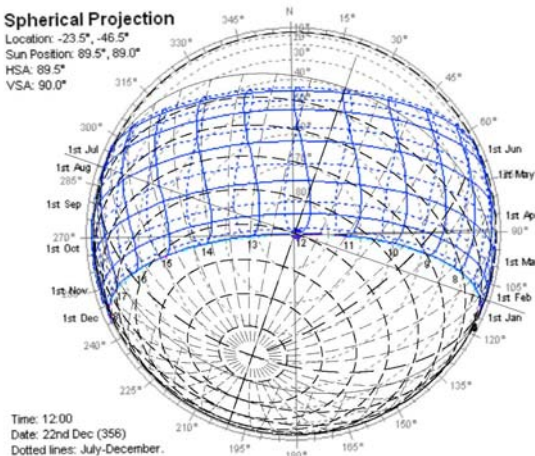


ILUSTRAÇÃO 152 – Diagramas Sobrepostos: $A_i=40^\circ$

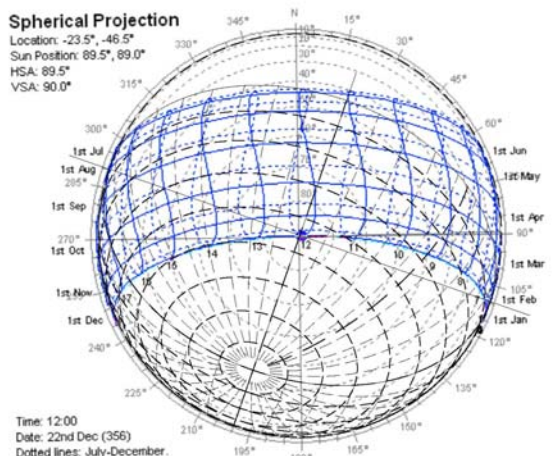
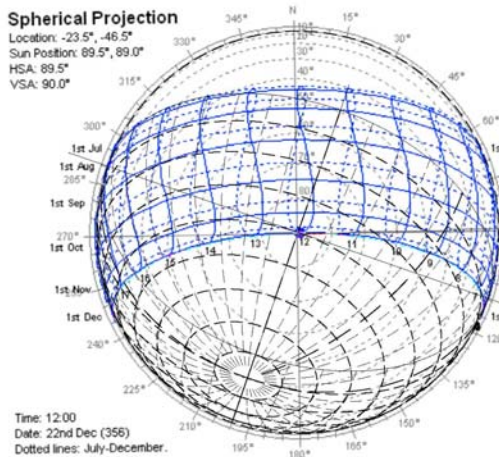
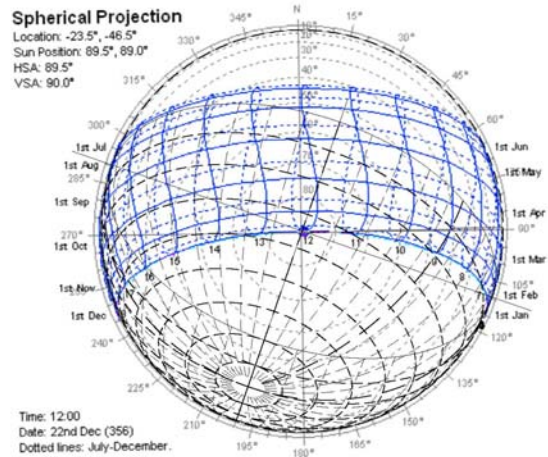
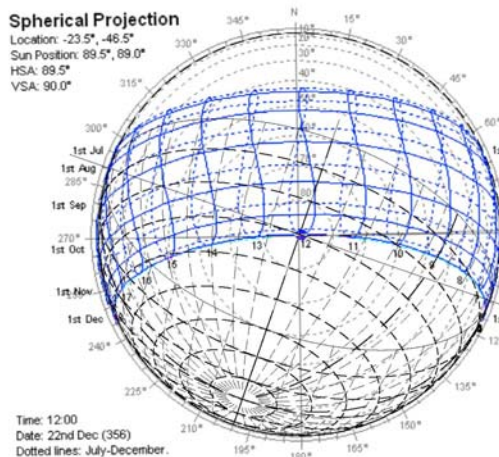
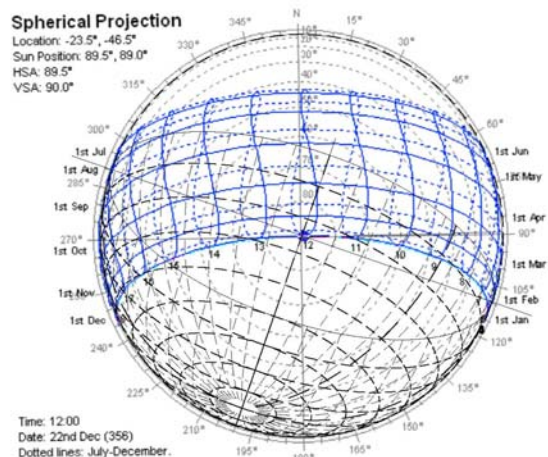


ILUSTRAÇÃO 153 – Diagramas Sobrepostos: $A_i=45^\circ$

ILUSTRAÇÃO 154 – Diagramas Sobrepostos: $A_i=50^\circ$ ILUSTRAÇÃO 155 – Diagramas Sobrepostos: $A_i=55^\circ$ ILUSTRAÇÃO 156 – Diagramas Sobrepostos: $A_i=60^\circ$ ILUSTRAÇÃO 157 – Diagramas Sobrepostos: $A_i=65^\circ$

A direção mais vulnerável da célula à penetração solar é sua diagonal, pois aí está o menor ângulo vertical de obstrução. Na sobreposição dos diagramas, observa-se que a maior altura solar em relação ao plano da base aproxima-se da diagonal da célula orientada na direção Sudeste / Noroeste, o que facilita a identificação da posição mais desfavorável quanto à penetração solar, que, nesse caso, coincide com essa diagonal da célula.

6.3 TIPOLOGIA 2: CÉLULA-PRISMA DE BASE QUADRADA

A concepção da Tipologia 2 partiu de uma célula-prisma de base quadrada para compor a tela à prova de penetração solar. Adotando 1,5m como o lado da base, através da sobreposição dos diagramas, pode-se determinar a altura do prisma à prova de penetração solar em função do ângulo de inclinação do plano da base (IL.158 e TAB.28).

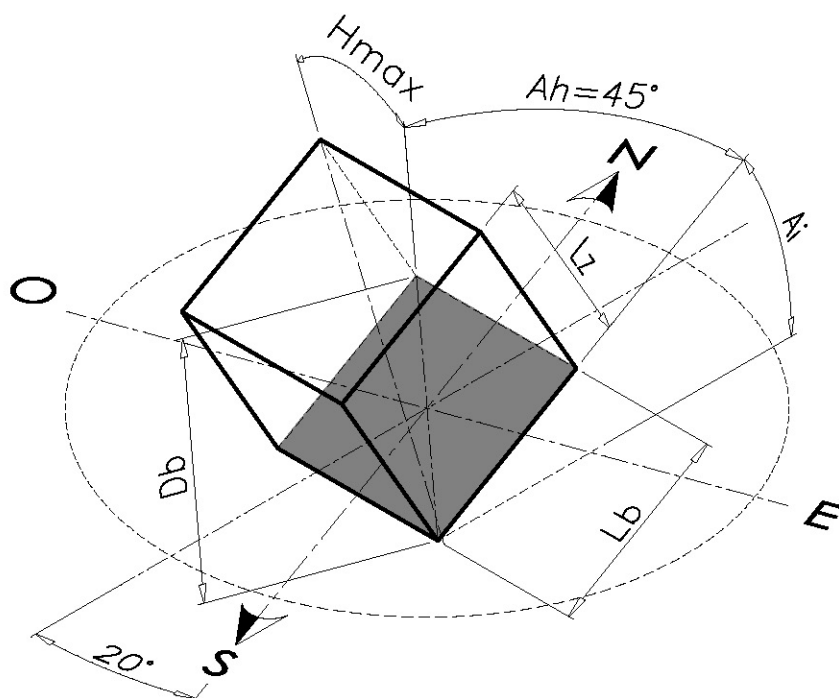


ILUSTRAÇÃO 158- Tipologia 2. Célula de Base Quadrada: Elementos de Cálculo

TABELA 28 – Cálculo das Arestas da Célula de Base Quadrada

Aresta da Base [Lb] (m) = 1,5							
Ângulo de Inclinação da Base [Ai] (graus)	Ângulo Horizontal para Altura Solar Max [Ah] (graus)	Altura Solar Max para ângulo Ah [Hmax] (graus)	Tangente de Hmax	Coseno Ah	Segmento Hmax [Diagonal da Base Db] (m)	Altura da Célula [Aresta Lz] (m)	Lz / Lb
10	45	82	7,12	0,71	2,12	15,09	10,06
20	45	72	3,08	0,71	2,12	6,53	4,35
30	45	63	1,96	0,71	2,12	4,16	2,78
35	45	58	1,60	0,71	2,12	3,39	2,26
40	45	55	1,43	0,71	2,12	3,03	2,02
45	45	51	1,23	0,71	2,12	2,62	1,75
50	45	47	1,07	0,71	2,12	2,27	1,52
55	45	45	1,00	0,71	2,12	2,12	1,41
60	45	42	0,90	0,71	2,12	1,91	1,27
65	45	40	0,84	0,71	2,12	1,78	1,19

A altura da célula Lz é inversamente proporcional ao ângulo de inclinação da base Ai, pois, quanto mais próximo o plano da base do plano horizontal, maior a necessidade de obstrução da penetração solar. Acima de 35°, a razão Lz/Lb atinge uma proporção abaixo de 2,25; um limite adequado para efeito de construção e manutenção.

Buscando uma avaliação preliminar do desempenho luminoso da Tipologia 2, foram selecionadas duas inclinações da base para simulação, destacadas com

sombra cinza na TAB.28, utilizando os mesmos parâmetros adotados nas simulações da Tipologia 1(TAB.29).

TABELA 29 – Tipologia 2: Parâmetros das Simulações

Tipologia	Orientação da Abertura	Grade	Células e Paredes		Pista		Data	Horário	Tipo de Céu
			Refletância* [Material] %	Reflexão Especular %	Refletância* [Material] %	Reflexão Especular %			
2a ($A_i=35^\circ$)	20° SO	8x8	[Plástico Cinza] 50	0	[Plástico Cinza] 30	0	22/jun	12:00	CC
2b ($A_i=55^\circ$)	20° SO	8x8	[Plástico Cinza] 50	0	[Plástico Cinza] 30	0	22/jun	12:00	CC

* Apenas para face 20°NE refletância = 0%

Os resultados da Tipologia 2a (IL.159 e 160) aproximaram-se da Tipologia 1b (IL.141 e 142) e, na faixa onde estão as aberturas zenitais, a distribuição manteve-se mais uniforme, pois não apareceram picos e as isolinhas estão mais afastadas. As iluminâncias média (433 lx) e máxima (1.128 lx) da Tipologia 2b (IL.161) estiveram 33% e 54% acima da Tipologia 2a (324 e 732 lx), mostrando que o sistema possui grande sensibilidade ao ângulo de inclinação da base da célula (A_i), o que também interfere na altura e na quantidade de células. Mesmo com uma linha a menos de células, devido a limitações geométricas, a Tipologia 2b alcançou os níveis mais elevados.

Além do melhor desempenho luminoso, a Tipologia 2b apresentou qualidades na proporção geométrica, pois praticamente não existe sobreposição, nas faces de tangência, entre as linhas de células transversais à pista. A inclinação e a altura se encaixam perfeitamente, o que pode ser observado na Vista Lateral (IL.162), e a tangência ocorre em apenas uma aresta das células. Este aspecto facilita a construção da tela e evita sobreposições desnecessárias no conjunto.

Os resultados ainda não alcançaram a Iluminância necessária na Zona Limiar E_{th} , aproximando-se apenas de 34% no valor máximo, atingindo na alternativa de melhor desempenho (Tipologia 2b). Entretanto, o conceito envolvido nas células mostrou potencial quantitativo e qualitativo, devido à uniformidade proporcionada na faixa central do módulo. O método foi então revisto para aprimorar o desenho da célula e incrementar seu desempenho.

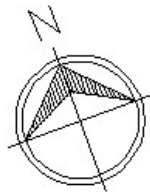
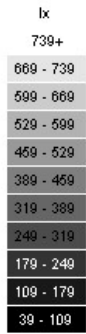
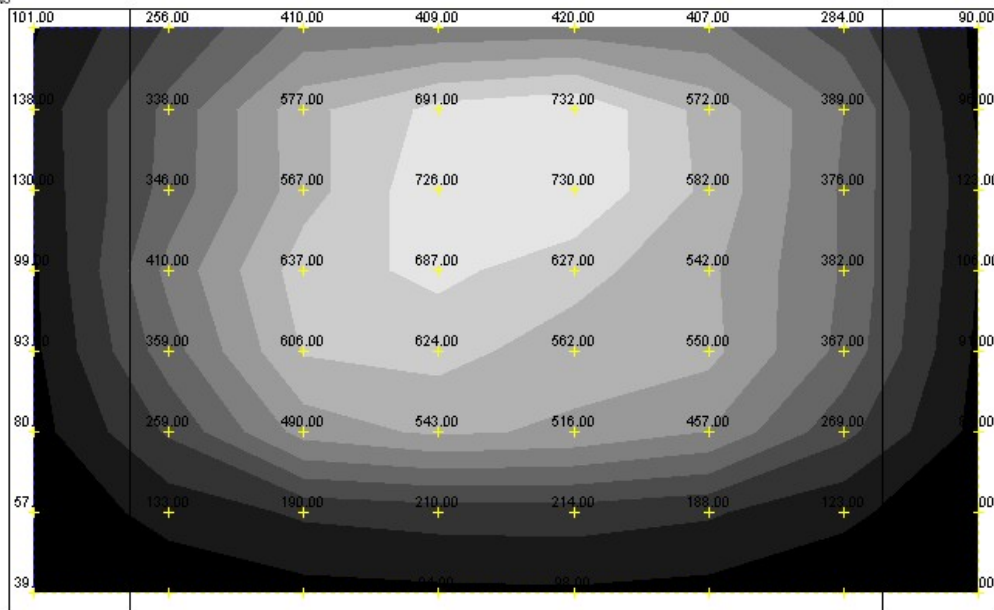
Analysis Grid

Radiance Grid Pts

Contour Range: 39 - 739 lx

In Steps of: 70 lx

© ECOTECT v5



Average Value: 323.06 lx
Visible Nodes: 64

ILUSTRAÇÃO 159 – Tipologia 2a: Simulação RADIANCE/ECOTECT (Planta)

Analysis Grid

Radiance Grid Pts

Value Range: 39 - 739 lx

© ECOTECT v5

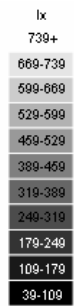
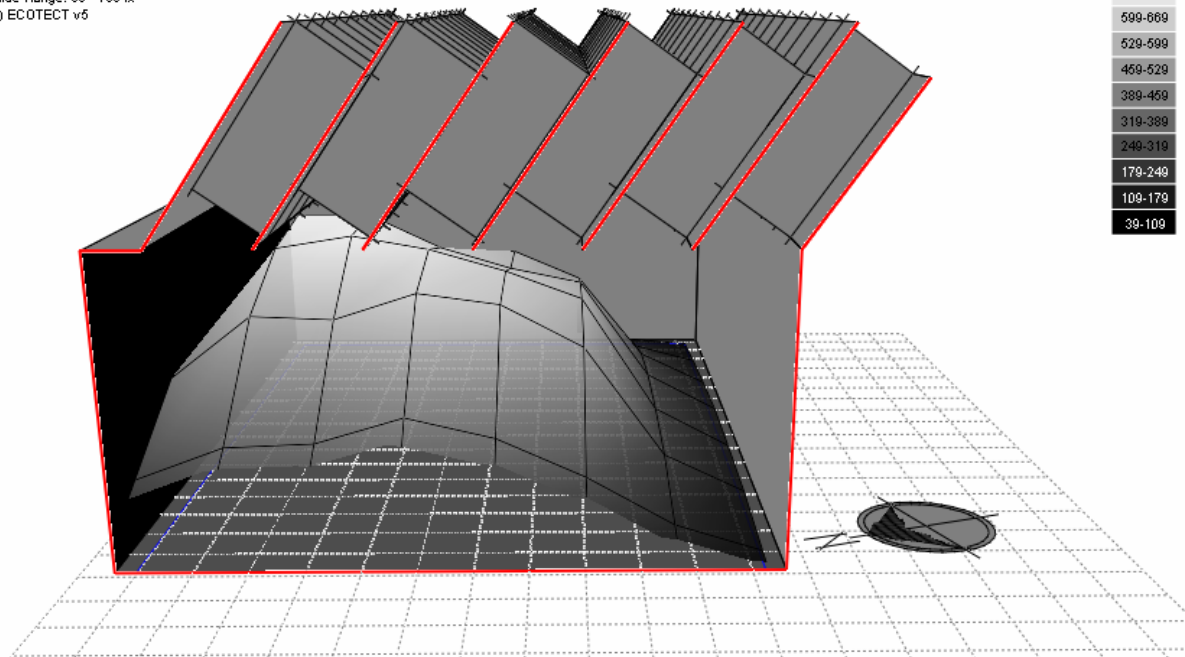
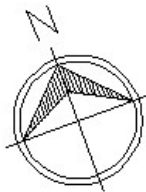
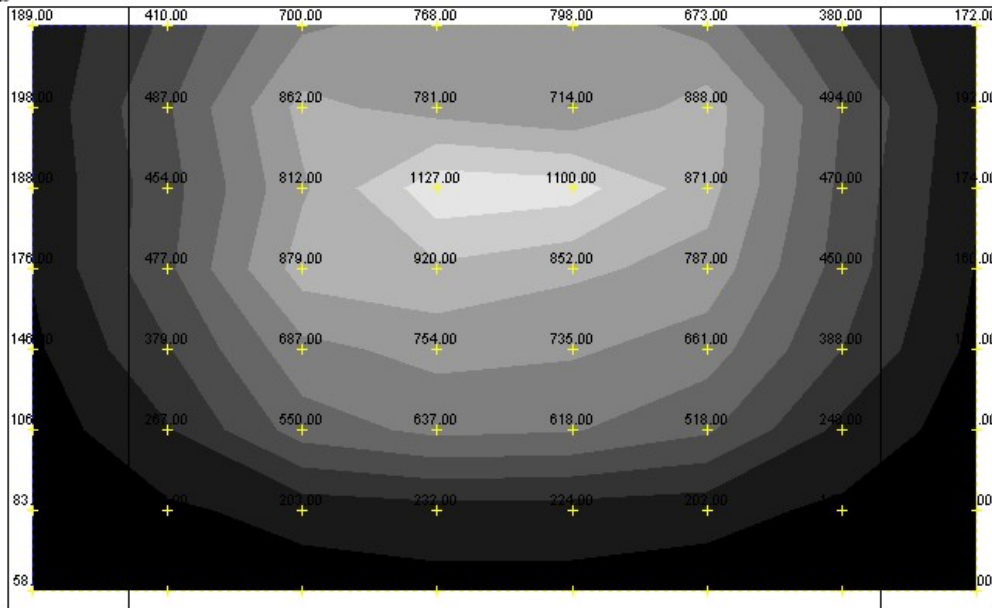


ILUSTRAÇÃO 160 – Tipologia 2a: Simulação RADIANCE/ECOTECT (Vista Lateral)

Analysis Grid

Radiance Grid Pts
Contour Range: 58 - 1158 lx
In Steps of: 110 lx
© ECOTECT v5



Average Value: 432.19 lx
Visible Nodes: 64

ILUSTRAÇÃO 161 – Tipologia 2b: Simulação RADIANCE/ECOTECT (Planta)

Analysis Grid

Radiance Grid Pts
Value Range: 58 - 1158 lx
© ECOTECT v5

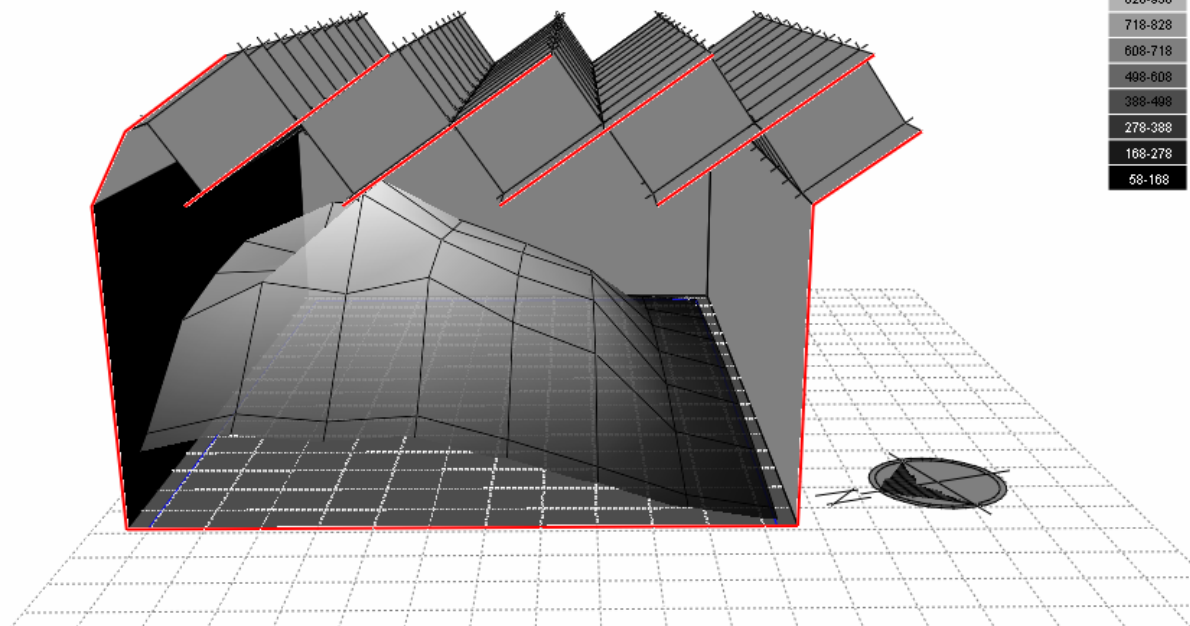


ILUSTRAÇÃO 162 - Tipologia 2b: Simulação RADIANCE/ECOTECT (Vista Lateral)

6.4 APRIMORAMENTO DA ADAPTAÇÃO DO MÉTODO DE SWIERSTRA

Assim como o método clássico de traçado de máscaras mostrou grande área da abóbada celeste obstruída sem necessidade, foi feita uma verificação da obstrução provocada pela célula da Tipologia 2a (projeção estereográfica)⁴⁷.

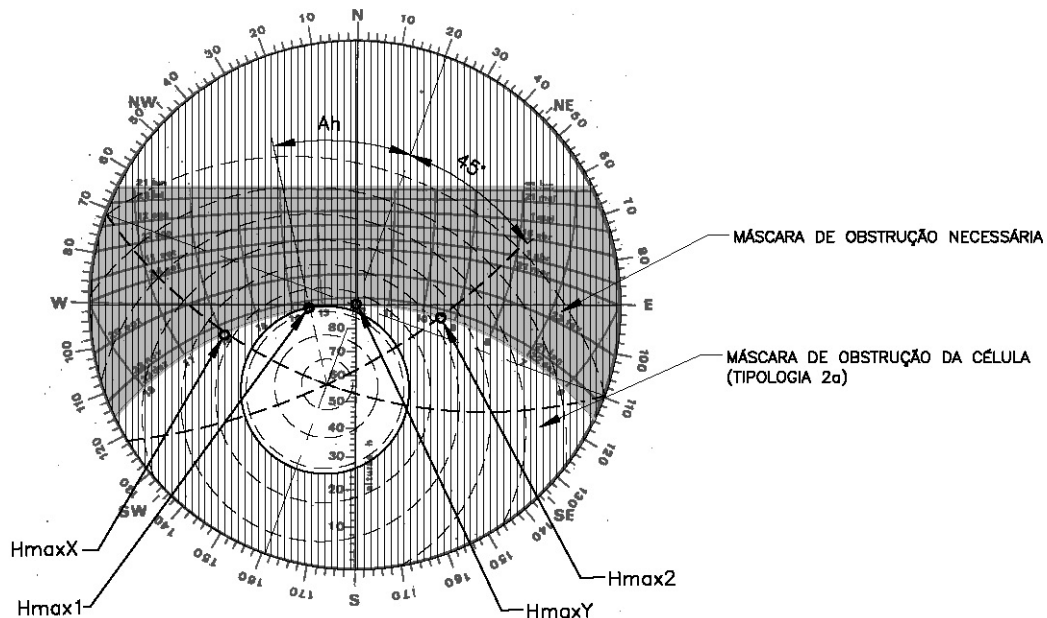


ILUSTRAÇÃO 163 - Máscara das Obstruções da Tipologia 2a ($A_i=35^\circ$)

Para facilitar o traçado de máscaras, a base quadrada da célula foi substituída por um círculo com obstrução equivalente. A área mais escura corresponde à trajetória aparente do Sol, que deve ser obstruída, e a área hachurada representa a máscara produzida pela célula. Aqui também a máscara abrange mais que o necessário. As indicações na IL.163 Hmax1; Hmax2; Hmax X e Hmax Y referem-se a pontos notáveis onde a altura solar é máxima:

- Hmax1: Altura Solar Máxima no Plano da Base da Célula;
- Hmax2: Altura Solar Máxima na Direção 45° com o eixo da pista;
- Hmax X: Altura Solar Máxima na Direção X;
- Hmax Y: Altura Solar Máxima na Direção Y.

Por estes pontos, é possível traçar uma nova máscara com melhor desempenho que a anterior (IL.164).

⁴⁷ Embora o melhor desempenho luminoso tenha sido observado na Tipologia 2b, a Tipologia 2a é mais suscetível de aprimoramento, pois suas deficiências, como a maior altura e a sobreposição das faces entre duas linhas consecutivas de células, poderão ser sanadas através do desenho e orientação das células. Além disso, as aberturas voltadas para as imediações do Zênite e a maior quantidade de células, devido ao maior ângulo de inclinação da base, indicam um potencial luminoso a ser mais bem aproveitado na Tipologia 2a.

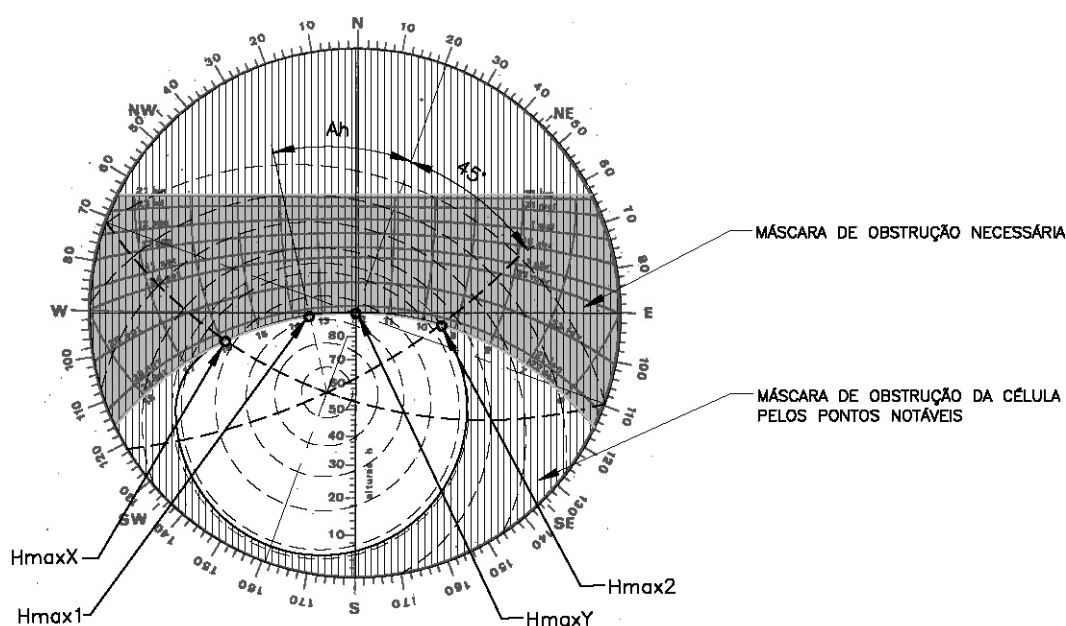


ILUSTRAÇÃO 164 – Máscara das Obstruções pelos Pontos Notáveis ($A_i=35^\circ$)

Nota-se que a maior altura solar ocorre no quadrante Noroeste, e que a nova máscara apresenta melhor aproveitamento da luz difusa da abóbada, com a mesma eficiência de obstrução total da luz solar direta apresentada pela Tipologia 2a. Resta, agora, encontrar uma geometria para a célula que, além de adequar-se à máscara pelos pontos notáveis, possibilite sua multiplicação para formação da tela.

6.5 TIPOLOGIA 3: CÉLULA-PRISMA DE BASE-PARALELOGRAMO

Segundo as recomendações de Schreuder (1964, p.33) a forma da célula pode ser admitida como um paralelogramo. Para facilitar a repetição e encaixe entre as células, a base quadrada do prisma da Tipologia 2 passou a ser composta por dois retângulos iguais na Tipologia 3, que acoplados formam um quadrado com uma divisão central. O quadrado foi girado até uma das diagonais – que será adotada como eixo de rotação da base da célula – tornar-se ortogonal à pista, com a divisão central direcionada para Nordeste. Desta forma, o maior ângulo de obstrução ocorre no quadrante Noroeste, onde se encontra Hmax1, e a máscara resultante aproxima-se da máscara de obstrução pelos pontos notáveis. Admitindo o menor lado do retângulo como o Segmento Base (L_b), e em função do ângulo de inclinação da base da célula (A_i), encontra-se a Aresta Z (L_z), para que a célula seja à prova de penetração solar, o que é verificado para os quatro pontos notáveis (IL.165 e TAB.30).

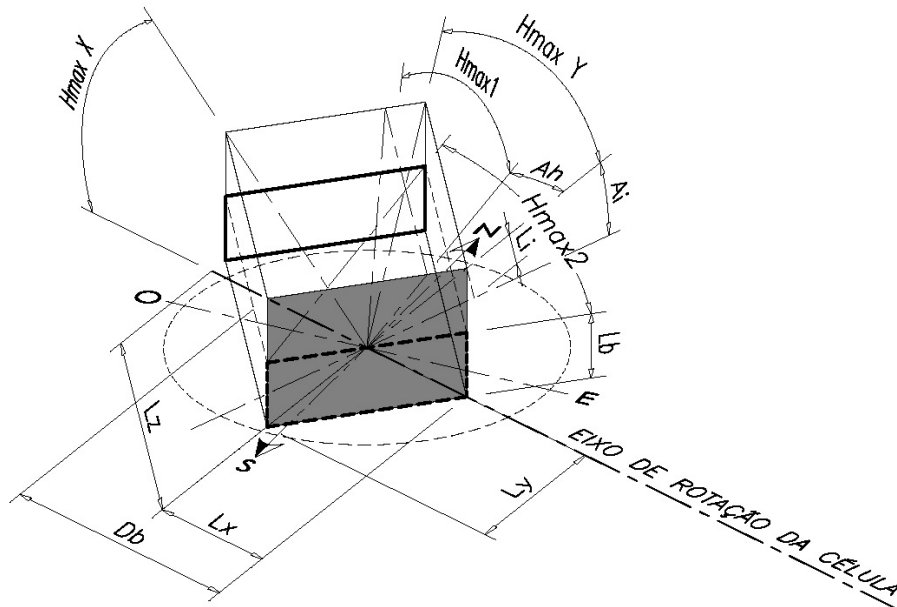


ILUSTRAÇÃO 165 – Célula de Base-Paralelogramo: Elementos de Cálculo

TABELA 30 – Cálculo das Arestas da Célula de Base-Paralelogramo

(Continua)

Segmento Base: 0,53033009 (largura da célula)											
Inclinação da Base [Ai] (graus)	Ângulo no Plano da Base para		Altura Solar			Tangente Hmax1	Tangente Hmax2	Tangente Hmax X	Tangente Hmax Y	Segmento Horizontal no Plano da Base para Hmax1 [L1]	Largura da Célula [Lb] (Seg. Base)
	Max [Ah] (graus)	Max para ângulo Ah [Hmax1] (graus)	Max para 45° Eixo Pista [Hmax2] (graus)	Max em X [Hmax X] (graus)	Max em Y [Hmax Y] (graus)						
10	18	80	71	70	80	5,67	2,90	2,75	5,67	0,60	0,53
20	22	72	55	57	70	3,08	1,43	1,54	2,75	0,58	0,53
30	28	62	44	50	60	1,88	0,97	1,19	1,73	0,55	0,53
35	30	58	38	48	55	1,60	0,78	1,11	1,43	0,55	0,53
40	35	55	32	46	50	1,43	0,62	1,04	1,19	0,54	0,53
45	40	50	28	43	45	1,19	0,53	0,93	1,00	0,53	0,53
50	50	47	23	41	40	1,07	0,42	0,87	0,84	0,53	0,53
55	55	45	19	40	35	1,00	0,34	0,84	0,70	0,54	0,53
60	60	42	16	39	30	0,90	0,29	0,81	0,58	0,55	0,53
65	75	40	12	38	25	0,84	0,21	0,78	0,47	0,61	0,53

TABELA 30 – Cálculo das Arestas da Célula de Base-Paralelogramo

(Conclusão)

Segmento Base: 0,53033009 (largura da célula)											
Dimensão X da Célula [Lx] (Seg.Hmax X)	Dimensão Y da Célula [Ly] (Seg.Hmax Y)	Z da Célula para Hmax1 [H1]	Z da Célula para Hmax X [Hx]	Z da Célula para Hmax Y [Hy]	Z da Célula para Hmax2 [H2]	Aresta Z da Célula (MAX H1;Hx;Hy;H2) [Lz]	Dimensão Max da Célula Direção 45° [L2] (Seg.H2)	Diagonal da Base da Célula Composta [Db]	Prolongamento da Aresta Z até o Plano Horizontal [Li]		
0,75	0,75	3,38	2,06	4,25	3,08	4,25	1,46	1,50		0,26	
0,75	0,75	1,77	1,15	2,06	1,51	2,06	1,44	1,50		0,55	
0,75	0,75	1,04	0,89	1,30	1,02	1,30	1,35	1,50		0,87	
0,75	0,75	0,88	0,83	1,07	0,83	1,07	1,37	1,50		1,05	
0,75	0,75	0,77	0,78	0,89	0,66	0,89	1,43	1,50		1,26	
0,75	0,75	0,63	0,70	0,75	0,56	0,75	1,41	1,50		1,50	
0,75	0,75	0,57	0,65	0,63	0,45	0,65	1,54	1,50		1,79	
0,75	0,75	0,54	0,63	0,53	0,37	0,63	1,83	1,50		2,14	
0,75	0,75	0,49	0,61	0,43	0,30	0,61	2,12	1,50		2,60	
0,75	0,75	0,51	0,59	0,35	0,23	0,59	2,76	1,50		3,22	

A linha destacada na TAB.30 corresponde à inclinação da base $Ai = 35^\circ$. Este valor foi escolhido para a Tipologia 3, pela mesma relação geométrica identificada na composição da Tipologia 2b. A Aresta Z (Lz) e seu prolongamento (Li) têm quase a mesma dimensão e, desta forma, a repetição das células favorecerá a formação da tela nesta opção, pois os vértices de contato das células imediatas praticamente coincidem.

6.5.1 TIPOLOGIA 3: SIMULAÇÕES RADIANCE / ECOTECT

Foram feitas quatro simulações para avaliar o desempenho da Tipologia 3: Simulação A, Simulação B, Simulação C, e Simulação D. Nas três primeiras aplicou-se um refinamento gradual e, na última, os parâmetros foram ajustados para cálculo do FLD. Na Simulação A, adotaram-se os mesmos parâmetros e procedimentos das Tipologias 1 e 2, para a verificação comparativa com os resultados anteriores. As Simulações B, C e D utilizaram apenas o Radiance, sem o artifício de migração com o Ecotect. Este procedimento justificou-se no refinamento do cálculo, devido aos recursos do Radiance quanto à definição dos materiais. Tanto as cores das superfícies como as propriedades que interferem na distribuição da luz mostraram-se mais confiáveis, quando ajustadas diretamente no Radiance, pois é possível a visualização prévia dos materiais. A Simulação D, elaborada para o cálculo do Fator de Luz Diurna (FLD), utilizou o Tipo de Céu Encoberto no solstício de inverno (22/06). Neste dia, pelo cálculo do Radiance, a iluminância no plano horizontal desobstruído é aproximadamente 12.900 lux às 12:00h. Estima-se que este nível de iluminação seja um valor mínimo de referência para cidade de São Paulo, ocorrendo 75% do período anual. Esta frequência de ocorrência (IL.166) é considerada do nascente ao poente e, ao admitir o período de ocupação, deverá aumentar o valor percentual. Embora a frequência de ocorrência tenha pouco significado na iluminação de túneis, sua análise justifica-se por ampliar o enfoque sobre o desempenho do dispositivo em outras aplicações.



ILUSTRAÇÃO 166 – Frequência de Ocorrência (Período Anual)
FONTE - ALUCCI, 2003

Na TAB.31 estão os principais parâmetros adotados nas simulações da Tipologia 3, cujos resultados são apresentados nas seguintes ilustrações:

- Simulação A (iluminâncias): IL.167 e 168;
- Simulação B (iluminâncias): IL.169 e 170;
- Simulação C (iluminâncias): IL.171 e 172;
- Simulação D (iluminâncias): IL.173 e 174;
- Simulação D (Fator de Luz Diurna): IL.175 e 176;

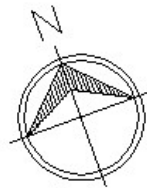
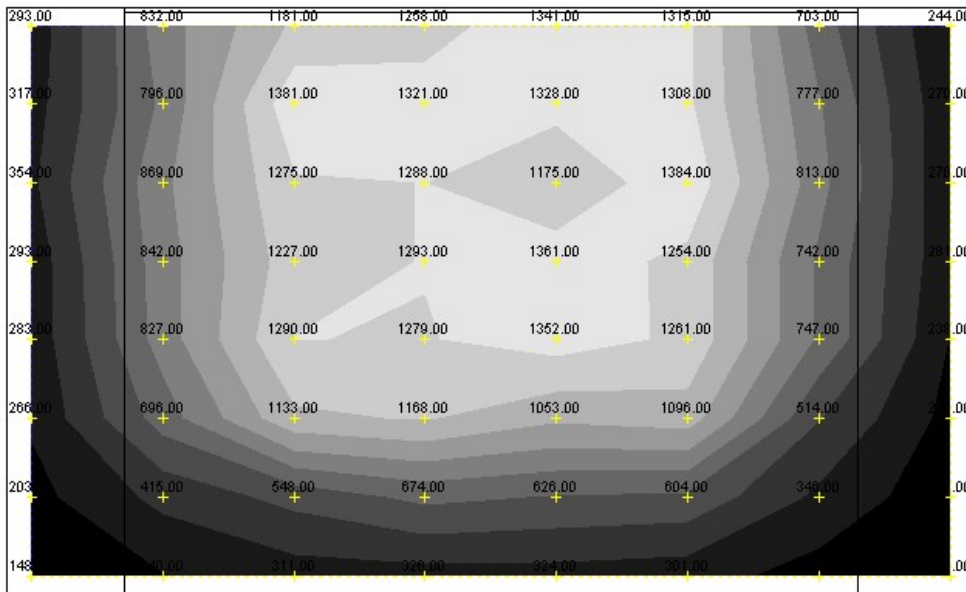
TABELA 31 – Tipologia 3: Parâmetros das Simulações A, B, C e D

Simulação	Orientação da Abertura	Grade	Células		Paredes		Pista		Data	Hora	Tipo de Céu
			Refletância* [Material] %	Reflexão Especular %	Refletância* [Material] %	Reflexão Especular %	Refletância* [Material] %	Reflexão Especular %			
A Ecotect/Radiance	20° SO	8x8	[Plástico Cinza] 50	0	[Plástico Cinza] 50	0	[Plástico Cinza] 30	0	22/jun	12:00	CC
B Radiance	20° SO	8x8	[Pintura Laranja] 49,86	0	[Pintura Laranja] 49,86	0	[Pintura Cinza] 30,33	0	22/jun	12:00	CC
C Radiance	20° SO	8x8	[Alumínio Escovado] 79	50	[Pintura Laranja] 49,86	0	[Pintura Cinza] 30,33	0	22/jun	12:00	CC
D Radiance	20° SO	8x8	[Pintura Laranja] 49,86	0	[Pintura Laranja] 49,86	0	[Pintura Cinza] 30,33	0	22/jun	12:00	CE

* Apenas para face 20°NE refletância = 1,88%

Analysis Grid

Radiance Grid Pts
Contour Range: 117 - 1417 lx
In Steps of: 130 lx
© ECOTECH v5



Average Value: 755.09 lx
Visible Nodes: 64

ILUSTRAÇÃO 167 - Tipologia 3: Simulação A - Iluminâncias (Planta)

Analysis Grid

Radiance Grid Pts
Value Range: 117 - 1417 lx
© ECOTECH v5

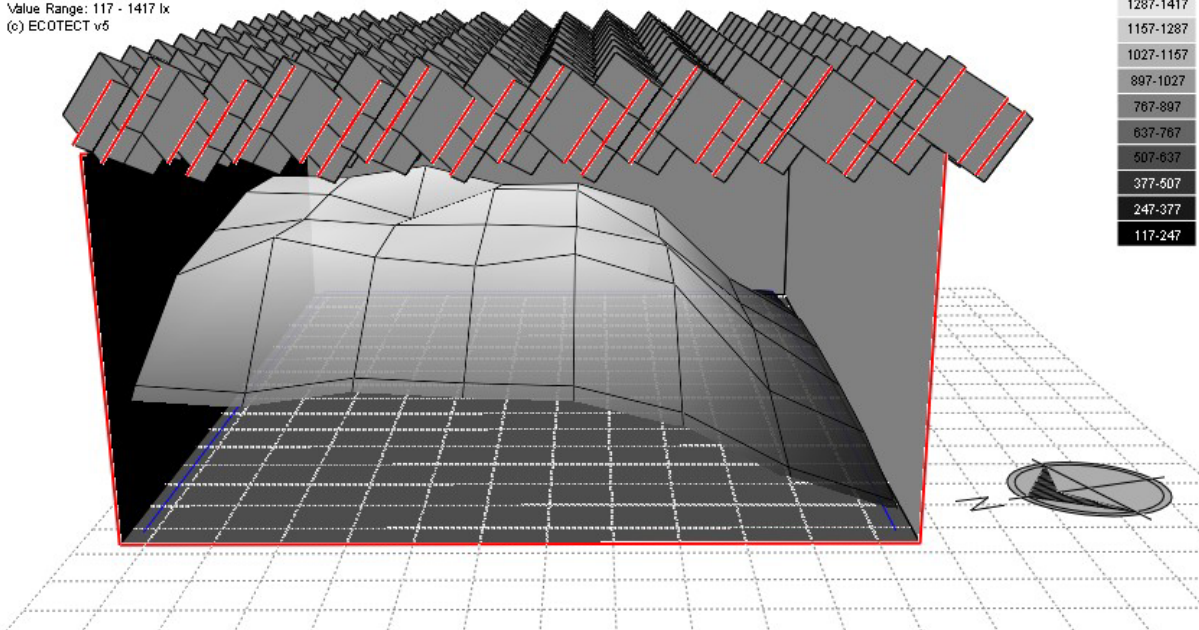


ILUSTRAÇÃO 168 - Tipologia 3: Simulação A - Iluminâncias (Vista Lateral)

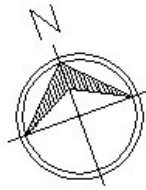
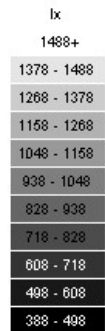
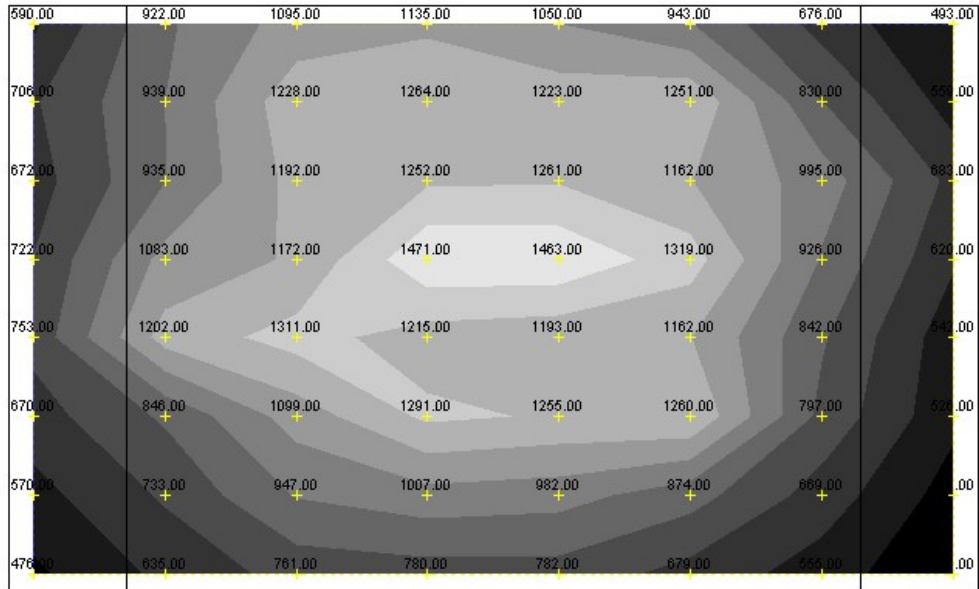
Analysis Grid

Radiance Grid Pts

Contour Range: 388 - 1488 lx

In Steps of: 110 lx

© ECOTECT v5



Average Value: 923.14 lx
Visible Nodes: 64

ILUSTRAÇÃO 169 – Tipologia 3: Simulação B - Iluminâncias (Planta)

Analysis Grid

Radiance Grid Pts

Value Range: 388 - 1488 lx

© ECOTECT v5

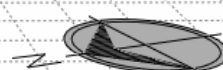
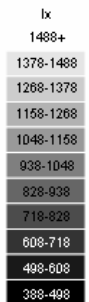
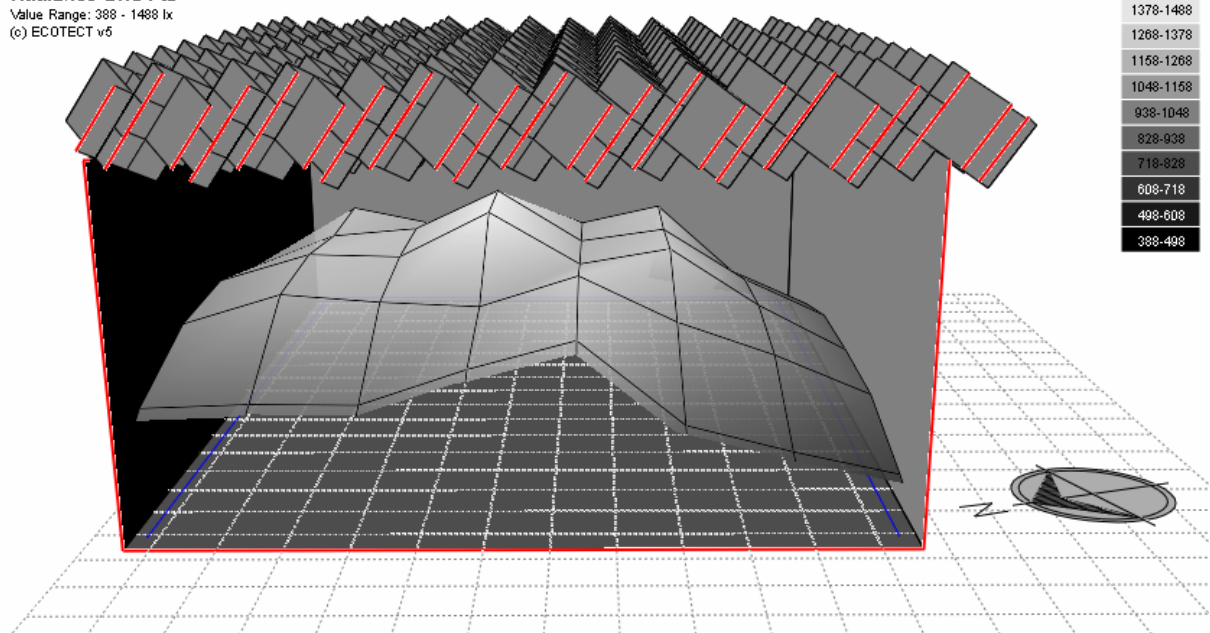
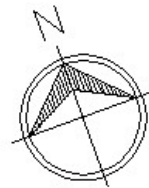
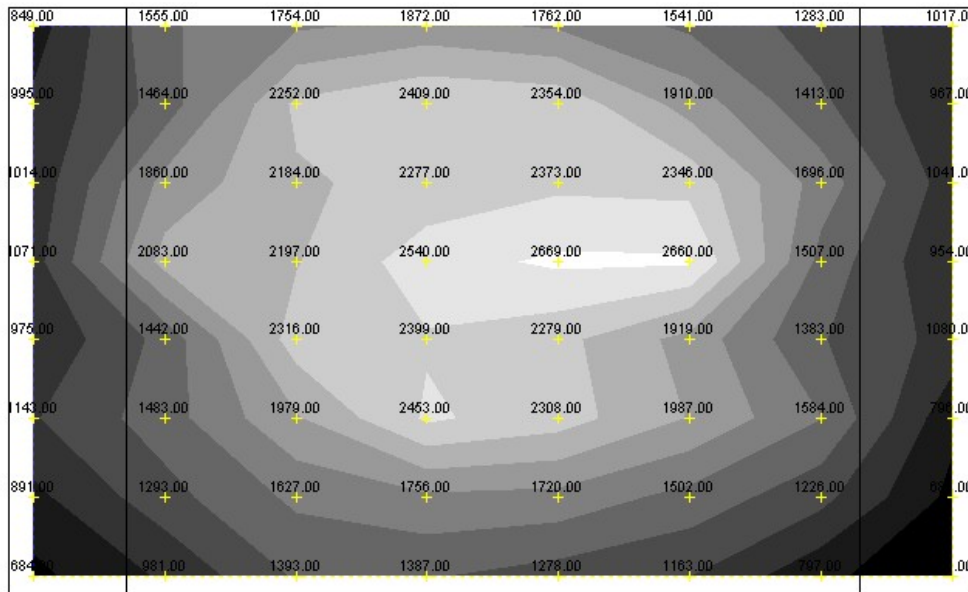


ILUSTRAÇÃO 170 – Tipologia 3: Simulação B - Iluminâncias (Vista Lateral)

Analysis Grid

Radiance Grid Pts
Contour Range: 531 - 2631 lx
In Steps of: 210 lx
© ECOTECH v5



Average Value: 1598.50 lx
Visible Nodes: 64

ILUSTRAÇÃO 171 - Tipologia 3: Simulação C - Iluminâncias (Planta)

Analysis Grid

Radiance Grid Pts
Value Range: 531 - 2631 lx
© ECOTECH v5

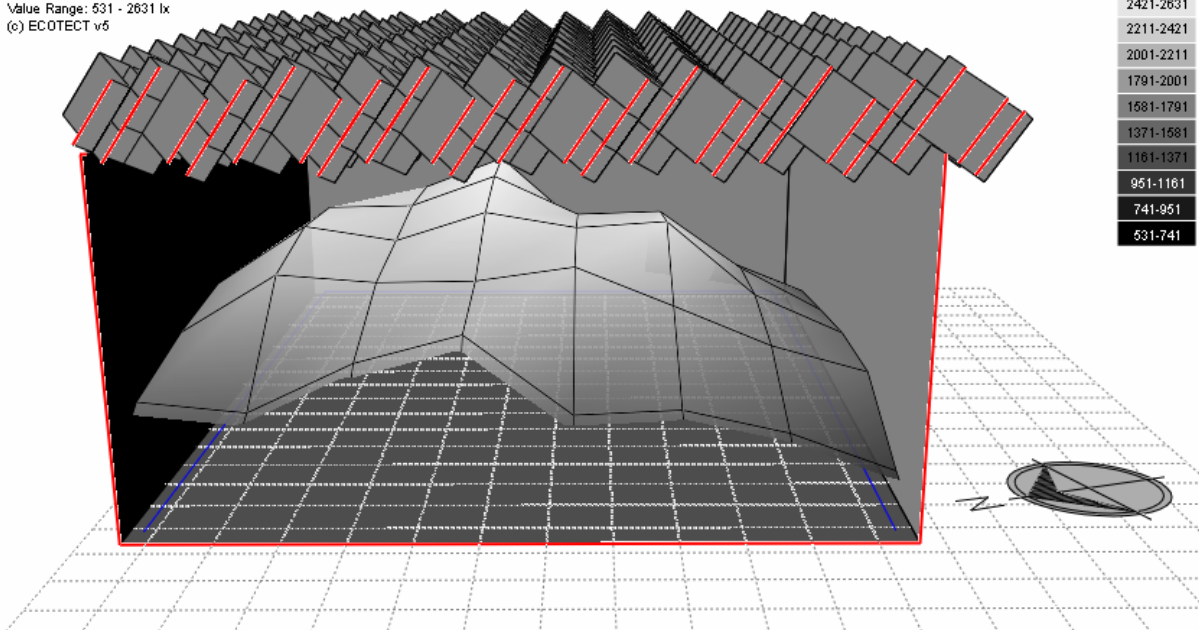


ILUSTRAÇÃO 172 - Tipologia 3: Simulação C - Iluminâncias (Vista Lateral)

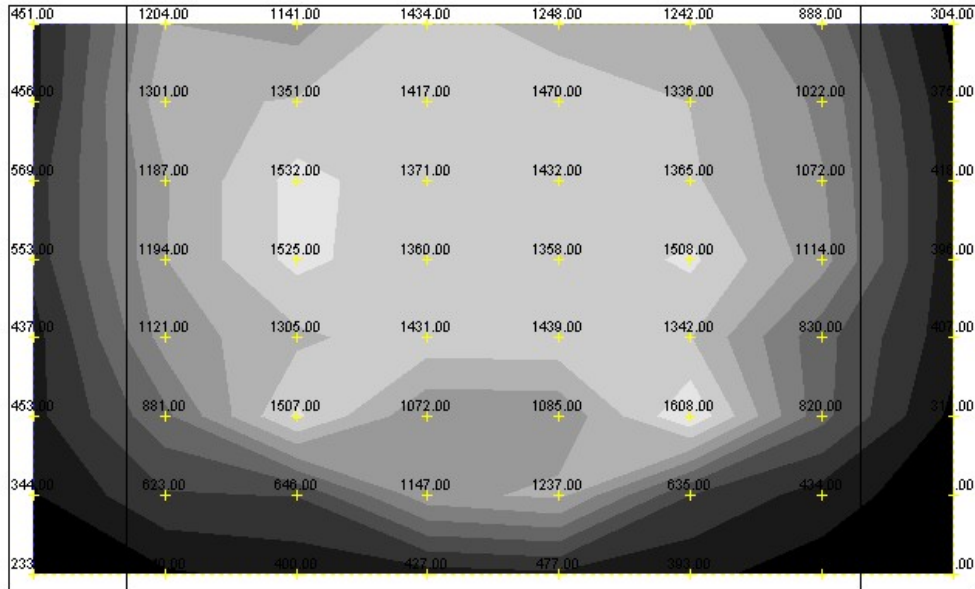
Analysis Grid

Radiance Grid Pts

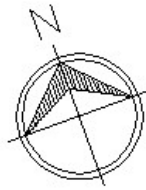
Contour Range: 219 - 1619 lx

In Steps of: 140 lx

© ECOTECT v5



lx
1619+
1479 - 1619
1339 - 1479
1199 - 1339
1059 - 1199
919 - 1059
779 - 919
639 - 779
499 - 639
359 - 499
219 - 359



Average Value: 917.95 lx
Visible Nodes: 64

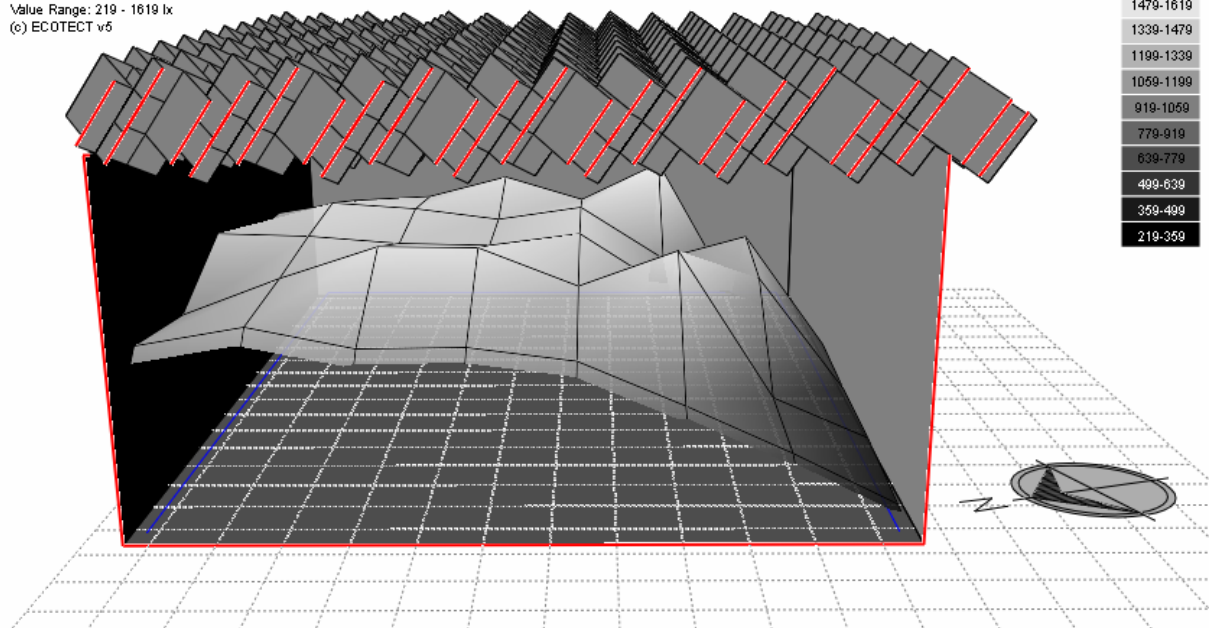
ILUSTRAÇÃO 173 - Tipologia 3: Simulação D - Iluminâncias (Planta)

Analysis Grid

Radiance Grid Pts

Value Range: 219 - 1619 lx

© ECOTECT v5



lx
1619+
1479-1619
1339-1479
1199-1339
1059-1199
919-1059
779-919
639-779
499-639
359-499
219-359

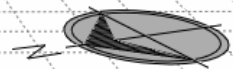


ILUSTRAÇÃO 174 - Tipologia 3: Simulação D - Iluminâncias (Vista Lateral)

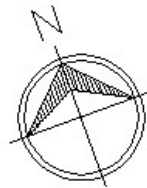
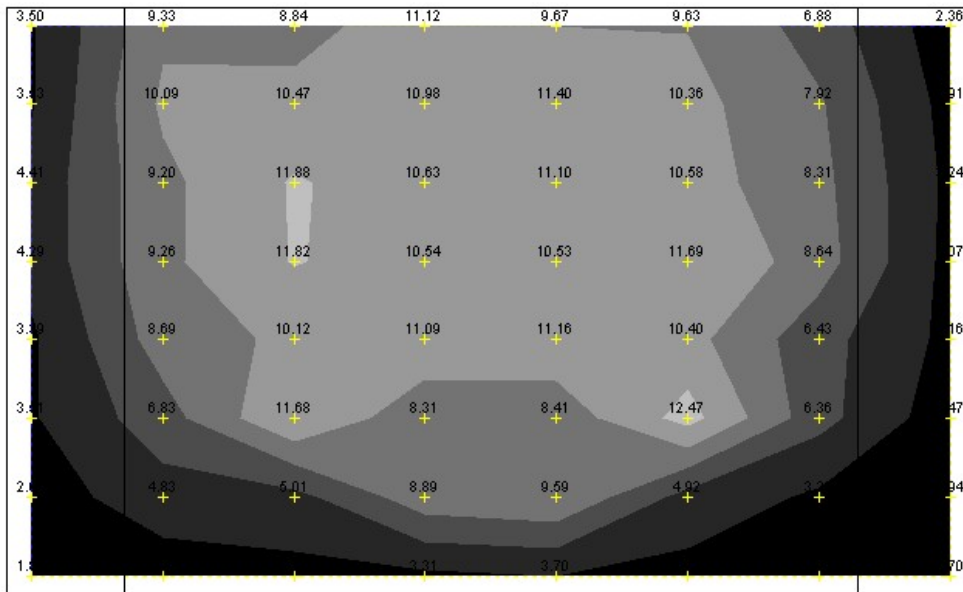
Analysis Grid

Radiance DF

Contour Range: 1.7 - 15.0 %

In Steps of: 2.0 %

© ECOTECT v5



Average Value: 7.12 %
Visible Nodes: 64

ILUSTRAÇÃO 175 - Tipologia 3: Simulação D - Fator de Luz Diurna (Planta)

Analysis Grid

Radiance DF

Value Range: 1.7 - 15.0 %

© ECOTECT v5

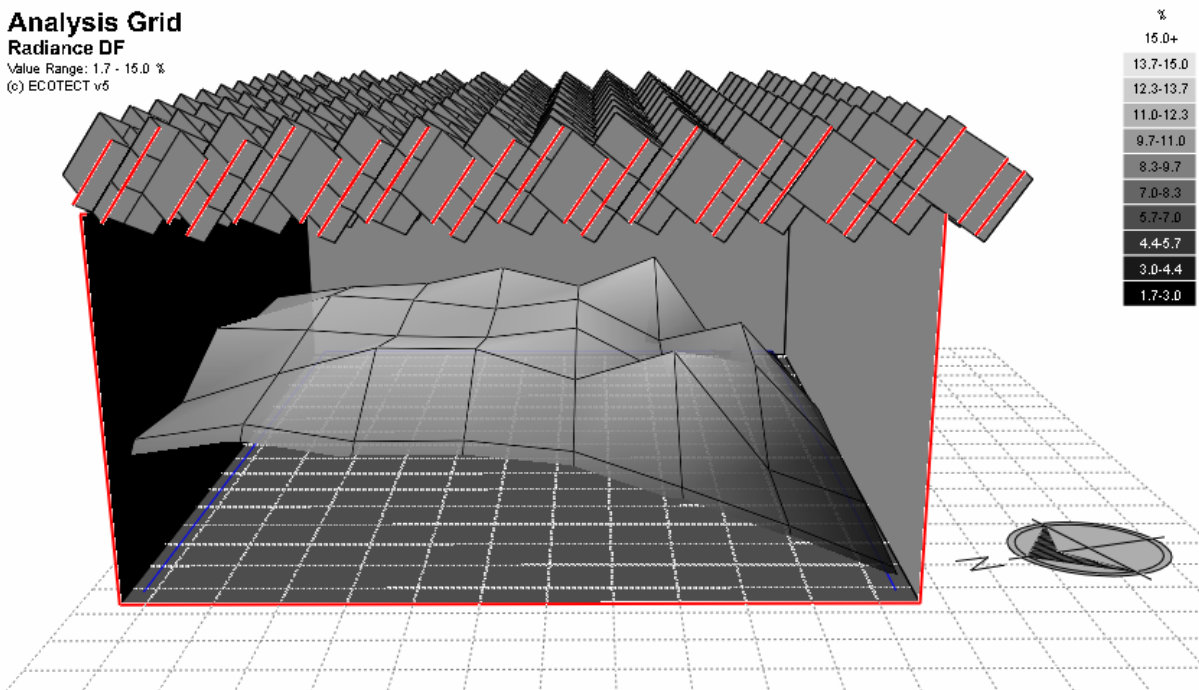


ILUSTRAÇÃO 176 - Tipologia 3: Simulação D - Fator de Luz Diurna (Vista Lateral)

A distribuição da iluminação manteve boa uniformidade na região central sob as aberturas zenitais. Segundo a CIE 88-1990 e BS 5489-92, a uniformidade – relação entre as luminâncias mínima e média – deve estar acima de 0,6, e a ANSI/IESNA RP 22-96 recomenda 0,5. As simulações apresentaram uniformidade acima dos valores recomendados pelas normas internacionais pesquisadas. Se considerarmos a região onde a luminância se estabiliza, descartando a área próxima ao fechamento SO, a variação dos níveis de iluminação é ainda menor, mostrando que o sistema é eficiente neste aspecto.

Em relação à Tipologia 2a, os valores médios praticamente duplicaram na Simulação A da Tipologia 3, que também superou a Tipologia 2b em torno de 75%.

Alterando apenas a cor das células e paredes interiores de cinza para laranja (Simulação B), houve um aumento da ordem de 22% no nível médio de iluminação, mas as propriedades de reflexão e distribuição da luz nas superfícies das células é que mostraram influência importante no resultado (Simulação C), praticamente duplicando o nível de iluminação da Simulação A.

A TAB.32 sintetiza os resultados das simulações nas tipologias estudadas:

TABELA 32 – Tipologias 1, 2 e 3: Resumo dos Resultados

		Iluminância Média (lx)	Iluminância Máxima (lx)	FLD Máximo (%)	FLD Médio (%)	Ilustração
	Tipologia 1a	161	466			138 139
	Tipologia 1b	337	750			141 142
	Tipologia 2a	324	732			159 160
	Tipologia 2b	433	1128			161 162
Tipologia 3	Simulação A Ecotect/Radiance	756	1384			167 168
	Simulação B Radiance	923	1471			169 170
	Simulação C Radiance	1598	2669			171 172
	Simulação D Radiance	918	1532	11,88	7,12	173 174 175 176

A avaliação do FLD da Tipologia 3 também apresentou bom resultado. Nos estudos de Schreuder (1964, p.34-5), a transmissão luminosa da tela deve atingir entre 10 e 13%. Observa-se que, na faixa central, o FLD esteve próximo de 11%. O FLD não corresponde exatamente à transmissão luminosa da tela, mas existe uma

relação diretamente proporcional entre ambos, podendo-se ter uma idéia da transmissão luminosa da tela, principalmente no centro do módulo, pois a superfície da célula abrange a maior área de um hemisfério imaginário com centro nesse ponto. Portanto, no módulo estudado, o FLD será sempre menor que a transmissão luminosa da tela, a qual resulta dentro da faixa proposta por Schreuder.

6.5.2 TIPOLOGIA 3: VERIFICAÇÃO DA PENETRAÇÃO SOLAR

No intuito de obter uma forma simples a ser repetida para compor a tela, a geometria da célula sofreu algumas aproximações para se adequar ao traçado de máscaras pelos pontos notáveis. Para verificar se a geometria resultante está realmente à prova de penetração solar, utilizaram-se os recursos do ECOTECT, checando a penetração solar nos solstícios e equinócios a cada hora e meia, do nascente ao poente (IL.177).

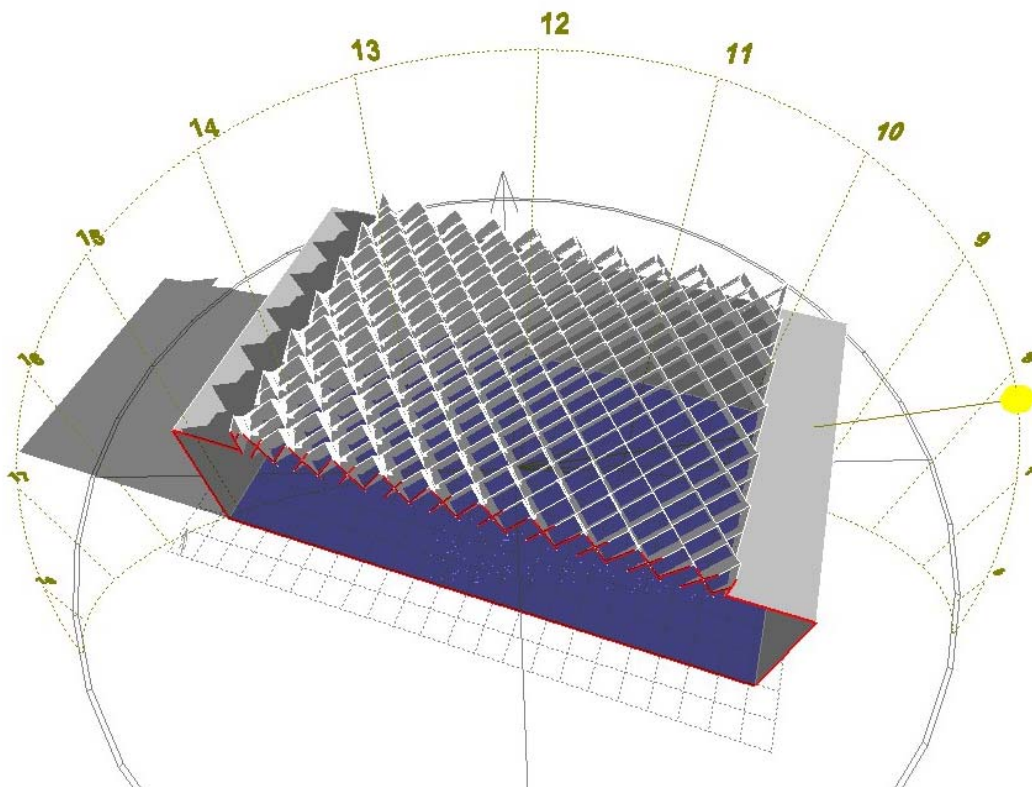


ILUSTRAÇÃO 177 - Modelo Eletrônico para Verificação da Penetração Solar

O ponto de vista das imagens para verificação da penetração solar foi direcionado do Norte para o Sul, possibilitando visualizar a incidência solar nas próprias células. Utilizou-se um plano de corte na direção Leste Oeste para permitir a observação do interior do módulo.

Os estudos mostraram que a tela formada pelas células apresenta obstrução total da luz solar direta no solstício de inverno e nos equinócios. Entretanto, identificou-se um pequeno período no solstício de verão em que a luz vaza pela célula. Este período ocorreu nos meses de dezembro e janeiro entre as 10:30h e 12:00h, com a maior penetração identificada em torno das 11:00h (IL.178).

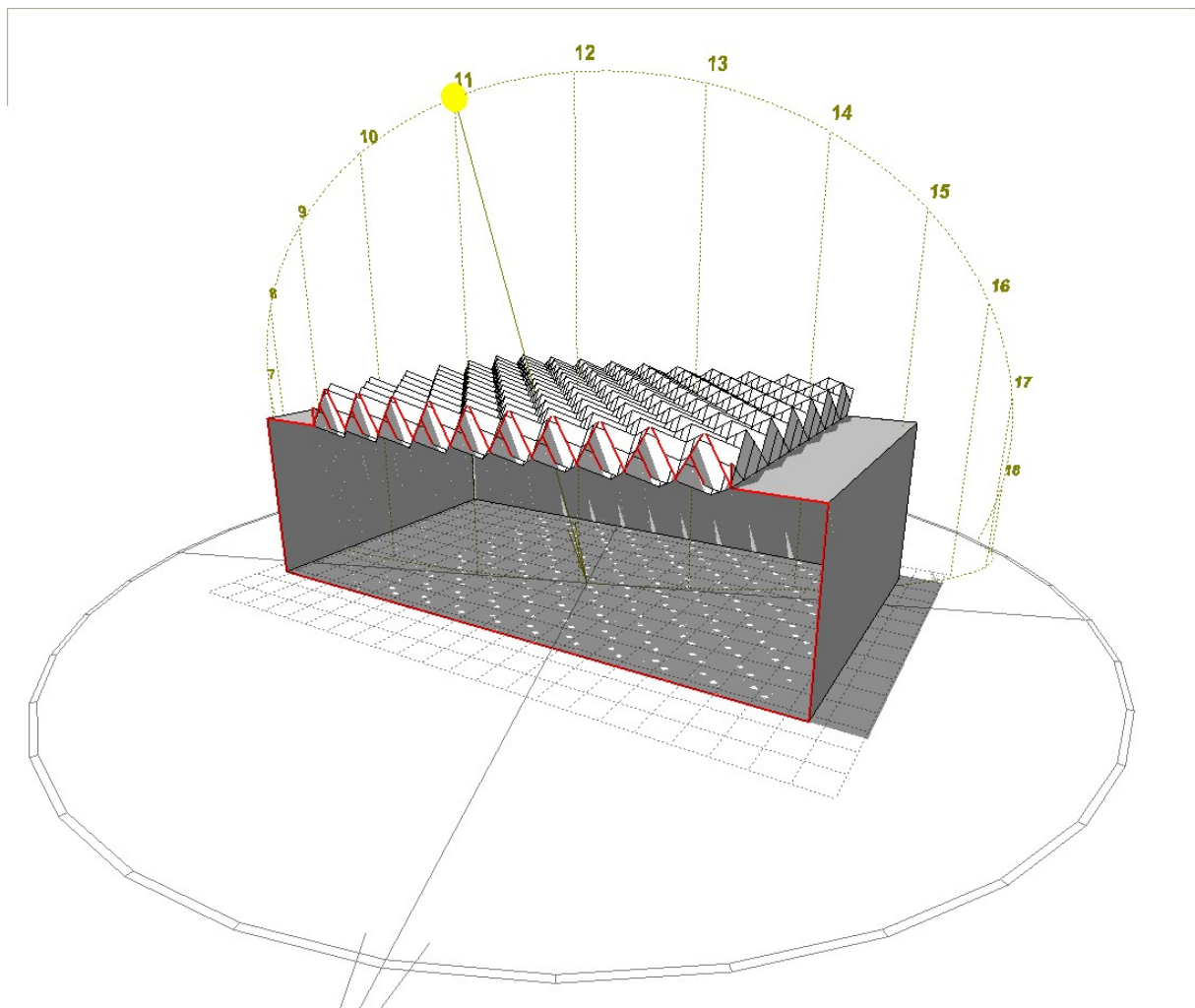


ILUSTRAÇÃO 178 - Penetração Solar no Solstício de Verão: (11:00h)

6.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Quanto ao aproveitamento da luz natural direta e difusa, obteve-se um aumento gradual de desempenho através das três tipologias estudadas, atingindo o nível máximo de 2.669 lx na Simulação C da Tipologia 3. Este nível já atende diversas situações de emboques, provendo a iluminação da Zona Limiar, durante o período diurno, com autonomia do sistema artificial. Mesmo considerando as situações mais adversas, nas quais a iluminância pode atingir 3.600 lx na Zona

Limiar, a Tipologia 3 chega a suprir 74% da iluminação necessária, contando ainda com alguma reserva para aumentar seu desempenho. O módulo estudado apresenta uma margem adicional não utilizada, representada pelas faixas laterais opacas da cobertura e pelos fechamentos verticais, que irão fomentar a iluminação na pista. A própria forma de todo módulo poderá ser alterada para este fim, além da contribuição que ocorrerá entre os módulos, quando o **DAV** estiver integralmente composto.

Devido às pequenas dimensões das células e grande quantidade de aberturas, a chuva percola igualmente toda superfície da tela, sendo desnecessária a captação de águas pluviais.

Para verificação comparativa quanto ao potencial de transmissão da luz, as três tipologias foram analisadas, considerando as seguintes variáveis:

- Parcela de céu visível;
- Porção transmitida de luz difusa;
- Porção transmitida de luz direta refletida.

Utilizando o diagrama do hemisfério celeste (ABNT, 2005, p.15) e o traçado de máscaras em projeção estereográfica, calculou-se a **parcela de céu visível** para avaliar a área de abertura efetiva no plano da base de cada tipologia (IL.179, 180, 181, 182 e 183).

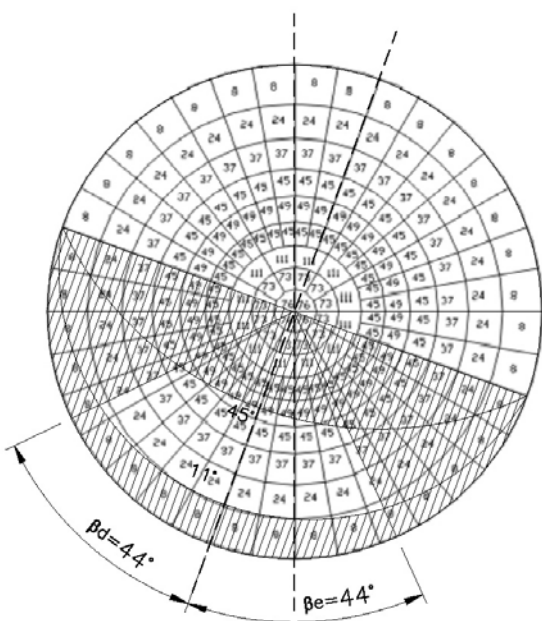


ILUSTRAÇÃO 179 – Tipologia 1a: Máscara X DCRL

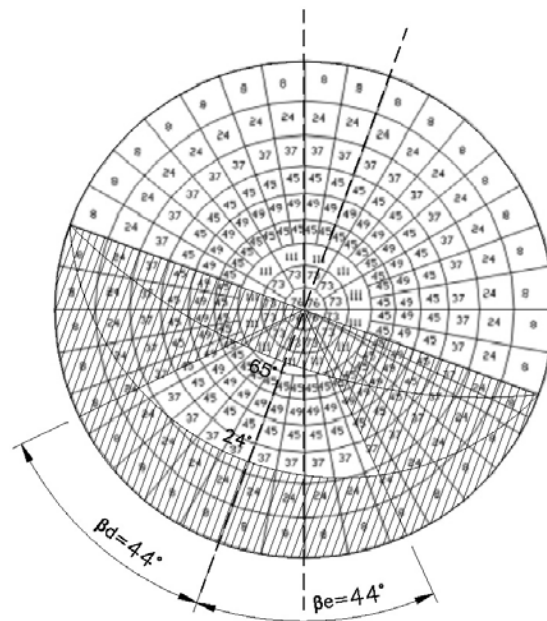


ILUSTRAÇÃO 180 – Tipologia 1b: Máscara X DCRL

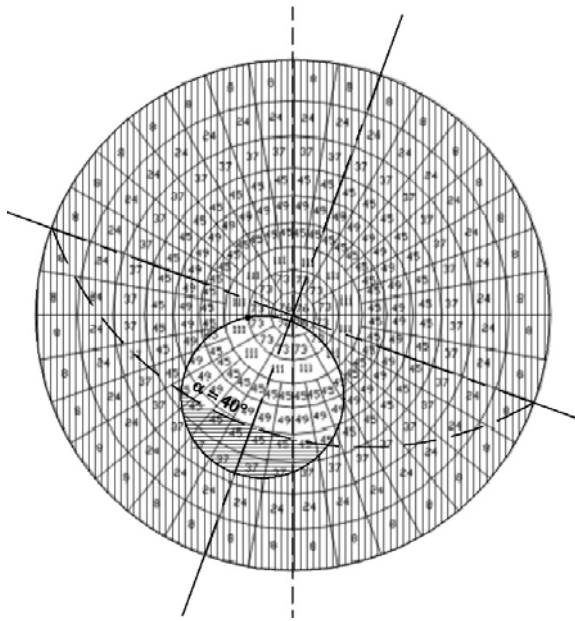


ILUSTRAÇÃO 181 - Tipologia 2a: Máscara X DCRL

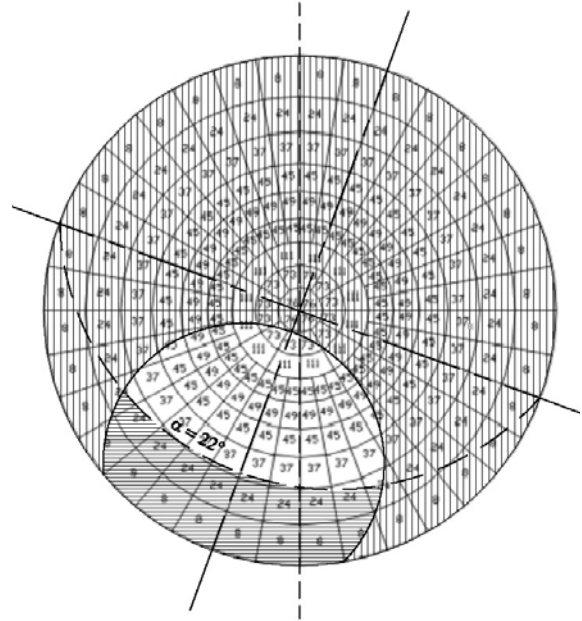


ILUSTRAÇÃO 182 - Tipologia 2b: Máscara X DCRL

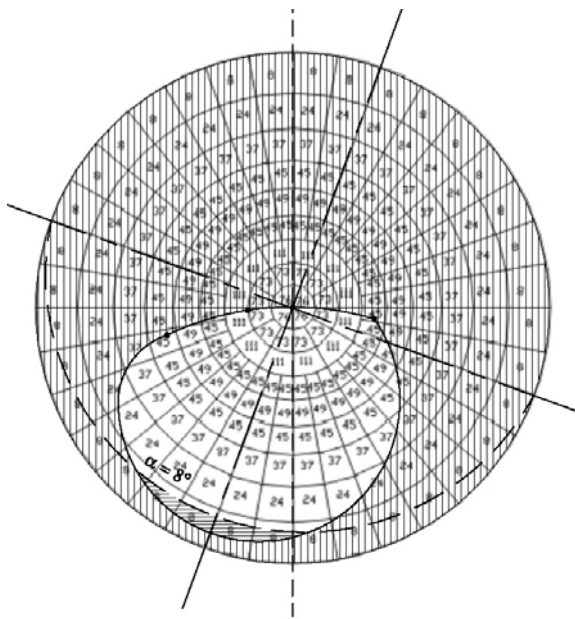


ILUSTRAÇÃO 183 - Tipologia 3: Máscara X DCRL

No traçado de máscaras das células (Tipologias 2 e 3), observa-se uma nova obstrução que invade a parcela de céu visível da célula isolada. Esta obstrução provém da repetição das células para formar a tela, resultando em um ângulo α vertical de obstrução constante em cada célula (IL.184).

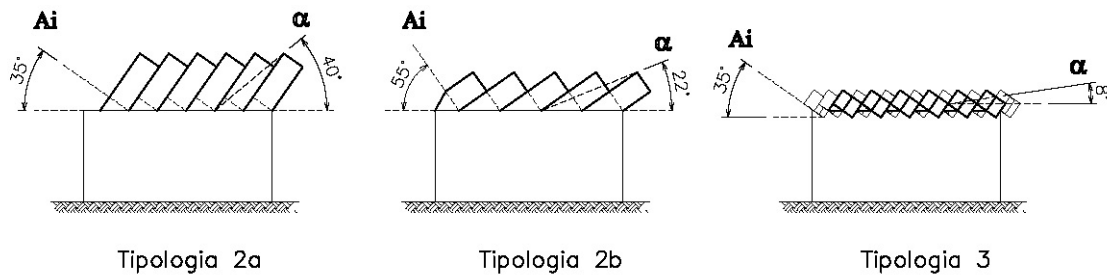


ILUSTRAÇÃO 184 – Tipologias 2 e 3: Corte Típico

Nota-se que a Tipologia 3 consegue conciliar o menor ângulo de inclinação da base Ai com o menor ângulo de obstrução α . Isto decorre da geometria da célula, proporcionada pelo traçado de máscaras pelos pontos notáveis. Por este procedimento, a base quadrada subdividida ao meio é orientada com a diagonal perpendicular à pista, e as linhas de células entremeiam-se, resultando em posições intermediárias menos obstrutivas.

O cálculo da parcela de céu visível pelo Método ABNT está indicado na TAB.33:

TABELA 33 – Tipologias 1, 2 e 3: Parcela de Céu Visível

Tipologia 1a			Tipologia 1b			Tipologia 2a			Tipologia 2b			Tipologia 3		
DCRL	N	DCRL x N	DCRL	N	DCRL x N	DCRL	N	DCRL x N	DCRL	N	DCRL x N	DCRL	N	DCRL x N
8	0,5	4	24	0,3	7,2	45	1	45	24	1	24	8	0,6	4,8
24	9	216	37	7,8	288,6	49	9,5	465,5	37	10	370	24	8	192
37	9	333	45	9	405	45	11	495	45	11	495	37	11	407
45	8,5	382,5	49	9	441	111	4	444	49	12	588	45	13	585
49	3	147	45	9	405	73	4,5	328,5	45	12	540	49	14,5	710,5
		0	111	1,2	133,2	76	1,5	114	111	4	444	45	16	720
		0			0			0	73	3	219	111	5,8	643,8
		0			0			0			0	73	6	438
												76	2	152
Total (%)		10,83	Total (%)		16,80	Total (%)		18,92	Total (%)		26,80	Total (%)		38,53

Para estimar a porção transmitida de luz difusa, aplicou-se um material de refletância nula nas superfícies das células, repetindo as simulações Ecotect / Radiance para esta nova condição, em todas tipologias. O resultado destas simulações, subtraído das simulações anteriores, fornece também a porção transmitida de luz direta refletida. Na Tipologia 3, adotaram-se os parâmetros da Simulação A nesta análise.

A TAB.34 mostra as variáveis que interferem na transmissão da luz para as três tipologias.

TABELA 34 – Tipologias 1, 2 e 3: Transmissão da Luz

		Tipologia 1a	Tipologia 1b	Tipologia 2a	Tipologia 2b	Tipologia 3
Iluminância na Pista (Total)	máxima (lx)	466	750	732	1128	1384
	média (lx)	161	337	324	432	756
Porção de Luz Difusa	máxima (lx)	157	251	220	265	282
	média (lx)	34	74	84	94	135
	máxima (%)	33,69%	33,47%	30,05%	23,49%	20,38%
	média (%)	21,12%	21,96%	25,93%	21,76%	17,86%
Porção de Luz Direta Refletida	máxima (lx)	309	499	512	863	1102
	média (lx)	127	263	240	338	621
	máxima (%)	66,31%	66,53%	69,95%	76,51%	79,62%
	média (%)	78,88%	78,04%	74,07%	78,24%	82,14%
Parcela de Céu Visível na Base da Célula		10,83%	16,80%	18,92%	26,80%	38,53%

A porção de luz direta refletida foi a componente de maior peso em todas as tipologias, com contribuição entre 74% e 82% do valor médio total da iluminância na pista. A variação relativa entre as tipologias acompanhou a variação da parcela de céu visível na base da célula, mantendo a mesma proporção em alguns casos. Assim, a razão 1,14 entre a Tipologia 2a e a Tipologia 1b da porção de luz difusa (média/lx) equivale à relação da parcela de céu visível nas duas tipologias, ocorrendo o mesmo entre a Tipologia 3 e a Tipologia 2b, cuja razão é 1,44. Entre a Tipologia 2b e a Tipologia 2a, essa correspondência é observada na porção de luz direta refletida (média/lx), com a razão aproximando-se de 1,41.

A altura solar na data e horário das simulações é 42°, ocupando uma posição intermediária entre os ângulos de inclinação da base das células das tipologias (*A_i*). Entretanto, na Tipologia 3, as faces expostas ao Sol estão mais inclinadas devido ao alinhamento com a diagonal da célula. Isto poderia acarretar em diminuição no potencial refletor do sistema, mas resultou no melhor desempenho, atingindo 82,14% na porção de luz direta refletida (média/%). Tal fato explica-se pela distribuição na insolação dos planos da célula que a Tipologia 3 proporciona. No momento crítico, próximo às 12h, o posicionamento diagonal coloca todas as superfícies opacas da célula na mesma condição de insolação, favorecendo o aproveitamento da luz por reflexão.

Outra característica importante da Tipologia 3 é a menor dimensão da altura da célula. Comparada à Tipologia 2a, que apresenta a mesma inclinação da base, a altura é 3,5 vezes menor. Pela lei do inverso do quadrado da distância, este é mais um fator determinante no desempenho do sistema, pois a face iluminante da célula é a face superior e suas imediações, que recebem a luz solar direta e determinam o recorte da luz difusa, e a altura da célula aumenta o percurso da luz até atingir a

pista. Da mesma forma, quanto menor a célula, em qualquer tipologia, melhor o desempenho, pois a distância entre a abertura e a pista é reduzida, mas deve-se evitar que as aberturas atinjam dimensões inferiores a 15 cm, para que não haja retenção de resíduos sobre a tela.

A penetração solar ocorreu devido aos ajustes que simplificaram a geometria da célula. Para adequar a obstrução nesse período de penetração, basta ajustar a Aresta Z (Lz), ou diminuir o ângulo de inclinação da base (AI), sem a necessidade de alteração na forma da base da célula. Mesmo ainda sendo uma questão polêmica, a utilização da penetração solar para complementar o nível de iluminação na Zona Limiar não deve ser totalmente descartada. A CIE (2004, p.16) passou a adotar esta recomendação para a cobertura do **DAV**, contrariando a clássica adoção da tela à prova de penetração solar. Justifica esta opção pelo resultado prático observado mundialmente em alguns túneis, concluindo que os materiais e métodos de projeto atuais não conseguem garantir a transmissão necessária da luz dentro do **DAV** por muito tempo, aumentando a razão entre a luminância da Zona Limiar L_{th} e a luminância de véu equivalente L_{seq} , que passa a estar entre 2 e 6 ($2 < L_{th}/L_{seq} < 6$). Atingir esta proporção sem a penetração solar é muito difícil, mas esta alternativa ainda deve ser adotada com cuidado, requerendo uma verificação acurada de seus efeitos.

A influência da porção de luz direta transmitida por reflexão nas simulações confirmou as deficiências encontradas, na prática, nos túneis em que o **DAV** foi construído. A agressividade do meio e dificuldade de manutenção afetaram substancialmente o desempenho do sistema, devido a sua dependência da propriedade refletora das superfícies para suprir a iluminação da Zona Limiar. As superfícies translúcidas são ainda mais vulneráveis neste aspecto. Embora a sua limpeza seja mais fácil que na tela, por constituírem geralmente um único plano com duas faces (uma interior e outra exterior), a incidência solar direta, o depósito de sujeira e a emissão de gases dos veículos podem afetar o material e prejudicar a transmissão da luz, agindo diretamente na superfície iluminante. O controle da luz direta e difusa também é dificultado nesta alternativa, pois quando a transmissão do material transparente é adequada para a luz difusa, é deficiente para a luz direta e vice-versa. Outra desvantagem deste sistema está na conformação de espaços enclausurados, dificultando a dispersão dos gases e, conseqüentemente, aumentando os problemas de manutenção e de visibilidade em seu interior.

A Adaptação do Método de Swierstra revelou grande potencial de aproveitamento da luz natural difusa e refletida; introduzindo um novo procedimento para o traçado de máscaras que pode ser ampliado para todo o espaço construído.

As características geométricas da Tipologia 3 configuram um sistema versátil que favorece sua disposição no traçado em curva. No módulo estudado adotou-se a forma plana e geometrias simples para facilitar o cálculo e a construção dos modelos, mas as células que compõem as malhas permitem adequá-las a diversas formas, com possibilidades inesgotáveis de combinação. A utilização de módulos de conexão, posicionando a tela em qualquer direção, como também diversas inclinações da célula na mesma malha, revelam recursos para um resultado arquitetônico qualitativo e quantitativo. A célula como elemento controlador da luz responde nas diversas instâncias que compõem o espaço. Ela atua tanto na própria forma que a constitui como no entorno imediato, com implicações na ambiência, no conforto ambiental e no resultado plástico da obra.

Capítulo 7: DIRETRIZES PARA PROJETO E DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA PARA ADAPTAÇÃO VISUAL (SAV)

No projeto e dimensionamento do **SAV** devem ser cumpridas as seguintes etapas:

- a. **Definição dos parâmetros de projeto:** condições locais e regionais, características físicas do túnel, tráfego, análise do emboque, classificação e dimensionamento das diversas zonas de iluminação. Esta etapa fornece os insumos para as etapas seguintes;
- b. **Cálculo e dimensionamento:** através de diagramas e relações geométricas, definem-se as extensões e luminâncias das diversas zonas interiores, estimando o requisito de desempenho do **SAV**;
- c. **Escolha da estratégia adequada:** em função dos parâmetros de projeto e recursos do empreendimento, define-se a estratégia ou combinação de estratégias a serem adotadas;
- d. **Projeto arquitetônico:** cada estratégia implica em uma intervenção arquitetônica específica;
- e. **Verificação de Desempenho:** dependendo da complexidade, o **SAV** deve ser testado através de simulações computacionais ou modelos físicos em escala reduzida.

Quando se tratar de novos empreendimentos, as etapas descritas devem ocorrer na fase de projeto. Esta providência irá favorecer substancialmente o resultado final da obra, pois, ao invés de soluções corretivas, o **SAV** estará integrado aos projetos de engenharia.

7.1 PARÂMETROS DE PROJETO, CÁLCULO E DIMENSIONAMENTO

Devem ser estabelecidas as variáveis que caracterizam o túnel, pois influenciam diretamente no projeto luminotécnico. Desta forma, os parâmetros para o projeto do **SAV** dependem igualmente destas variáveis que, por vezes, requerem operações específicas para sua obtenção. Estas operações foram extraídas e adaptadas das instruções normativas descritas na seção 4.4. Alguns tópicos foram atualizados segundo as últimas edições CIE 88 (2004) e ANSI/IESNA RP-22 (2005),

descartando apenas as questões que permanecem polêmicas nestas recentes edições⁴⁸. Quando necessário, introduziu-se uma breve discussão sobre o enfoque de algumas recomendações para justificar a opção adotada e, de maneira sucinta, também foi incluído o procedimento para determinar as luminâncias das diversas zonas interiores do túnel, indicando o método de cálculo, quando aplicável.

7.1.1 DADOS DO TÚNEL

Estes dados são utilizados na classificação do túnel, que será vista adiante na seção 7.1.3, e também no cálculo luminotécnico, afetando a luminância nas zonas interiores:

- Comprimento;
- Largura da pista e número de faixas;
- Gabarito (altura e largura mínimas livres no interior do túnel);
- Altura e largura do portal;
- Localização geográfica e condições climáticas;
- Orientação do emboque;
- Visibilidade do portal de saída;
- Refletância das paredes;
- Refletância da pista.

7.1.2 DADOS DO TRÁFEGO

As seguintes características do tráfego influenciam na classificação do túnel, extensão, disposição e luminância das zonas de iluminação:

- Velocidade máxima admitida;
- Direção (unidirecional ou bidirecional);
- Volume de tráfego: Média Anual de Veículos por Dia (MAVD).

A TAB.35 fornece as referências para classificação do volume de tráfego:

TABELA 35 – Volume de Tráfego

Leve	Médio	Pesado
MAVD \leq 2.400	2.400 < MAVD < 24.000	MAVD \geq 24.000

MAVD: Média Anual de Veículos por Dia

FONTE – ANSI/IESNA, 2005, p.14. adaptação nossa

⁴⁸ Ver seção 4.4.8.

7.1.3 CLASSIFICAÇÃO DO TÚNEL

Pela classificação dos túneis é determinado um fator de ajuste da luminância na Zona Limiar L_{th} . A CIE é referenciada pela ANSI/IESNA na construção de uma tabela e a recomendação BSI é praticamente a mesma da CIE, sendo, entretanto, um pouco menos restritiva. Pode-se admitir que praticamente haja consenso neste tópico, com pequena variação na norma inglesa. Será adotado o diagrama da IL.185, recomendado pela CIE (2004).

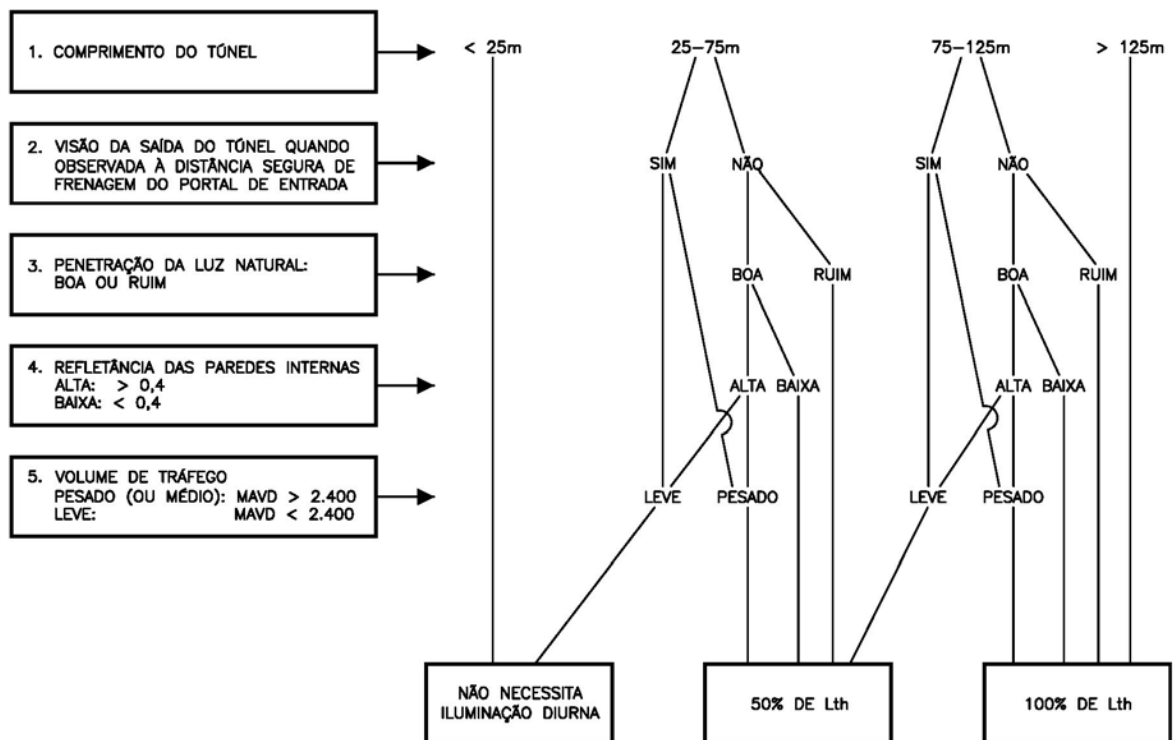


ILUSTRAÇÃO 185 – Fluxograma para Ajuste de L_{th}
 FONTE – CIE, 2004, p.4, tradução e adaptação nossa

7.1.4 CLASSIFICAÇÃO DO EMBOQUE DE ENTRADA

Nesta análise, considera-se a cena vista pelo motorista à Distância Segura de Frenagem (DSF) do portal. Para sua determinação, adotou-se a recomendação BSI (1992), em que os valores para DSF são função da velocidade do tráfego (TAB.36).

TABELA 36 – Distância Segura de Frenagem (DSF)

Velocidade (km/h)	120	100	85	70	60	50
DSF (m)	215	160	120	90	70	50

FONTE – BSI, 1992, p.6, tradução nossa

O **Efeito Buraco Negro** é estimado no instante em que o motorista se encontra na distância do portal de entrada equivalente à *DSF*. Este momento é a referência para o levantamento fotográfico, classificação do emboque e cálculo pelo **Método L_{seq}** . Aqui, a parcela de céu visível atua de maneira desfavorável em relação ao projeto luminotécnico, pois representa fontes de ofuscamento com restrita possibilidade de intervenção. Outra parcela importante de ser avaliada é a paisagem fora do escopo do projeto, contendo elementos naturais ou construídos em que, assim como a parcela de céu visível, é difícil intervir.

A classificação do emboque é definida em função do meio, relevo, paisagem e traçado da via, conforme as seguintes características da cena observada:

- Meio Rural;
- Meio Urbano;
- Túnel em Montanha;
- Túnel em Planície;
- Túnel em Depressão;
- Traçado Reto;
- Traçado Curvo.

Através da análise do emboque pode-se estimar o valor da luminância na Zona Limiar L_{th} , utilizando valores tabelados⁴⁹, ou aplicar o **Método L_{seq}** para uma avaliação preliminar. A IL.186 representa quatro cenas possíveis, extraídas da ANSI/IESNA (2005, p.7) com a sobreposição do **Diagrama Polar do Método L_{seq}** , composto de 108 seções. Como as duas seções superiores e inferiores são descartadas no cálculo (*I1, I6, I7 e I12*), restam 104 seções, e cada uma corresponde a 0,96% do total a ser considerado. Na **Cena A**, a parcela de céu visível ocupa em torno de 32%. A **Cena B** é semelhante à **Cena A**, mas parte da parcela de céu visível (11% do total) é ocupada por elementos construídos sem possibilidade de intervenção, correspondente aos prédios. A outra parte, composta de elementos naturais, pode ser inserida no escopo e contribuir para a diminuição do ofuscamento da abóbada celeste. Na ilustração, as árvores ocupam entre 3% e 4% do total, mas poderiam atingir 10%, se formassem uma massa de vegetação contínua, lindeira à pista.

⁴⁹ Ver TAB.7 na seção 4.4.2.

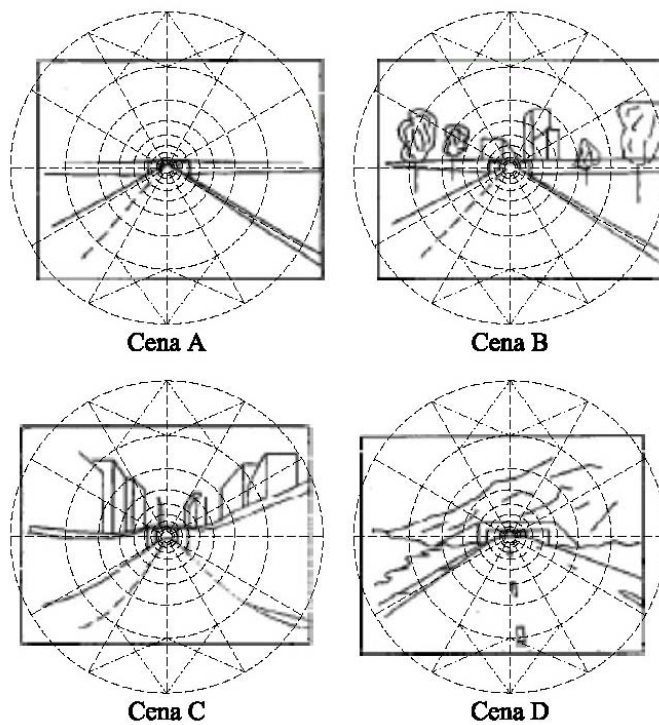


ILUSTRAÇÃO 186 – Diagrama Polar X Cenas dos Emboques
FONTE – Cenas Extraídas da ANSI/IESNA, 2005, p.7

A **Cena C** representa um túnel urbano em depressão. Não há como intervir diretamente nos edifícios, mas as paredes laterais de contenção, que acompanham a pista, podem ser tratadas de maneira a reduzir sua influência na luminância de véu. Por vezes, pode-se introduzir algum elemento com função semelhante à da massa de vegetação analisada na **Cena B**, para obstruir fontes de ofuscamento inatingíveis, principalmente se em algum momento houver reflexão da luz solar direta em fachadas de vidro, o que pode desabilitar a visão do motorista.

Na **Cena D** está representado um túnel em montanha. A parcela de céu visível é aproximadamente 7% do total e esta característica pode ser favorável. O relevo é muitas vezes revestido por vegetação e deve-se cuidar para que a própria obra civil não destrua parte deste revestimento. Além de preservar o meio ambiente, esta providência diminui o ofuscamento do entorno do portal, sendo uma solução simples e eficiente.

As cenas apresentadas exemplificam a análise que deve ser feita ainda nas fases iniciais do projeto, para uma estimativa preliminar da estratégia adequada, ou eventuais alterações no projeto geométrico da via.

7.1.5 ZONA LIMIAR

Conforme foi observado, a luminância na Zona Limiar L_{th} é o ponto-chave do cálculo luminotécnico em túneis rodoviários, por influenciar os demais trechos. As variáveis que devem ser consideradas são: ponto de adaptação, comprimento C_{th} e luminância L_{th} . Em relação ao Sistema de Distribuição (simétrico e assimétrico) considerou-se que ainda faltam experimentos para uma recomendação bem embasada e, por isso, tal aspecto não foi incorporado nessa análise.

7.1.5.1 PONTO DE ADAPTAÇÃO

O Ponto de Adaptação é definido como a posição em que a boca do túnel é o principal elemento no campo visual do motorista, a partir da qual o nível de adaptação visual decresce significativamente. Esta posição pode ser determinada pela equação (66), que calcula a distância entre o observador e a entrada do túnel d em função da altura do portal h e do ângulo vertical de corte do limite superior do pára-brisa $\alpha = 10^\circ$.

$$d = \frac{h - 1,5}{\tan \alpha} \quad [\text{m}] \quad (66)$$

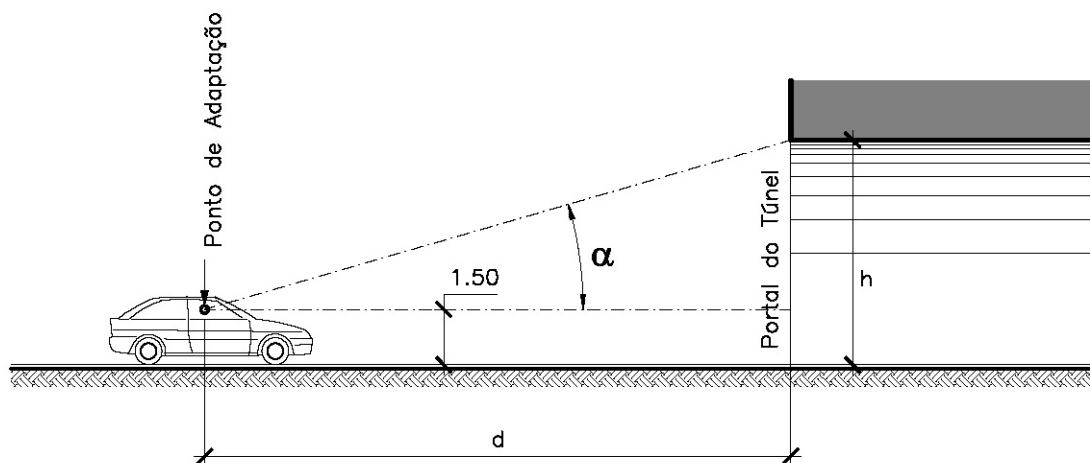


ILUSTRAÇÃO 187 – Ponto de Adaptação

FONTE – BSI, 1992, p.29, tradução e adaptação nossa

Este procedimento é recomendado pela BSI 5489, e mostrou-se o mais coerente com o **Método** L_{seq} . Embora a ANSI/IESNA adote o ângulo α entre 22° e 25° , ângulos que correspondem aproximadamente ao limite superior e inferior do **Diagrama Polar do Método** L_{seq} , os exemplos apresentados para ilustrar o cálculo desconsideram as seções superiores e inferiores do diagrama. O oitavo anel do

diagrama compreende um ângulo cônico de 36° , cuja metade superior é 18° . Este ângulo ocupa uma posição intermediária entre as recomendações BSI e a ANSI/IESNA. O Ponto de Adaptação determina o início da Zona Limiar, afetando o cálculo do seu comprimento C_{th} . Como a BSI acrescenta 20 m na extensão C_{th} , o ângulo de visão superior do motorista no Ponto de Adaptação aproxima-se do recorte definido pelo oitavo anel do diagrama polar, ajustando melhor a geometria ao cálculo.

7.1.5.2 COMPRIMENTO (C_{th})

Segundo a recomendação BSI 5489, considerando $\alpha = 10^\circ$, obtém-se o comprimento da Zona Limiar C_{th} em função da Distância Segura de Frenagem DSF e da distância do Ponto de Adaptação d , pela equação (67):

$$C_{th} = DSF + 20 - d \quad [\text{m}] \quad (67)$$

7.1.5.3 LUMINÂNCIA DA ZONA LIMIAR (L_{th})

Será adotado o **Método** L_{seq} no cálculo de L_{th} . Além de ser aceito internacionalmente, confirmando sua preferência nas últimas edições CIE (2004) e ANSI/IESNA (2005), o método considera a influência da distância angular entre as fontes de ofuscamento e o campo visual central, mostrando uma abordagem bem fundamentada em relação ao fenômeno envolvido: ofuscamento desabilitador.

7.1.6 ZONA DE TRANSIÇÃO

Adotou-se a recomendação CIE 88 (1990; 2004) por esta permitir iniciar a diminuição gradual da luminância da Zona Limiar L_{th} a partir da metade de seu comprimento $0,5 C_{th}$, até atingir $0,4 L_{th}$ no início da Zona de Transição. O final da Zona de Transição é considerado quando a luminância atinge três vezes a luminância da Zona Interior L_{in} . Assim, a luminância da Zona de Transição L_{tr} varia na faixa entre $0,4 L_{th}$ e $3 L_{in}$, adotando-se a nomenclatura L_{ti} para a luminância inicial e L_{tf} para a luminância final da Zona de Transição.

Através do ábaco da IL.188, obtém-se a faixa de variação gradual da luminância da Zona de Transição L_{tr} e o comprimento da Zona de Transição C_{tr} , em função da luminância da Zona Limiar L_{th} e da velocidade do tráfego. A diminuição da luminância da Zona de Transição L_{tr} pode ser feita em estágios, mas a máxima redução permitida em cada estágio é 3:1.

Para determinar o comprimento da Zona de Transição C_{tr} , deve-se calcular a relação percentual entre L_{tf} e L_{th} . Como $L_{tf} = 3 L_{in}$ tem-se:

$$\frac{L_{tf}}{L_{th}} \times 100 = \frac{3L_{in}}{L_{th}} \times 100 \quad [\%] \quad (68)$$

O resultado obtido através da equação (68) deve ser transportado para o eixo das ordenadas e prolongado até a curva do ábaco, obtendo-se o comprimento na escala de velocidade. Por exemplo, se a relação percentual entre L_{tf} e L_{th} for 14%, para a velocidade de 100 km/h tem-se $C_{tr}=50m$.

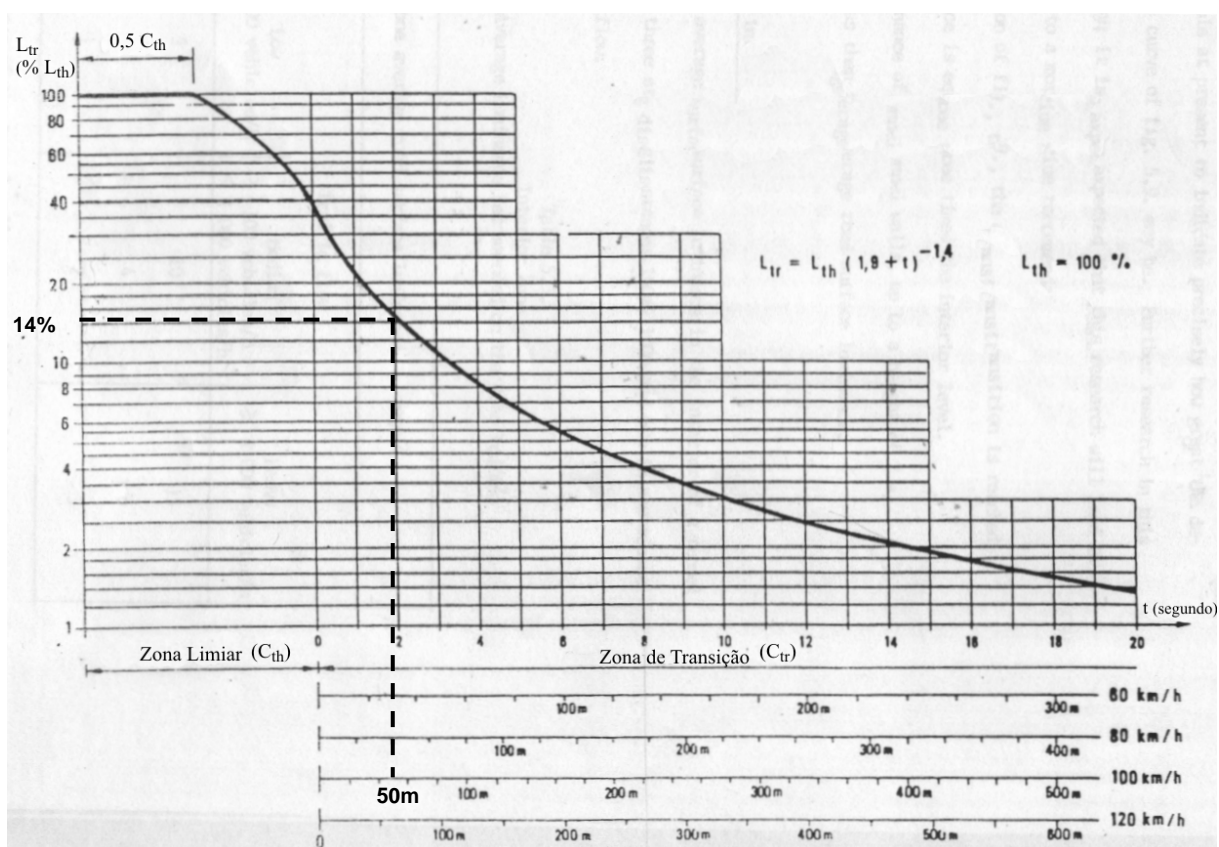


ILUSTRAÇÃO 188 - Zona de Transição: Ábaco para determinação de L_{tr} e C_{tr}
FONTE - CIE, 1990, p.24, tradução e adaptação nossa

7.1.7 ZONA INTERIOR

Os fatores que influenciam a iluminação desta zona relacionam-se à velocidade e volume de tráfego. Nota-se a mesma faixa adotada pela BSI e ANSI/IESNA (entre 3 e 10 cd/m^2), coincidindo também com a recomendação ABNT, se forem consideradas as refletâncias do pavimento entre 0,3 e 0,7. Será adotada a recomendação ANSI/IESNA (TAB.37)

TABELA 37 – Luminância na Zona Interior (L_{in})

Velocidade do Tráfego	Volume de Tráfego		
	Leve	Médio	Pesado
	Luminância Média na Zona Interior (cd/m ²)		
100 km/h (60 mph)	6	8	10
80 km/h (50 mph)	4	6	8
60 km/h (40 mph)	3	4	6

FONTE - ANSI/IESNA, 2005, p.14. tradução e adaptação nossa

O comprimento da Zona Interior é obtido pela equação (69):

$$C_{in} = C_{tot} - (C_{th} + C_{tr} + C_s) \quad [m] \quad (69)$$

Onde:

- C_{in} Comprimento da Zona Interior;
- C_{tot} Comprimento Total do Túnel;
- C_{th} Comprimento da Zona Limiar;
- C_{tr} Comprimento da Zona de Transição;
- C_s Comprimento da Zona de Saída.

7.1.8 ZONA DE SAÍDA

Embora os problemas de adaptação visual na saída sejam menos importantes que na entrada do túnel, existem quatro aspectos significativos, citados pela CIE e BSI, a serem observados:

1. **Ofuscamento desabilitador:** impede a visualização de pequenos objetos atrás de grandes veículos;
2. **Visão pelo espelho retrovisor:** principalmente quando é permitida a ultrapassagem na saída do túnel;
3. **$L_s = 5 L_{in}$:** a luminância da Zona de Saída deve ser 5 vezes a luminância da Zona Interior;
4. **Comprimento (C_s):** em 1990, a CIE recomendava $C_s = 60m$ e a BSI (1992) relacionava C_s à velocidade permitida. Atualmente, a CIE (2004) adota um aumento gradual da iluminação, partindo da Distância Segura de Frenagem até atingir cinco vezes a luminância da Zona Interior a 20m do portal de saída. Neste tópico, será adotada esta recomendação, podendo-se utilizar estágios até a razão 1:3, como na Zona de Transição. Assim, a luminância inicial da

Zona de Saída L_{si} corresponderá a $2 L_{in}$ e a luminância final L_{sf} corresponderá a $5 L_{in}$

7.1.9 INTERMITÊNCIA E UNIFORMIDADE

Embora a análise da intermitência não deva interferir no **SAV**, sendo mais apropriada para o sistema artificial, é aconselhável verificar se as aberturas não produzem efeito estroboscópico no motorista em velocidade, conforme a recomendação CIE (2004), evitando a frequência entre 2,5 e 15 Hz.

Para determinação da uniformidade será adotada a recomendação ANSI/IESNA (2005, p.15), seguindo a seguinte relação de referência:

$$L_{min} / L_{med} \quad 1 / 2$$

$$L_{min} / L_{max} \quad 1 / 3,5$$

7.2 ESTRATÉGIAS PARA COMPOSIÇÃO DO SAV

São propostas as seguintes estratégias:

1. **Tratamento superficial:** intervenção na refletância das superfícies dentro do campo visual do motorista para diminuição da Luminância de Véu Equivalente L_{seq} ;
2. **Elementos de controle da luz:** concepção de revestimentos ou dispositivos de sombreamento para reduzir o potencial das fontes de ofuscamento, no campo visual do motorista, por obstrução e reflexão da luz solar direta;
3. **Desenho do portal:** concepção arquitetônica, buscando uma geometria que favoreça a penetração da luz natural no interior do túnel, sem incrementar a Luminância de Véu Equivalente L_{seq} ;
4. **Túnel falso:** concepção de um **Dispositivo para Adaptação Visual (DAV)** no emboque de entrada, dosando a luz por aberturas zenitais e laterais para suprir a iluminação diurna na Zona Limiar a na Zona de Transição;
5. **Módulos fotovoltaicos:** existem três sistemas – autônomo, híbrido e conectado à rede. Principalmente em áreas não atingidas pela rede elétrica, pode ser uma boa alternativa, provendo a iluminação diurna, diuturna e noturna.

As três primeiras tratam as fontes de ofuscamento e deverão operar em sintonia com o sistema artificial, sem caracterizar a autonomia do sistema passivo. As Estratégias 1 e 2 são medidas mitigadoras, enquanto que as Estratégias 4 e 5

são provedoras de luz e energia. Já a Estratégia 3 pode apresentar dupla função, interferindo tanto nas fontes de ofuscamento como no nível de iluminação na Zona Limiar.

As estratégias estão dispostas em ordem crescente do investimento necessário e da complexidade para sua implantação. Este aspecto dependerá de outros elementos envolvidos no projeto e tal ordem poderá não corresponder a situações específicas. Entretanto, com pequenas variações, deverá ocorrer conforme apresentado, o que pode auxiliar na escolha da melhor opção. Esta consideração é importante para uma primeira seleção das alternativas viáveis do **SAV**, segundo os recursos disponíveis.

Trabalhando isoladas ou combinadas entre si, pela ordem apresentada, cada estratégia pode conter a anterior. Assim, os módulos fotovoltaicos (Estratégia 5) podem ser dispostos como um túnel falso (Estratégia 4) e incorporar um desenho adequado no portal do túnel falso para melhor aproveitamento da luz (Estratégia 3), com elementos de controle da luz (Estratégia 2). Por fim, o tratamento das superfícies irá otimizar o desempenho de todo sistema (Estratégia 1).

7.2.1 ESTRATÉGIA 1: TRATAMENTO SUPERFICIAL

Esta estratégia é um requisito básico, independente de qualquer análise anterior. As superfícies que podem provocar ofuscamento no campo visual do motorista devem ter refletância baixa, e isto se aplica a qualquer emboque. Dentre os elementos construídos, a pista é a de maior influência no campo visual do motorista e deve ser tratada de modo a apresentar refletância inferior a 15% e distribuição difusa⁵⁰. A mesma orientação se aplica aos demais elementos construídos, como barreiras rígidas, muros de contenção, prédios de utilidades e também placas que possam invadir o campo visual do motorista.

Diversos recursos podem ser utilizados, mas deve-se atentar para possíveis problemas de manutenção, implicando em perda de eficiência e custo operacional. Assim, para o pavimento de concreto, a adição de pigmento no próprio material é mais adequada que a posterior aplicação de pintura, e a superfície difusora deve ser obtida no momento da execução, selecionando agregado e técnica apropriados para evitar aplicação posterior de revestimento. Por isso, em novos empreendimentos, é

⁵⁰ Em relação às propriedades refletoras do pavimento, a CIE (1982) fornece recomendações detalhadas que classificam as diversas superfícies utilizadas para este fim. Esta questão não foi tratada neste trabalho, no qual as superfícies são admitidas com comportamento equivalente ao difusor perfeito.

importante considerar estas providências dentro das obras civis, pois, além do melhor resultado, o custo envolvido em medidas corretivas pós-obra é maior.

Estas considerações são indicadas para o trecho de rodovia aberta a partir do ponto em que é feita a análise da cena do emboque de entrada, cuja distância corresponde à *DSF* (TAB.36). Entretanto, a Estratégia 1 engloba também as zonas interiores do túnel. Se, para as superfícies exteriores interessam baixas refletâncias para diminuir o potencial das fontes de ofuscamento, no interior do túnel esta premissa se inverte, importando obter altas refletâncias nas superfícies para melhor aproveitamento da luz. Por outro lado, é difícil manter esta condição no espaço confinado pelo túnel, devido à sujeira e à fuligem provenientes dos pneus e dos gases emitidos pelos veículos, que acabam impregnadas nos materiais.

Portanto, dentro do túnel, a refletância da pista deverá se aproximar de 30% pois, na pista seca, a refletância difusa dos materiais normalmente utilizados varia entre 15% e 30% (BSI, 1992, p.14). Para definir o alinhamento de transição das refletâncias exterior e interior, considera-se a penetração solar no interior do túnel. Assim, o pavimento de menor refletância (exterior) deve penetrar no interior do túnel até este alinhamento, ocorrendo, então, a mudança para o pavimento de maior refletância (interior).

As paredes laterais do túnel também exercem importante influência na iluminação. A ANSI/IESNA (2005, p.15) recomenda manter uma luminância média, de ao menos um terço da luminância da pista em até três metros de altura da parede lateral. A CIE (2004, p.19) adota 60% da luminância da pista até dois metros de altura da parede lateral. Valores dentro desta faixa são considerados adequados, e as superfícies devem apresentar distribuição difusa da luz, facilidade de manutenção e refletância inicial de ao menos 50%.

7.2.2 ESTRATÉGIA 2: ELEMENTOS DE CONTROLE DA LUZ

O enfoque desta estratégia está na obstrução da luz. Ela atua tanto de forma indireta, reduzindo a incidência da luz solar nas fontes de ofuscamento, como de forma direta, obstruindo as fontes que podem prejudicar a visão do motorista. Assim, configura volumes e superfícies que, na primeira abordagem, interferem na fonte de ofuscamento e, na segunda, criam uma barreira entre a fonte de ofuscamento e o observador.

Na análise do emboque de entrada (seção 7.1.4), foram apresentadas algumas considerações relacionadas a esta estratégia. A restauração de uma parte da vegetação afetada pela própria obra civil do túnel é uma maneira de sombrear uma fonte de ofuscamento passível de intervenção. Já a obstrução da parcela de céu visível por uma massa de vegetação é uma forma de criar uma barreira entre o observador e uma fonte de ofuscamento inatingível. Estes exemplos ilustram o conceito envolvido na Estratégia 2.

Para controlar a incidência da luz solar direta e difusa no entorno do portal do túnel, aplica-se o mesmo conceito envolvido na tela à prova de penetração solar. A tela, posicionada no mesmo plano do portal, impede a insolação e diminui a luz difusa que atinge a superfície. As exigências quanto à penetração solar são menos rigorosas do que na cobertura do **DAV**, e o desenho da malha da tela pode ser simplificado, admitindo a célula retangular com as aletas ortogonais ao plano da tela. Forma-se assim um dispositivo tipo caixa-de-ovo⁵¹, cuja transmissão difusa média pode ser estimada em função das proporções geométricas da malha e da refletância das lâminas (IL.189).

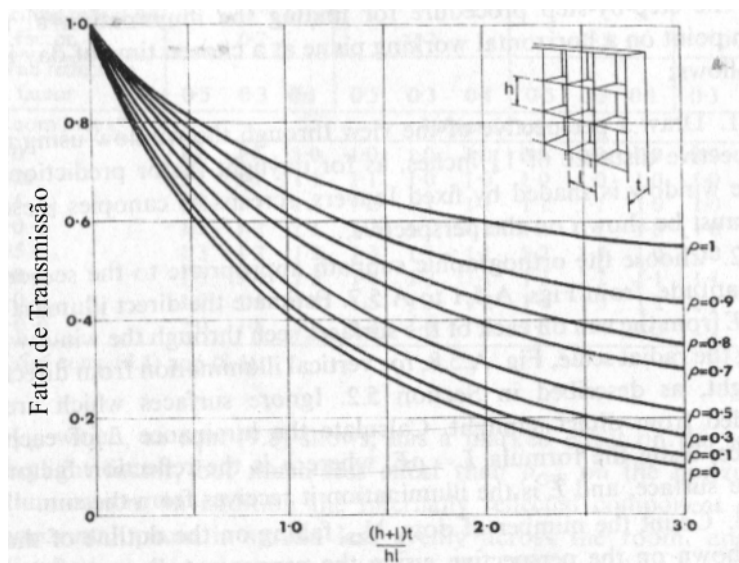


ILUSTRAÇÃO 189 – Grade Caixa-de-Ovo: Ábaco do Fator de Transmissão da Luz Difusa
FONTE – LYNES, 1968, p.136, tradução nossa

Admitindo que a luz solar direta foi obstruída e que a refletância das aletas da grade está abaixo de 10% (0,1), estima-se a luminância média no plano do portal em que foi aplicado o dispositivo. Certamente haverá alguma interferência da luz solar direta no resultado, mas este procedimento é suficiente para uma estimativa

⁵¹ O termo caixa-de-ovo deriva do inglês *egg-crate*.

preliminar. Além disso, a agressividade do meio nesse caso é favorável quanto ao desempenho da tela, pois tende a diminuir seu potencial de reflexão.

A vegetação é um recurso importante nesta estratégia. Ela não apenas diminui a luminância no cenário, como também restaura a paisagem. A conformação de cheios e vazios, própria das espécies vegetais, permite drenar a luz para seu interior. As espécies devem ser criteriosamente selecionadas. Além da compatibilidade com o meio ambiente, deve-se atentar quanto a possíveis problemas com manutenção e segurança, advindos de fragmentos que podem prejudicar o sistema de drenagem ou cair sobre a pista. Folhagem permanente, de cor escura e pequenas dimensões, que apresente sombra média, são características apropriadas, configurando uma textura com função similar à grade caixa-de-ovo. Podem formar forrações, sebes, ou massas de vegetação compostas por plantas ou árvores de pequeno, médio e grande porte.

A luminância da vegetação e demais elementos da paisagem é normalmente difícil de ser obtida por procedimentos de cálculo, mesmo utilizando os recursos da computação. As normas apresentam valores tabelados que podem ser utilizados para uma estimativa preliminar (TAB.38).

TABELA 38 – Luminâncias Típicas nas Imediações do Portal

Direção do Motorista (Hemisfério Sul)*	Luminância do Céu (kcd/m ²)	Luminância da Pista (kcd/m ²)	Luminância da Paisagem (kcd/m ²)			
			pedras	edifícios	neve	relva
S	6	3	4	11	20	2
L - O	8	4	1	3	5	1
N	9	5	1	2	4	1

* No Hemisfério Norte as indicações N e S devem ser trocadas

FONTE - ANSI/IESNA, 2005, p.12. tradução e adaptação nossa

A BSI (1992) estima a luminância de 1 kcd/m² para árvores e 2 kcd/m² para grama. Durante as medições no Rodoanel Mário Covas, encontraram-se grandezas desta ordem, confirmando os valores estimados pela BSI nos momentos de maior insolação. Atribui-se esta constatação, principalmente, à maior permeabilidade à luz das espécies de maior porte, pois os gramados não conseguem compor uma textura de luz e sombra como as árvores, refletindo uma porção maior da luz incidente. Além disso, a coloração das folhas é mais clara, prejudicando seu desempenho quanto à redução da luminância de véu.

Para uma avaliação mais precisa, recomendam-se medições de luminância *in loco* em condições críticas de insolação. Desta forma, pode-se compor um glossário, classificando os elementos segundo suas propriedades relacionadas ao controle, reflexão e distribuição da luz.

O conceito envolvido na grade tipo caixa-de-ovo e na utilização de vegetação pode configurar uma solução composta. Neste caso, a grade também assume função de suporte, com dimensões apropriadas para plantio e, juntamente com a vegetação, protege o plano do portal da insolação direta. Esta solução pode ser apropriada pela composição arquitetônica, com repercussões na Estratégia 3.

Integrar o paisagismo à estratégia requer um projeto paisagístico detalhado e cuidados adicionais com a execução e manutenção, o que pode ser visto com restrição pelos profissionais envolvidos na construção e gerenciamento de estradas. Entretanto, o resultado poderá compensar e minimizar eventuais adversidades, utilizando espécies nativas resistentes ou remanejando espécies vegetais do próprio local que foram atingidas pela obra viária. Muitas vezes, a própria opção pelo túnel está fundamentada no menor impacto ambiental, e recompor o meio ambiente pode justificar e viabilizar essa alternativa.

7.2.3 ESTRATÉGIA 3: DESENHO DO PORTAL

A influência do desenho do portal na iluminação da Zona Limiar está presente, de alguma maneira, em todas as recomendações internacionais pesquisadas. Mesmo não fazendo alusão direta ao desenho do portal, a CIE (2004) admite uma redução na Luminância de Zona Limiar L_{th} , em função da penetração da luz diurna na entrada do túnel. A BSI (1994) adota a mesma conduta e acrescenta a redução na luminância da Zona de Acesso através do desenho da fachada do portal, além do Ponto de Adaptação, que é determinado em função da altura do portal de entrada, como já foi visto. A ANSI/IESNA (2005) também segue procedimentos semelhantes e menciona o desenho do portal e arredores. Entretanto, a penetração da luz diurna no interior do túnel pode ser acompanhada pela penetração solar e, nesta condição, avança no trecho inicial da Zona Limiar, produzindo superfícies de elevada luminância, num momento crítico da adaptação visual do motorista.

A Estratégia 3 é de difícil solução para um resultado eficiente do ponto de vista da iluminação. Poucos exemplos foram encontrados, nos quais o projeto do

portal mereça destaque quanto ao aproveitamento da luz natural, conforme apresentado na seção 4.3.1.

7.2.4 ESTRATÉGIA 4: TÚNEL FALSO (DAV)

Dentre as estratégias apresentadas, a Estratégia 4 (**Dispositivo para Adaptação Visual – DAV**) reúne a maior complexidade construtiva. Da mesma forma, aqui está o maior potencial para solução do problema. O Capítulo 6 apresentou um método para seu dimensionamento, configurando um túnel falso que consegue atingir o nível de iluminação próximo ao necessário na Zona Limiar, através da luz natural que penetra pelas aberturas de uma tela à prova de penetração solar. O método designado como **Adaptação do Método de Swierstra** possibilitou um controle acurado da penetração solar, a qual poderá ser permitida em condições extremas, para atingir o nível necessário. Tal opção, recentemente adotada pela CIE (2004), contraria a orientação clássica de bloquear totalmente a luz solar direta no interior do dispositivo, mas deve-se admitir sua utilização, mesmo que em caráter provisório, para testar o resultado. Neste aspecto, as telas proporcionam versatilidade e precisão, podendo ainda ser reversíveis, se as células apresentarem alguma mobilidade que ajuste sua inclinação.

Para adoção desta estratégia, deve-se considerar o investimento necessário, extensão do túnel, condições do emboque, volume de tráfego, interferência na paisagem e exigência de iluminação. Túneis com extensão de até 125m normalmente podem ser atendidos pelas outras estratégias, com possibilidade de redução de 50% na Luminância da Zona Limiar L_{th} apenas pela classificação do túnel (seção 7.1.3). A extensão do **DAV** é aproximadamente a Distância Segura de Frenagem, pois depende da velocidade do tráfego para proporcionar o tempo adequado à adaptação visual. Assim, assume valores entre 50 e 215 m, influenciando significativamente na extensão total do túnel e interferindo em sua classificação.

Estas considerações são importantes para viabilizar a estratégia em função das exigências de projeto e recursos disponíveis. Como regra geral, quanto maior a dimensão da obra e as dificuldades do projeto luminotécnico, maior será a probabilidade de aplicação da Estratégia 4, pois o valor proporcional em relação a todo empreendimento será menor, e o benefício em situações adversas é normalmente maior, com implicações no retorno do investimento.

7.2.5 ESTRATÉGIA 5: MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Se na Estratégia 4 está a maior complexidade construtiva, na Estratégia 5 está a maior complexidade tecnológica. Seu caráter inovador e correspondência direta com a insolação podem induzir a uma conclusão precipitada, parecendo a alternativa mais promissora por conter as qualidades ideais para aplicação em iluminação de túneis rodoviários. Entretanto, além do elevado investimento inicial para sua instalação, esta estratégia está sujeita a cuidados operacionais e de manutenção mais rigorosos, envolvendo ainda a vulnerabilidade a furto, vandalismo e agressividade do meio. Em São Paulo e imediações, onde não é raro encontrar relatos de furto das instalações elétricas em túneis – Túnel Anhangabaú, Túnel da Mata Fria, Passagem sob a Praça Roosevelt – pode-se imaginar o que ocorreria com a instalação de módulos fotovoltaicos.

Outro aspecto primordial a ser considerado é a disponibilidade espacial para instalação dos módulos fotovoltaicos. A alta demanda de energia elétrica nos túneis acarreta em grande quantidade de módulos, os quais devem estar dispostos de maneira apropriada para receber a maior insolação possível e evitar a projeção de sombras entre eles. Para se ter uma idéia, o consumo apenas para iluminação, no túnel de menor extensão do Rodoanel Mário Covas (Túnel 3; extensão = 450m) é de 1.615 kWh/dia. Considerando para São Paulo HSP = 4, seriam necessários 4.750 módulos de 85Wp⁵² com dimensões de 1,00 x 0,65m. Admitindo a inclinação dos módulos de 30°, tem-se a área projetada de um módulo no plano horizontal de 0.57m², multiplicando-se a área de um módulo pelo co-seno de 30°. A área total projetada, resultante do somatório dos 4.750 módulos, é 2.707m², sendo que ainda não foi computado, nesta área, o espaçamento necessário para evitar a projeção de sombras entre os módulos.

Essas observações talvez bastem para desencorajar a utilização da Estratégia 5, mas não é este o intuito. A opção pelos módulos fotovoltaicos pode ser uma alternativa, principalmente em regiões afastadas da rede elétrica, e será analisada, buscando integrá-la ao **SAV**. Acrescenta-se que, mesmo em situações em que não seja recomendada sua aplicação por questões econômicas ou sociais, o **SAV** poderá adotar alguns conceitos que propiciem a Estratégia 5, configurando

⁵² HSP (horas de Sol pleno) e Wp (Watt pico) são parâmetros normalmente utilizados para dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos.

uma arquitetura adequada para sua implantação futura, quando houver condições mais favoráveis.

7.3 PROJETO ARQUITETÔNICO

Além da economia e complexidade envolvidas, as relações geométricas, a interferência na paisagem e as condicionantes regionais e locais deverão indicar a solução mais adequada para composição do **SAV**. Por exemplo, a Estratégia 4 poderá configurar um **DAV** de extensão superior ao túnel. Por vezes, a opção pelo túnel foi determinada em função das exigências de proteção ao meio ambiente e da menor interferência com a paisagem, e o **DAV** pode não estar conforme tais requisitos.

As estratégias apresentadas não esgotam as possibilidades, nem devem ser adotadas de forma cartesiana, mas foram idealizadas para orientar o projetista quanto à diversidade de recursos disponíveis para compor o **SAV**.

Conforme foi observado na descrição inicial da Estratégia 1, esta deveria ser considerada um pré-requisito para a obra civil. O projeto desta estratégia resume-se na especificação adequada dos revestimentos e na composição dos materiais, buscando facilidade de manutenção e preservação das propriedades ópticas das superfícies.

A Estratégia 2 envolve enfoques diferenciados, com possibilidades multidisciplinares. O paisagismo exerce importante função nesta estratégia, como o fator determinante e condutor do projeto, mas outras condicionantes, relacionadas aos requisitos estruturais, projeto geométrico, orientação do túnel e impacto ambiental, devem estar integradas no plano de massas, com o objetivo específico de controle da luz. Esta não é uma prática comum, o que requer uma predisposição e sensibilização das diversas áreas envolvidas no projeto. Para tanto, o cálculo luminotécnico é fundamental, e deverá se adiantar para definir claramente suas premissas, orientando quanto ao posicionamento, disposição e especificação dos componentes e superfícies.

Os problemas decorrentes do desenho e material adotados no Túnel Thorold já foram mencionados na seção 4.3.1, uma vez que o potencial luminoso das superfícies que conduzem a luz para o interior do túnel por reflexão também são fontes de ofuscamento para o motorista. Por outro lado, este exemplo é esclarecedor de certos aspectos relacionados às estratégias, e serão retomados aqui.

A IL.190 mostra uma vista geral do Emboque Oeste. Observa-se sua correspondência com a **Cena A** analisada na seção 7.1.4, em que a parcela de céu visível ocupa 32% do campo visual do motorista. A orientação Leste / Oeste dos emboques é mais um agravante, pois o Sol chega a interferir no campo visual do motorista. Portanto, mais indicado que aproveitar a luz natural por reflexão é obstruir as fontes de ofuscamento e tratar as superfícies com baixos coeficientes de reflexão, aplicando as Estratégias 1 e 2.

Estes aspectos foram mencionados por Mason (1970, p.171), sugerindo cores escuras no portal e o plantio de uma fileira de árvores em cada lado da pista na Zona de Aproximação. Mason também observa que a extensão do portal no sentido do tráfego é 15 metros e, para a velocidade permitida de 80 km/h, sua travessia ocorre em 0.67 segundo. A iluminação é reduzida numa relação de 12 para 1 neste curto intervalo de tempo, parecendo um tanto abrupta.



ILUSTRAÇÃO 190 – Túnel Thorold: Vista Geral do Emboque Oeste
FONTE – IES, 1970. p.163

É surpreendente como a influência das fontes de ofuscamento foi desconsiderada nesta obra, aplicando o contrário do recomendado na Estratégia 1. A pista exterior é em concreto e a interior em asfalto, diminuindo a refletância do pavimento justamente quando é necessário incrementá-la.

A despeito do resultado plástico da obra, seu desempenho mostrou-se insatisfatório, e alternativas de menor custo melhor atenderiam os requisitos de

iluminação. O desenho do portal deve permitir a penetração da luz natural difusa, podendo também aproveitar a luz solar direta por reflexão, desde que não aumente o potencial das fontes de ofuscamento no entorno do portal. Sua inter-relação com as demais estratégias também é um importante fator a ser considerado no projeto.

Embora fuja ao recorte do objeto de pesquisa, não se pode deixar ao menos de pontuar certas evidências que abrangem questões sócio-econômicas comuns em nosso país. A aplicação de módulos fotovoltaicos em áreas desprovidas de energia elétrica, tem-se mostrado, no Brasil, uma alternativa eficaz no desenvolvimento tecnológico e inserção social de comunidades remotas. Entretanto, é difícil propor a instalação de um parque contendo módulos fotovoltaicos para suprir a energia, por exemplo, dos túneis do Rodoanel Mário Covas sem imaginar, num curto espaço de tempo, o parque vazio (ou invadido) e os diversos módulos distribuídos na paisagem carente de nossa periferia. Antes que este enfoque pareça elitista, privilegiando o automóvel em detrimento da população carente, trata-se de uma questão que envolve o gerenciamento do dinheiro público, a segurança dos usuários das vias e a influência do transporte viário nas diversas instâncias da economia. Chegamos ao absurdo, como no Túnel da Mata Fria na Rodovia Fernão Dias, de instalar placas advertindo o motorista que o túnel estava sem iluminação devido a furtos, recomendando acender os faróis durante o dia e reduzir a velocidade. Sob a Praça Roosevelt, técnicos do Departamento de Iluminação Pública da Prefeitura de São Paulo (ILUME) informaram verbalmente a desistência de repor a instalação elétrica pelo mesmo motivo.

Em menor grau, a Estratégia 4 também pode ficar vulnerável. Se o furto chega a atingir as placas de sinalização da via, o que não dizer de estruturas metálicas que poderão compor as telas de iluminação e sua sustentação? Estes fatos não podem passar despercebidos ao projetista, que deverá buscar os meios de contornar tais adversidades. Estruturas robustas, obstruções naturais ou projetadas que dificultem o acesso a pontos críticos do sistema são alguns recursos que podem diminuir a ocorrência de tais eventos.

Combinando-se as Estratégias 4 e 5, é possível diminuir a quantidade de módulos fotovoltaicos. No Túnel 3, tomado como exemplo para o dimensionamento preliminar da Estratégia 5, 54,27% do consumo deve-se à iluminação diurna da Zona Limiar. Incorporando a Estratégia 4, esta parcela seria atendida pelo **DAV**, com sensível redução nos módulos fotovoltaicos. Estes poderão ainda compor

parcialmente as superfícies da malhas da tela à prova de penetração solar. Assim, o **SAV** deixa passar parte da luz difusa da abóbada, obstrui a penetração solar, reflete parte desta radiação para o interior do dispositivo e aproveita outra parcela da luz solar para gerar a energia necessária para a iluminação artificial da Zona Interior.

Enfim, a concepção do **SAV** é um exercício de projeto, com as especificidades próprias deste ofício, cabendo a análise criteriosa de todos elementos envolvidos.

7.4 FICHA RESUMO: DADOS, PARÂMETROS E RESULTADOS

Para apresentação dos dados, parâmetros e resultados, propõe-se a elaboração de uma **Ficha Resumo**, a qual deve conter todos os elementos significativos envolvidos, permitindo visualizar o desempenho das estratégias e sua interferência em cada zona de iluminação. A **Ficha Resumo Modelo** (IL.191) é composta de três campos, e seu preenchimento deve seguir a seqüência numérica desses campos. O campo 1 (**Dados do Túnel**) contém as variáveis necessárias para o dimensionamento das luminâncias e extensões das diversas zonas de iluminação, as quais constam no campo 2 (**Cálculos e Parâmetros**). As regiões sombreadas na cor cinza são destinadas à apresentação dos dados e resultados.

A área reservada, na parte inferior do campo 1, para representar a Vista Exterior do Emboque e o Período de Insolação do Portal. No lado direito do campo 2, a coluna **Procedimentos** indica as operações para obtenção dos resultados, e a coluna **Referências** reporta as operações à origem, relacionando as seções, tabelas, ilustrações ou equações que contêm a explicação do cálculo.

As estratégias para composição do **SAV** estão dispostas no campo 3. Inicialmente, as estratégias são apenas selecionadas com base nas informações contidas nos campos 1 e 2. A orientação do emboque, o comprimento total do túnel, a cena do emboque e a luminância da Zona Limiar são suficientes para uma postura preliminar diante das possíveis estratégias a serem adotadas. Uma vez aplicadas, a ficha deverá sofrer revisão, incorporando os resultados e eventuais alterações nos dados de entrada, provenientes da influência das estratégias. O comprimento total do túnel, a altura do portal e as refletâncias das superfícies são variáveis diretamente relacionadas ao cálculo, e as estratégias interferem nessas variáveis. Neste processo, algumas estratégias poderão ser descartadas ou substituídas por novas estratégias, até atingir um desempenho satisfatório do sistema.

A faixa cinza na borda direita da ficha é destinada para os resultados depois de incorporadas as estratégias. Esta faixa pertence ao campo 3, mas foi colocada ao lado do campo 2 para alinhar os novos valores com os valores originais, facilitando a análise comparativa.

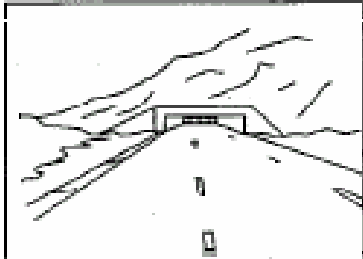
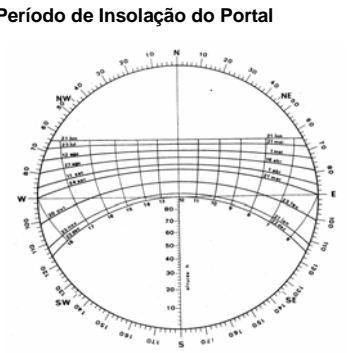
Obra: Local:	Latitude:	Túnel: Emboque:	Data: Horário:	Notas: 1. SAV: Sistema para Adaptação Visual 2. DSF: Distância Segura de Frenagem 3. MAVD: Média Anual de Veículos/Dia																																																																																																																																																																																
1. Dados do Túnel		2. Cálculos e Parâmetros																																																																																																																																																																																		
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Comprimento</td> <td>Ctot (m)</td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Pista</td> <td>Largura (m)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Faixas (n°)</td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Gabarito</td> <td>Largura (m)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Altura (m)</td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="3">Portal</td> <td>Largura (m)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Altura h (m)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Orientação</td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Penetração da Luz Natural</td> <td>Boa</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Ruim</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Visibilidade da Saída</td> <td>Sim</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Não</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Refletâncias</td> <td>Paredes (%)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Pista (%)</td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="4">Tráfego</td> <td>V. Máx. (km/h)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Vol. (MAVD):</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Unidirecional</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Bidirecional</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td rowspan="6">Cena do Emboque</td> <td>Rural</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Urbano</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Montanha</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Planície</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Depressão</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Reto</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Curvo</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </table>		Comprimento	Ctot (m)		Pista	Largura (m)		Faixas (n°)		Gabarito	Largura (m)		Altura (m)		Portal	Largura (m)		Altura h (m)		Orientação		Penetração da Luz Natural	Boa	<input type="checkbox"/>	Ruim	<input type="checkbox"/>	Visibilidade da Saída	Sim	<input type="checkbox"/>	Não	<input type="checkbox"/>	Refletâncias	Paredes (%)		Pista (%)		Tráfego	V. Máx. (km/h)		Vol. (MAVD):		Unidirecional	<input type="checkbox"/>	Bidirecional	<input type="checkbox"/>	Cena do Emboque	Rural	<input type="checkbox"/>	Urbano	<input type="checkbox"/>	Montanha	<input type="checkbox"/>	Planície	<input type="checkbox"/>	Depressão	<input type="checkbox"/>	Reto	<input type="checkbox"/>	Curvo	<input type="checkbox"/>	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2">Volume de Tráfego</td> <td>Procedimentos</td> <td>Referências</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Leve</td> <td><input type="checkbox"/> Médio</td> <td><input type="checkbox"/> Pesado</td> <td>Tabela</td> <td>TAB.35</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Ajuste de Lth</td> <td>Fluxograma</td> <td>IL.185</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> 0%</td> <td><input type="checkbox"/> 50%</td> <td><input type="checkbox"/> 100%</td> <td>Tabela</td> <td>TAB.36</td> </tr> <tr> <td colspan="2">DSF(m) =</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">h(m) =</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Ponto de Adaptação</td> <td>$d = \frac{h - 1,5}{\tan 10^\circ}$</td> <td>IL.187</td> </tr> <tr> <td colspan="2">d (m) =</td> <td></td> <td>EQ.66</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Zona Limiar</td> <td>$Cth = DSF + 20 - d$</td> <td>EQ.67</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Cth (m) =</td> <td>Método Lseq</td> <td>Sec.5.3.1</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Lth (cd/m²) =</td> <td>$Eth = Lth \cdot \pi / \rho$</td> <td>EQ.5</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Eth (lx) =</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Zona de Transição</td> <td>Abaco</td> <td>IL.188</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Ctr (m) =</td> <td>$Lti = 0,4 Lth$</td> <td>Sec.7.1.6</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Lti (cd/m²) =</td> <td>$Eti = Lti \cdot \pi / \rho$</td> <td>EQ.5</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Eti (lx) =</td> <td>$Ltf = 3 Lin (< Lti)$</td> <td>Sec.7.1.6</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Ltf (cd/m²) =</td> <td>$Ltf(\%) = 3Lin / Lth \times 100$</td> <td>EQ.68</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Ltf (% Lth) =</td> <td>$Etf = Ltf \cdot \pi / \rho$</td> <td>EQ.5</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Etf (lx) =</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Zona interior</td> <td>$Cin = Ctot - (Cth + Ctr + Cs)$</td> <td>EQ.69</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Cin (m) =</td> <td>Tabela</td> <td>TAB.37</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Lin (cd/m²) =</td> <td>$Ein = Lin \cdot \pi / \rho$</td> <td>EQ.5</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Ein (lx) =</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Zona de Saída</td> <td>$Cs = DSF$</td> <td>TAB.36</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Cs (m) =</td> <td>$Lsi = 2Lin$</td> <td>Sec.7.1.8</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Lsi (cd/m²) =</td> <td>$Esi = Lsi \cdot \pi / \rho$</td> <td>EQ.5</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Esi (lx) =</td> <td>$Lsf = 5Lin$</td> <td>Sec.7.1.8</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Lsf (cd/m²) =</td> <td>$Esf = Lsf \cdot \pi / \rho$</td> <td>EQ.5</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Esf (lx) =</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		Volume de Tráfego		Procedimentos	Referências	<input type="checkbox"/> Leve	<input type="checkbox"/> Médio	<input type="checkbox"/> Pesado	Tabela	TAB.35	Ajuste de Lth		Fluxograma	IL.185	<input type="checkbox"/> 0%	<input type="checkbox"/> 50%	<input type="checkbox"/> 100%	Tabela	TAB.36	DSF(m) =				h(m) =				Ponto de Adaptação		$d = \frac{h - 1,5}{\tan 10^\circ}$	IL.187	d (m) =			EQ.66	Zona Limiar		$Cth = DSF + 20 - d$	EQ.67	Cth (m) =		Método Lseq	Sec.5.3.1	Lth (cd/m²) =		$Eth = Lth \cdot \pi / \rho$	EQ.5	Eth (lx) =				Zona de Transição		Abaco	IL.188	Ctr (m) =		$Lti = 0,4 Lth$	Sec.7.1.6	Lti (cd/m²) =		$Eti = Lti \cdot \pi / \rho$	EQ.5	Eti (lx) =		$Ltf = 3 Lin (< Lti)$	Sec.7.1.6	Ltf (cd/m²) =		$Ltf(\%) = 3Lin / Lth \times 100$	EQ.68	Ltf (% Lth) =		$Etf = Ltf \cdot \pi / \rho$	EQ.5	Etf (lx) =				Zona interior		$Cin = Ctot - (Cth + Ctr + Cs)$	EQ.69	Cin (m) =		Tabela	TAB.37	Lin (cd/m²) =		$Ein = Lin \cdot \pi / \rho$	EQ.5	Ein (lx) =				Zona de Saída		$Cs = DSF$	TAB.36	Cs (m) =		$Lsi = 2Lin$	Sec.7.1.8	Lsi (cd/m²) =		$Esi = Lsi \cdot \pi / \rho$	EQ.5	Esi (lx) =		$Lsf = 5Lin$	Sec.7.1.8	Lsf (cd/m²) =		$Esf = Lsf \cdot \pi / \rho$	EQ.5	Esf (lx) =			
Comprimento	Ctot (m)																																																																																																																																																																																			
Pista	Largura (m)																																																																																																																																																																																			
	Faixas (n°)																																																																																																																																																																																			
Gabarito	Largura (m)																																																																																																																																																																																			
	Altura (m)																																																																																																																																																																																			
Portal	Largura (m)																																																																																																																																																																																			
	Altura h (m)																																																																																																																																																																																			
	Orientação																																																																																																																																																																																			
Penetração da Luz Natural	Boa	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																																																		
	Ruim	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																																																		
Visibilidade da Saída	Sim	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																																																		
	Não	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																																																		
Refletâncias	Paredes (%)																																																																																																																																																																																			
	Pista (%)																																																																																																																																																																																			
Tráfego	V. Máx. (km/h)																																																																																																																																																																																			
	Vol. (MAVD):																																																																																																																																																																																			
	Unidirecional	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																																																		
	Bidirecional	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																																																		
Cena do Emboque	Rural	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																																																		
	Urbano	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																																																		
	Montanha	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																																																		
	Planície	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																																																		
	Depressão	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																																																		
	Reto	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																																																		
Curvo	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																																																			
Volume de Tráfego		Procedimentos	Referências																																																																																																																																																																																	
<input type="checkbox"/> Leve	<input type="checkbox"/> Médio	<input type="checkbox"/> Pesado	Tabela	TAB.35																																																																																																																																																																																
Ajuste de Lth		Fluxograma	IL.185																																																																																																																																																																																	
<input type="checkbox"/> 0%	<input type="checkbox"/> 50%	<input type="checkbox"/> 100%	Tabela	TAB.36																																																																																																																																																																																
DSF(m) =																																																																																																																																																																																				
h(m) =																																																																																																																																																																																				
Ponto de Adaptação		$d = \frac{h - 1,5}{\tan 10^\circ}$	IL.187																																																																																																																																																																																	
d (m) =			EQ.66																																																																																																																																																																																	
Zona Limiar		$Cth = DSF + 20 - d$	EQ.67																																																																																																																																																																																	
Cth (m) =		Método Lseq	Sec.5.3.1																																																																																																																																																																																	
Lth (cd/m²) =		$Eth = Lth \cdot \pi / \rho$	EQ.5																																																																																																																																																																																	
Eth (lx) =																																																																																																																																																																																				
Zona de Transição		Abaco	IL.188																																																																																																																																																																																	
Ctr (m) =		$Lti = 0,4 Lth$	Sec.7.1.6																																																																																																																																																																																	
Lti (cd/m²) =		$Eti = Lti \cdot \pi / \rho$	EQ.5																																																																																																																																																																																	
Eti (lx) =		$Ltf = 3 Lin (< Lti)$	Sec.7.1.6																																																																																																																																																																																	
Ltf (cd/m²) =		$Ltf(\%) = 3Lin / Lth \times 100$	EQ.68																																																																																																																																																																																	
Ltf (% Lth) =		$Etf = Ltf \cdot \pi / \rho$	EQ.5																																																																																																																																																																																	
Etf (lx) =																																																																																																																																																																																				
Zona interior		$Cin = Ctot - (Cth + Ctr + Cs)$	EQ.69																																																																																																																																																																																	
Cin (m) =		Tabela	TAB.37																																																																																																																																																																																	
Lin (cd/m²) =		$Ein = Lin \cdot \pi / \rho$	EQ.5																																																																																																																																																																																	
Ein (lx) =																																																																																																																																																																																				
Zona de Saída		$Cs = DSF$	TAB.36																																																																																																																																																																																	
Cs (m) =		$Lsi = 2Lin$	Sec.7.1.8																																																																																																																																																																																	
Lsi (cd/m²) =		$Esi = Lsi \cdot \pi / \rho$	EQ.5																																																																																																																																																																																	
Esi (lx) =		$Lsf = 5Lin$	Sec.7.1.8																																																																																																																																																																																	
Lsf (cd/m²) =		$Esf = Lsf \cdot \pi / \rho$	EQ.5																																																																																																																																																																																	
Esf (lx) =																																																																																																																																																																																				
Vista do Emboque 		3. Estratégias Recomendadas para Composição do SAV		↑ Resultados Aplicando as Estratégias Selecionadas																																																																																																																																																																																
Período de Insolação do Portal 		<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2">Estratégia 1 Tratamento Superficial</td> </tr> <tr> <td>Descrição:</td> <td>Comentários:</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="height: 40px;"></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Estratégia 2 Elementos de Controle da Luz</td> </tr> <tr> <td>Descrição:</td> <td>Comentários:</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="height: 40px;"></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Estratégia 3 Desenho do Portal</td> </tr> <tr> <td>Descrição:</td> <td>Comentários:</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="height: 40px;"></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Estratégia 4 Túnel Falso</td> </tr> <tr> <td>Descrição:</td> <td>Comentários:</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="height: 40px;"></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Estratégia 5 Módulos Fotovoltaicos</td> </tr> <tr> <td>Descrição:</td> <td>Comentários:</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="height: 40px;"></td> </tr> </table>			Estratégia 1 Tratamento Superficial		Descrição:	Comentários:			Estratégia 2 Elementos de Controle da Luz		Descrição:	Comentários:			Estratégia 3 Desenho do Portal		Descrição:	Comentários:			Estratégia 4 Túnel Falso		Descrição:	Comentários:			Estratégia 5 Módulos Fotovoltaicos		Descrição:	Comentários:																																																																																																																																																				
Estratégia 1 Tratamento Superficial																																																																																																																																																																																				
Descrição:	Comentários:																																																																																																																																																																																			
Estratégia 2 Elementos de Controle da Luz																																																																																																																																																																																				
Descrição:	Comentários:																																																																																																																																																																																			
Estratégia 3 Desenho do Portal																																																																																																																																																																																				
Descrição:	Comentários:																																																																																																																																																																																			
Estratégia 4 Túnel Falso																																																																																																																																																																																				
Descrição:	Comentários:																																																																																																																																																																																			
Estratégia 5 Módulos Fotovoltaicos																																																																																																																																																																																				
Descrição:	Comentários:																																																																																																																																																																																			
Observações:																																																																																																																																																																																				

ILUSTRAÇÃO 191 - Ficha Resumo Modelo

Capítulo 8: **SAV - SISTEMA PARA ADAPTAÇÃO VISUAL APLICADO AOS TÚNEIS DO RODOANEL MÁRIO COVAS**

A título de comprovação da eficiência do **SAV**, os procedimentos formulados no Capítulo 7 serão aplicados nos emboques TI-3 Vista Alegre, TI-2 Tamboré e TE-3 Gramado do Trecho Oeste do Rodoanel Mário Covas, analisando o resultado e desempenho de cada estratégia, segundo os seguintes critérios:

- Redução do consumo;
- Atendimento às exigências de iluminação;
- Autonomia da iluminação diurna proporcionada pelo **SAV** em relação ao sistema artificial.

O Capítulo 5 apresentou o cálculo pelo **Método L_{seq}** para todos os emboques, cujos valores serviram de insumo para as decisões de projeto, orientando na escolha preliminar das estratégias a serem aplicadas. Em alguns casos, o cálculo foi refeito, introduzindo a influência das alterações adotadas. A grandeza utilizada no cálculo é a luminância, mas acrescentou-se a iluminância correspondente em todas as zonas de iluminação na Ficha Resumo. Além de facilitar a percepção dos resultados pela maior familiaridade com esta grandeza, as simulações através do Radiance / Ecotect fornecem o resultado numérico apenas em iluminância, na opção grade de pontos.

Nos casos tomados a seguir para aplicação das estratégias, a Ficha Resumo está inserida na análise dos resultados, sintetizando todo o processo envolvido até a concepção e avaliação do **SAV**.

8.1 ESTRATÉGIAS 1 E 2: TI-3 VISTA ALEGRE

Para a latitude de São Paulo, a orientação Sul favorece a utilização das Estratégias 1 e 2. Ambas serão aplicadas no emboque TI-3 Vista Alegre. No período em que foram efetuadas as medições, as superfícies do entorno do portal no TI-3 estavam sob sombra, resultando em uma diminuição acima de 40% no nível de iluminação necessário na Zona Limiar, comparado aos emboques da pista externa TE-3 e TE-2. A Estratégia 1 diminuirá o potencial das fontes de ofuscamento, enquanto a Estratégia 2 possibilitará manter sob sombra, durante todo o ano, as superfícies nas imediações do portal.

8.1.1 ESTRATÉGIA 1: TRATAMENTO SUPERFICIAL (PISTA)

As fontes de ofuscamento mais significativas neste emboque estão na pista e na parcela de céu visível. Alterando-se apenas a refletância da pista de 30% para 15%, correspondendo à substituição do pavimento de concreto por asfalto, pode-se ter uma idéia de sua influência na luminância de Véu Equivalente L_{seq} e, conseqüentemente, na luminância na Zona Limiar L_{th} .

Os resultados do cálculo pelo **Método L_{seq}** , aplicando a Estratégia 1 apenas na pista, estão ilustrados a seguir. Os valores na cor branca (IL.192) e em itálico (TAB.39) referem-se às alterações decorrentes da Estratégia 1.

A refletância de 15% foi aplicada apenas na pista exterior, mantendo-se o pavimento de concreto no interior do túnel, cuja refletância de 30% está indicada na TAB.39. Portanto, a substituição proposta deve corresponder ao trecho exterior na Zona de Aproximação, pois no interior do túnel a situação se inverte, e o desempenho da iluminação passa a ser diretamente proporcional à refletância das superfícies.

O tratamento superficial também pode ser aplicado ao entorno do portal. Entretanto, tal procedimento é mais apropriado para a Estratégia 2, que além da refletância, controla a incidência da luz solar direta sobre as fontes de ofuscamento.

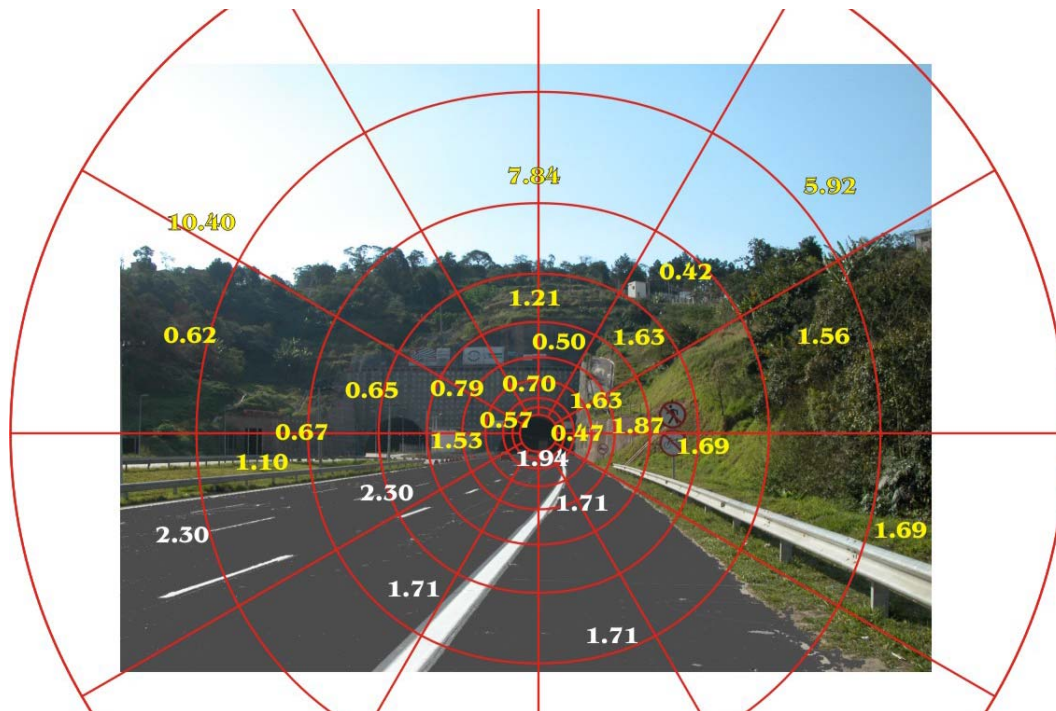


ILUSTRAÇÃO 192 – Estratégia 1. TI-3 Vista Alegre: Método L_{seq}

TABELA 39 – Estratégia 1. TI-3 Vista Alegre: Método L_{seq}

Túnel: 3 - Régis Bittencourt

Extensão: 450m

Emboque: Vista Alegre (TI-3)

data: 24/7/2003

Orientação: 0°S

hora: 14:45 às 15:20

ANÉIS										
Seções	A	B	C	D	E	F	G	H	I	SOMA
1	0,70	0,70	0,70	0,70	0,50	1,21	7,84	7,84	NÃO	20,19
2	0,50	0,70	0,79	1,44	1,63	1,63	1,16	4,61	5,92	18,38
3	0,25	0,47	1,54	1,87	1,72	1,69	1,60	1,56	1,70	12,40
4	0,25	0,47	1,50	1,87	1,77	1,69	1,69	1,60	1,60	12,44
5	0,50	1,09	1,94	1,71	1,71	1,71	1,65	1,65	1,65	13,61
6	1,09	1,94	1,94	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	NÃO	13,52
7	1,09	1,94	1,94	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	NÃO	13,52
8	0,60	1,09	1,94	1,94	1,94	1,80	1,71	1,71	1,71	14,44
9	0,25	0,57	0,57	1,11	1,54	1,50	1,52	1,55	1,58	10,19
10	0,25	0,57	0,57	0,57	0,79	0,70	0,65	0,65	3,55	8,30
11	0,50	0,70	0,70	0,70	0,65	1,10	1,34	4,61	10,40	20,70
12	0,70	0,70	0,70	0,70	0,50	1,21	7,84	7,84	NÃO	20,19
ΣLi (kcd/m ²)										177,88
Lseq (cd/m ²)										91
Lth (cd/m ²)										129
ρ (pavimento)										0,30
Eth (lx)										1348

OBS: Pista sob Sol direto. Plano do portal sob sombra

8.1.2 ESTRATÉGIA 2: CONTROLE DA LUZ (GRADE TIPO CAIXA-DE-OVO E PAISAGISMO)

Os pontos em sombra no entorno do portal influenciaram substancialmente a iluminação no interior do túnel, o que pode ser deduzido por comparação com os emboques da Pista Externa direcionados para Nordeste, sob radiação solar direta no momento das medições. Entretanto, a partir do equinócio de setembro, o Sol passa a incidir nas imediações do portal, o que irá incrementar o ofuscamento dessas superfícies. Portanto, é fundamental garantir o sombreamento das possíveis fontes de ofuscamento durante o ano todo.

Pelo traçado de máscaras, um dispositivo configurando uma grade vertical tipo caixa-de-ovo, com ângulo de sombra $\beta d = \beta e = 65^\circ$, é suficiente para impedir a penetração solar no plano do portal. Deve-se precaver quanto à possibilidade de as próprias aletas da grade formarem novas fontes de ofuscamento. Devido ao ponto de vista do motorista, esta ocorrência é mais provável nas faces das aletas orientadas para Leste, e o próprio relevo natural já protege o emboque da insolação proveniente dessa orientação. As aletas horizontais abaixo do ponto de vista do motorista também poderiam configurar fontes de ofuscamento, mas nesse emboque, com orientação $0^\circ S$, os brises verticais são suficientes para barrar a penetração solar. Entretanto, o plano do portal possui uma leve inclinação de 6° com a perpendicular à pista no sentido do túnel, e as aletas horizontais passam a ser necessárias, quando o Sol se aproxima do Zênite. Essas aletas poderiam ter menor profundidade que as aletas verticais, porém adotou-se a mesma profundidade para ambas, pois sua função no dispositivo não é apenas obstruir a luz solar direta, mas também diminuir a transmissão da luz difusa.

Para fazer uma correspondência do desempenho do dispositivo com as medições, selecionou-se o instante em que ocorresse a maior insolação do portal com a mesma altura solar do momento das medições. Esta ocorrência verifica-se por volta das 16:30h do solstício de verão, com altura solar h de 28° , adotada como parâmetro para estimar a luminância no plano do portal (IL.193a).

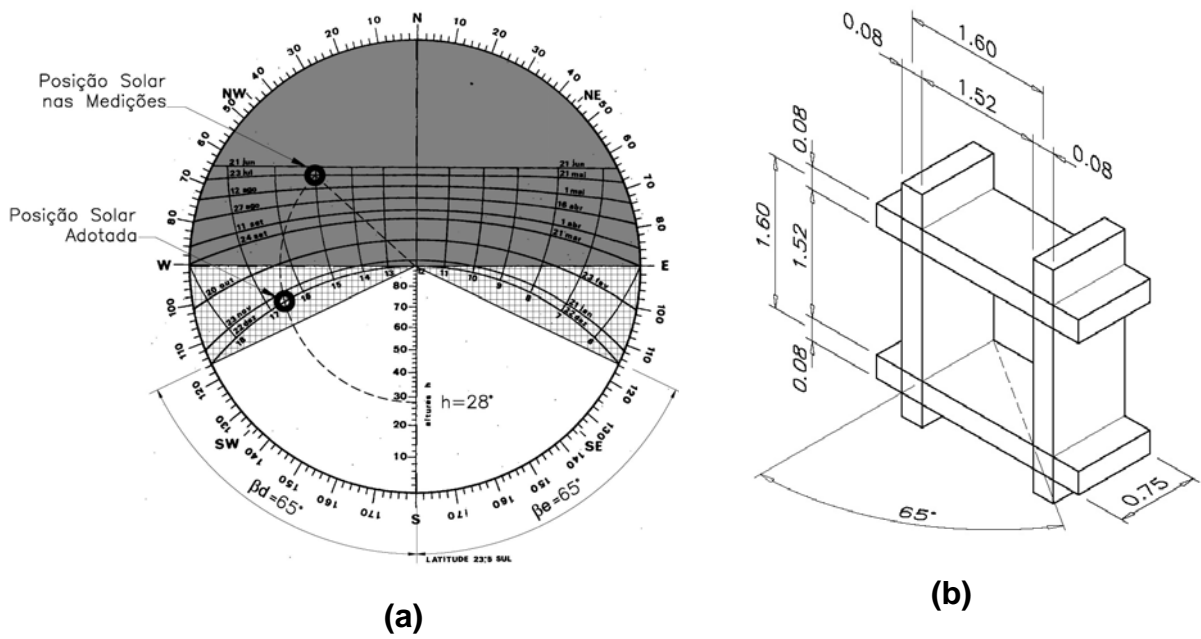


ILUSTRAÇÃO 193 – Estratégia 2: (a) Traçado de Máscaras ; (b) Dimensões do Módulo

As dimensões do módulo são 1,60 x 1,60m, correspondendo ao distanciamento predominante entre os tirantes do muro de contenção do emboque⁵³. A espessura das aletas é 0,08m e a profundidade é 0,75m, produzindo o ângulo de sombra 65°(IL.193b). A grade que compõe o dispositivo deverá cobrir toda a área do muro de contenção inferior no plano do portal, abrangendo uma área de 1.224,00 m² (IL.194). Entre a grade e o muro de contenção deverá ser previsto um distanciamento para manutenção.

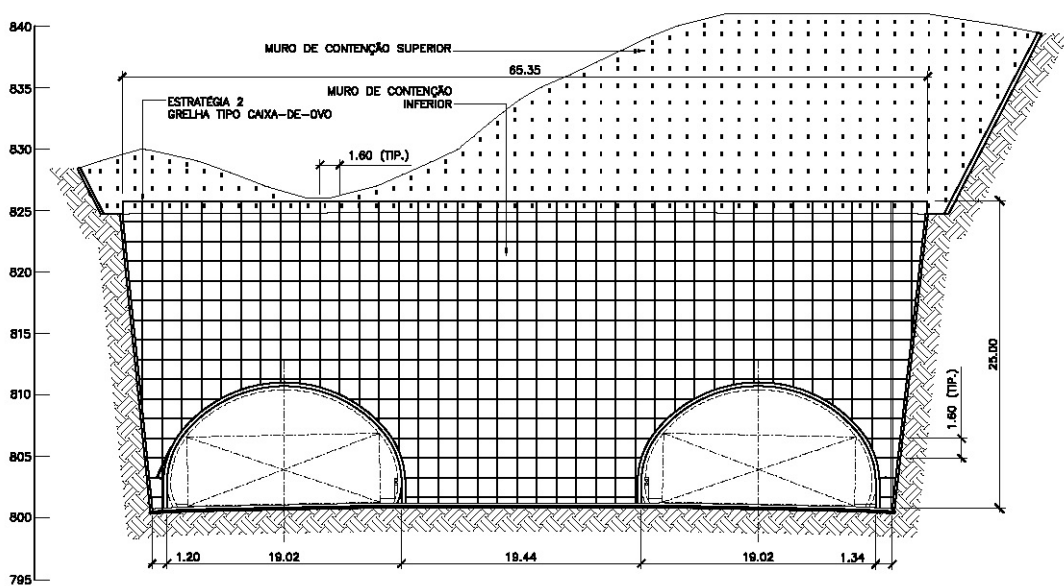


ILUSTRAÇÃO 194 – Estratégia 2. TI-3 Vista Alegre: Elevação Frontal

⁵³ Ver Anexo A.

A luminância média proveniente da região onde será aplicado o dispositivo foi estimada a partir de duas componentes modulares. A análise foi aplicada a um módulo da tela e generalizada para todo o dispositivo, por isso a nomenclatura componente modular.

- **Componente Modular 1:** luminância proveniente da luz solar direta e difusa que reflete na borda das aletas devido a sua espessura e, portanto, não atravessa o dispositivo;
- **Componente Modular 2:** luminância proveniente da luz solar difusa que atravessa o dispositivo, atinge o plano do portal e retorna na direção do observador, passando novamente pelo dispositivo.

Para obter a **Componente Modular 1**, aplica-se a equação (70):

$$CM_1 = \frac{E_p \rho K_1}{\pi} \quad [\text{kcd/m}^2] \quad (70)$$

Onde:

CM_1 Componente Modular 1 (kcd/m²);

E_p Iluminância total (direta e difusa) no plano do portal (klx);

ρ Refletância das aletas do dispositivo (%);

K_1 Coeficiente da parcela opaca do módulo do dispositivo (%).

Em São Paulo, às 16:30h do solstício de verão, a iluminância total no plano vertical Sul desobstruído é 27,15 klx. Adotou-se para as aletas a refletância de 10%. Subtraindo-se da área total do módulo (1,60 x 1,60 m = 2,56 m²) a área da abertura (1,52 x 1,52m = 2,31m²) tem-se a parcela opaca do módulo (0,25 m²). A divisão da parcela opaca (0,25 m²) pela área total do módulo (2,56 m²) fornece o coeficiente K_1 (9,8%).

Aplicando a equação (70), tem-se:

$$CM_1 = \frac{27,15 \times 10\% \times 9,8\%}{\pi} = 0,085 \text{ kcd} / \text{m}^2$$

A **Componente Modular 2** é obtida através da transmissão da luz difusa pelo dispositivo. Este cálculo pode ser simplificado, utilizando o ábaco do Fator de Transmissão da Luz Difusa proposto por Lynes (1968, p.136). Aplicando-se as dimensões do módulo da Estratégia 2 na fórmula do ábaco, tem-se:

$$\frac{(h+l)t}{hl} = \frac{(1,52 + 1,52)0,75}{1,52 \times 1,52} = 0,99$$

Transportando-se este valor no eixo das abscissas até encontrar a refletância $\rho=0.1$, tem-se o Fator de Transmissão da Luz Difusa no eixo das ordenadas, correspondente a aproximadamente 0,45 (IL.195).

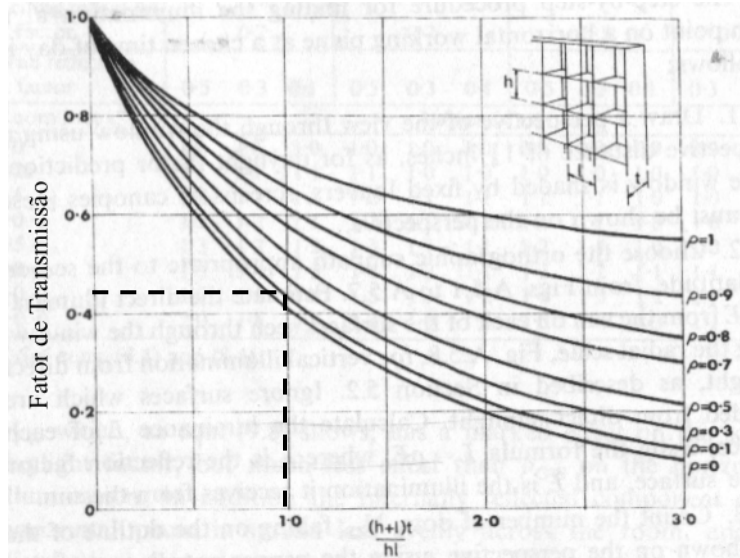


ILUSTRAÇÃO 195 - Estratégia 2: Fator de Transmissão da Luz Difusa
FONTE - LYNES, 1968, p.136, tradução nossa

Nesta componente, a luz atravessa duas vezes o dispositivo: a primeira até atingir o plano do portal; a segunda ao retornar por reflexão na direção do motorista. Portanto, este fator deve ser multiplicado duas vezes pela iluminância difusa incidente no plano do portal, além de considerar a influência da refletância do plano do portal atrás do dispositivo, conforme a equação (71):

$$CM_2 = \frac{E_{dp} F_{TLD}^2 \rho_p (1 - K_1)^2}{\pi} \quad [\text{kcd/m}^2] \quad (71)$$

Onde:

CM_2 Componente Modular 2 (kcd/m²);

E_{dp} Iluminância difusa no plano do portal (klx);

F_{TLD} Fator de Transmissão da Luz Difusa (%);

ρ_p Refletância do plano do portal (%);

K_1 Coeficiente da parcela opaca do módulo do dispositivo (%).

O coeficiente K_1 é similar à parcela opaca do caixilho utilizada no método FLD, a qual é descontada da área total da abertura e, portanto, a subtração $(1-K_1)$ corresponde ao fator de caixilho do método FLD. Pelo mesmo motivo descrito para

Fator de Transmissão da Luz Difusa F_{TLD} , a subtração $(1-K_1)$ necessita ser multiplicada duas vezes, por isso a potência 2, em ambos, na equação (71).

A iluminância difusa de referência em São Paulo⁵⁴, às 16:30h do solstício de verão, no plano vertical Sul desobstruído é 7,95 klx. Portanto, tem-se:

$$E_{dp} \quad 7,95 \text{ klx};$$

$$F_{TLD} \quad 45\%;$$

$$\rho_p \quad 10 \%;$$

$$(1-K_1) \quad 90,2\%.$$

$$CM_2 = \frac{7,95 \times 0,45^2 \times 0,10 \times 0,902^2}{\pi} = 0,042 \text{ kcd} / \text{m}^2$$

A Componente Modular Total CM_T será:

$$CM_T = CM_1 + CM_2$$

$$CM_T = 0,085 + 0,042$$

$$CM_T = 0,127 \text{ kcd/m}^2$$

O método de cálculo desenvolvido para avaliar o desempenho da Estratégia 2 utilizou procedimentos analíticos, normalmente adotados em espaços interiores, sendo necessárias algumas adaptações e aproximações. Desprezou-se a parcela de luz difusa que atua nas aletas do próprio dispositivo e retorna na direção do observador, como também a parcela de luz direta que incide nas aletas e penetra no dispositivo até encontrar o plano do portal. Estes fatores deverão incrementar a Componente Modular Total, mas considerou-se que incorporar tais aspectos aumentaria sobremaneira a complexidade do cálculo, sem significativa alteração no resultado.

Para verificar essa premissa e possíveis distorções do resultado no método aplicado, foi feita uma verificação comparativa com simulações computacionais através do aplicativo Radiance, adotando os mesmos parâmetros do cálculo analítico. Os resultados estão indicados na IL.196.

Os valores máximos estiveram próximos de 150 cd/m², concentrando-se na faixa mais alta do dispositivo, e os valores mínimos, em torno de 30 cd/m², predominam nas regiões laterais inferiores da Pista Externa (lado esquerdo da ilustração). Na região central, entre as duas bocas dos túneis, as luminâncias mantiveram-se entre 100 e 150 cd/m², mostrando a influência dos muros de

⁵⁴ Calculado através do aplicativo DLN (SCARAZZATO, 1997).

contenção laterais na diminuição da luminância do plano do portal, principalmente quando estes interferem na luz solar direta.

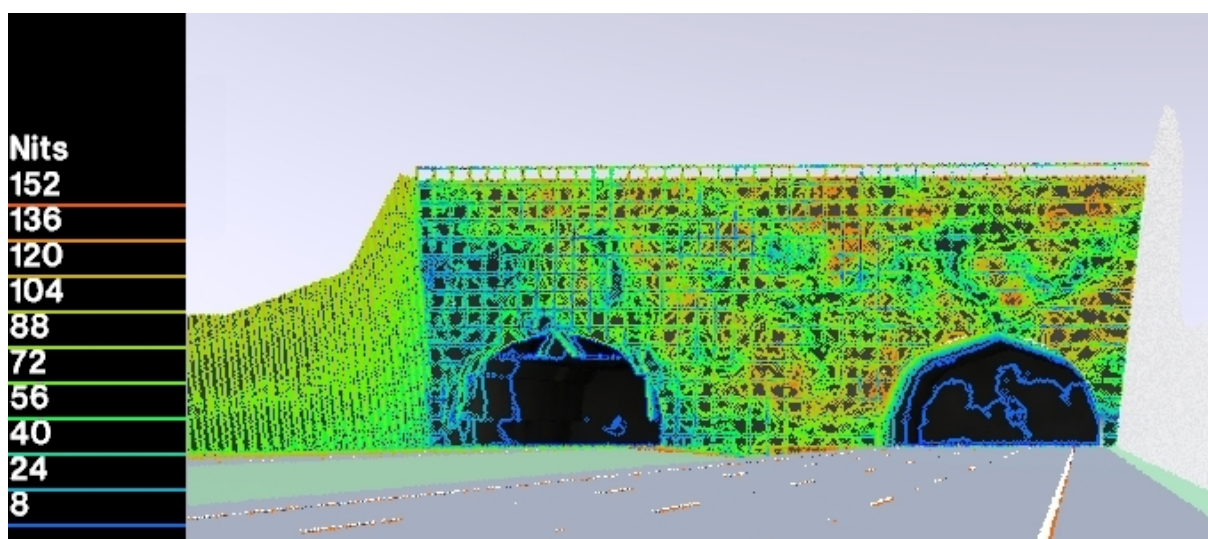


ILUSTRAÇÃO 196 – Estratègia 2. TI-3 Vista Alegre: Simulação Radiance (Isolinhas)

A Componente Modular Total obtida analiticamente $CM_T = 127cd/m^2$ aproximou-se do valor médio da simulação na faixa superior do dispositivo. Por não considerar a influência das contenções laterais, o método analítico se mostrou adequado para estimar o desempenho do dispositivo, apresentando boa precisão através de um procedimento de cálculo simples.

O paisagismo também é uma boa opção para reduzir o potencial de ofuscamento das superfícies, além de favorecer a integração com a paisagem. Para exemplificar esta alternativa dentro da Estratègia 2, adotou-se a luminância $0,62 kcd/m^2$ como valor máximo na vegetação dentro do campo visual do motorista. Este valor corresponde à medição de algumas regiões com vegetação mais densa e, portanto, pode ser atingido, substituindo as áreas com forrações ralas, que chegam a alcançar $1,87 kcd/m^2$, por vegetações de maior porte⁵⁵.

Os recursos do paisagismo poderão ainda ser agregados à própria grade tipo caixa-de-ovo, a qual poderá fornecer o suporte necessário para a vegetação e configurar uma solução integrada das duas alternativas.

O Método L_{seq} foi aplicado novamente, incorporando as duas estratègias. A Estratègia 1 permaneceu representada na cor branca e em itálico, conforme já apresentado. As alterações decorrentes apenas da Estratègia 2 estão em verde claro (IL. 197) e em itálico sobre fundo cinza (TAB.40).

⁵⁵ Medições realizadas pelo autor nos emboques dos túneis do Rodoanel Mário Covas.

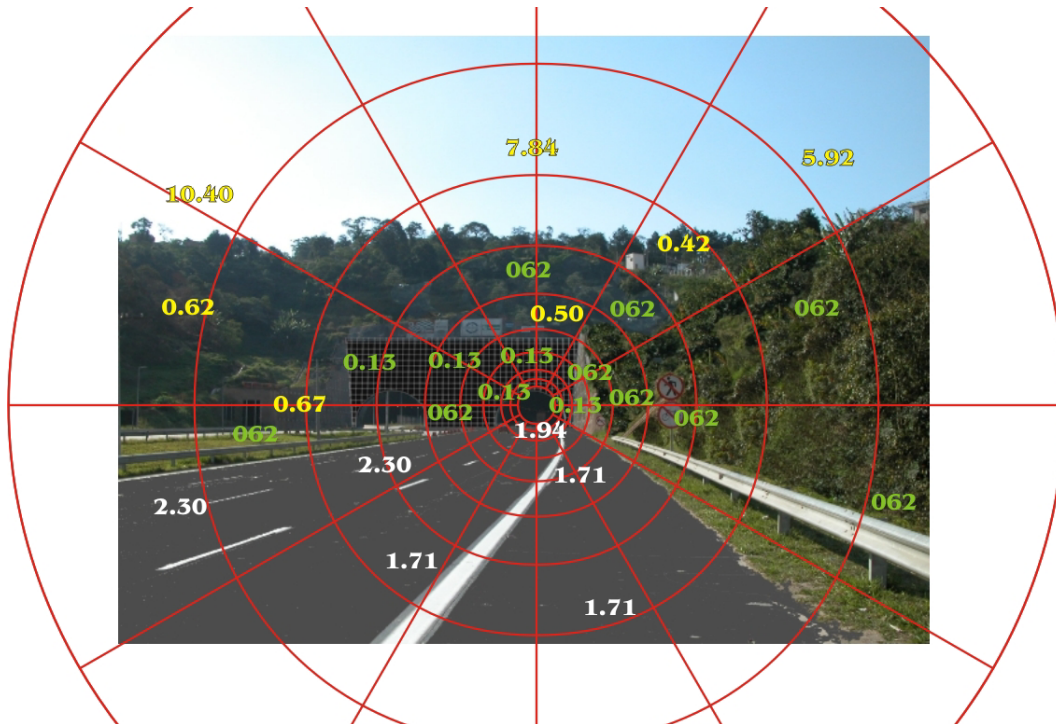


ILUSTRAÇÃO 197 – Estratégias 1 e 2. TI-3 Vista Alegre: Método L_{seq}

TABELA 40 – Estratégias 1 e 2. TI-3 Vista Alegre: Método L_{seq}

Túnel: 3 - Régis Bittencourt

Extensão: 450m

Emboque: Vista Alegre (TI-3)

data: 24/7/2003

Orientação: 0°S

hora: 14:45 às 15:20

Seções	ANÉIS									SOMA
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	0,13	0,13	0,13	0,31	0,50	0,62	7,84	7,84	NÃO	17,50
2	0,13	0,13	0,13	0,62	0,62	0,62	1,16	4,61	5,92	13,94
3	0,13	0,13	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	4,60
4	0,13	0,13	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	4,60
5	0,13	1,09	1,94	1,71	1,71	1,71	1,65	1,65	1,65	13,24
6	1,09	1,94	1,94	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	NÃO	13,52
7	1,09	1,94	1,94	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	NÃO	13,52
8	0,13	1,09	1,94	1,94	1,94	1,80	1,71	1,71	1,71	13,97
9	0,13	0,13	0,13	1,11	1,54	1,50	1,52	1,55	1,58	9,19
10	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,49	0,65	0,62	1,92
11	0,13	0,13	0,13	0,13	0,35	0,62	0,70	4,61	10,40	17,20
12	0,13	13,00	0,13	0,13	0,50	0,62	7,84	7,84	NÃO	30,19
ΣL_i (kcd/m ²)										153,39
OBS: Pista sob Sol direto. Plano do portal sob sombra										
Lseq (cd/m ²)										79
Lth (cd/m ²)										111
ρ (pavimento)										0,30
Eth (lx)										1162

8.1.3 ESTRATÉGIAS 1 E 2: ANÁLISE DOS RESULTADOS

A luminância de Véu Equivalente L_{seq} , a luminância na Zona Limiar L_{th} e a iluminância na Zona Limiar E_{th} tiveram a seguinte redução com a aplicação das Estratégias 1 e 2 (TAB.41):

TABELA 41 – Estratégias 1 e 2. TI-3 Vista Alegre: Resultados

	L_{seq} (cd/m ²)	L_{th} (cd/m ²)	E_{th} (lx)	%
Valores Originais	123	174	1822	100%
Estratégia 1	91	129	1348	74%
Estratégias 1 e 2	79	111	1162	64%

Na Estratégia 1, os resultados correspondem a 74% dos valores originais. Pela simplicidade da solução, principalmente se implantada na fase de projeto, a redução de 26% é significativa, pois implicaria apenas em alterar o revestimento superficial da pista ou adicionar um pigmento no concreto para reduzir sua refletância.

Embora com menor impacto que a Estratégia 1, a Estratégia 2 causou uma redução nas luminâncias da ordem de 10%, resultando em aproximadamente 64% do valor original pela soma da influência das duas estratégias. A Estratégia 2 também garantirá o sombreamento no entorno do emboque durante todo o ano, aumentando sua eficiência, pois, no solstício de verão, os níveis de iluminação necessários na Zona Limiar dos emboques orientados para Sul poderão se aproximar dos calculados para os emboques com orientação Norte.



(a)



(b)

ILUSTRAÇÃO 198 – TI-3 Vista Alegre: (a) Existente; (b) Estratégias 1 e 2

A Zona de Transição também foi afetada, uma vez que há uma correspondência direta entre L_{th} e a luminância inicial da Zona de Transição L_{ti} . Como a luminância final da Zona de Transição L_{tf} é fixa, relacionada apenas à luminância da Zona Interior L_{in} , a faixa de luminâncias a ser vencida dentro da Zona de Transição diminuiu com o menor valor de L_{th} , implicando na redução de sua extensão.

Aplicando-se o ábaco CIE, o comprimento original da Zona de Transição C_{tr} , na velocidade de 100 km/h, passou de 42,00 m (linha pontilhada) para 21,00 m com a Estratégia 1 (linha traço-ponto) e para 18,00 m com as Estratégias 1 e 2 (linha tracejada), correspondente à relação percentual entre L_{tf} e L_{th} de 17%, 23% e 27% (IL.199).

Em consequência da redução da Zona de Transição, ampliou-se a Zona Interior, onde está o menor nível de iluminação em todo o túnel.

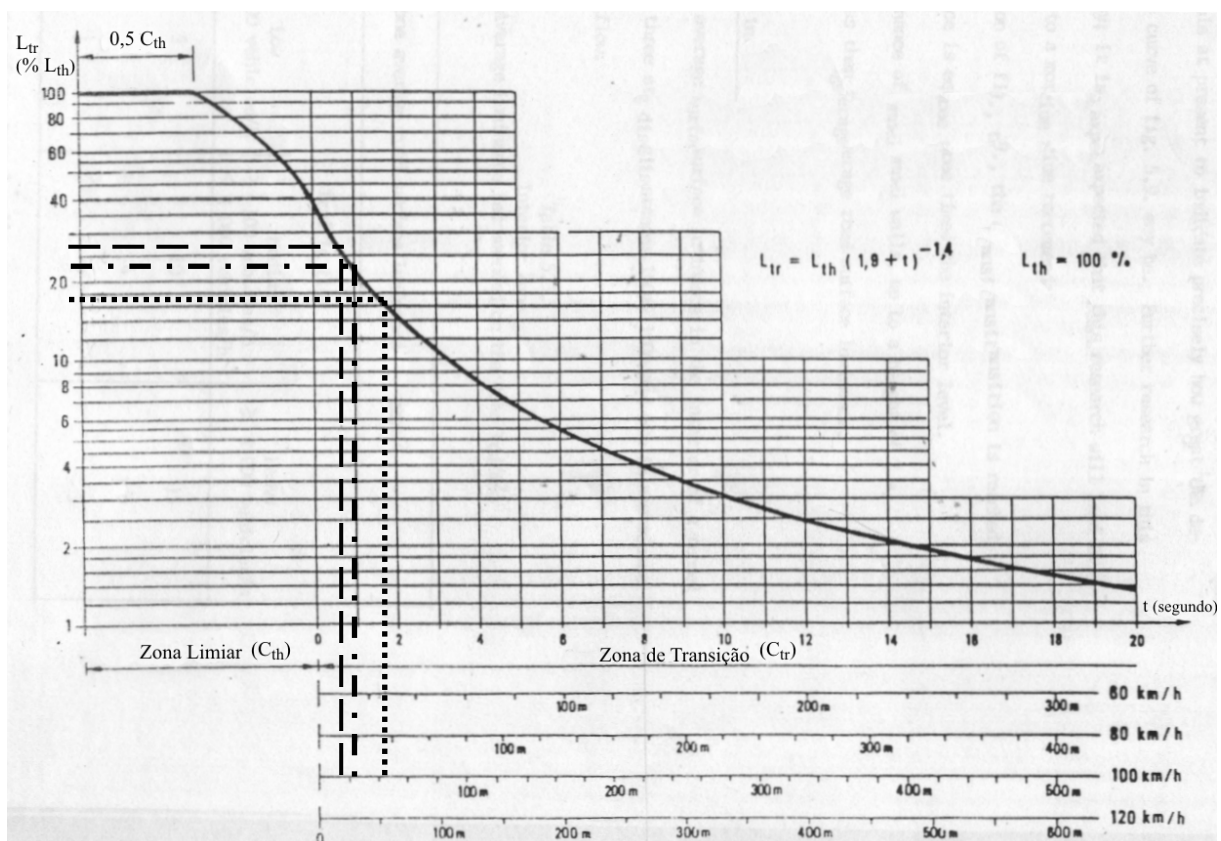


ILUSTRAÇÃO 199 – Estratégias 1 e 2. TI-3 V. Alegre: Extensão da Z. Transição

No período crítico, quando ocorre a insolação nas imediações do portal, o SAV resultante da aplicação das duas estratégias possibilitou uma redução de 36% na luminância da Zona Limiar L_{th} , e ainda refletiu nas demais zonas, com

implicações na eficiência energética e no conforto visual do motorista, por reduzir a faixa em que deverá ser processada a adaptação visual.


TABELA 42 – Estratégias 1 e 2. TI-3 Vista Alegre: Ficha Resumo

Obra: Rodoanel Mário Covas		Túnel: 3 Régis Bittencourt		Data: 24/7/2003	
Local: São Paulo		Latitude: 23°37'		Emboque: Vista Alegre (TI-3)	
				Horário: 14:45/15:20	

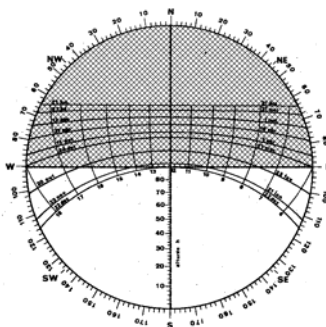
1. Dados do Túnel			2. Cálculos e Parâmetros		
Comprimento	Ctot (m)	450,00	Volume de Tráfego		Procedimentos
Pista	Largura (m)	14,40	<input type="checkbox"/> Leve	<input type="checkbox"/> Médio	<input checked="" type="checkbox"/> Pesado
	Faixas (n°)	4	Tabela		TAB.35
Gabarito	Largura (m)	15,60	Ajuste de Lth		Fluxograma
	Altura (m)	5,50	<input type="checkbox"/> 0%	<input type="checkbox"/> 50%	<input checked="" type="checkbox"/> 100%
Portal	Largura (m)	18,42	DSF (m) =	160,00	Tabela
	Altura h (m)	10,55	h (m) =	10,55	TAB.36
	Orientação	0°SO	Ponto de Adaptação	$d = \frac{h-1,5}{\tan 10^\circ}$	IL.187
Penetração da Luz Natural	Boa	<input checked="" type="checkbox"/>	d (m) =	51,33	EQ.66
	Ruim	<input type="checkbox"/>	Zona Limiar	Cth (m) =	128,67
Visibilidade da Saída	Sim	<input checked="" type="checkbox"/>	Lth (cd/m²) =	174	Método Lseq
	Não	<input type="checkbox"/>	Eth (lx) =	1822	EQ.5
Refletâncias	Paredes (%)	20	Zona de Transição	Ctr (m) =	42,00
	Pista (%)	30	Lti (cd/m²) =	70	$Lti=0,4 Lth$
Tráfego	V. Máx. (km/h)	100	Eti (lx) =	729	$Eti=Lti \cdot \pi / \rho$
	Vol. (MAVD):	72665	Ltf (cd/m²) =	30	$Ltf=3 Lin (< Lti)$
	Unidirecional	<input checked="" type="checkbox"/>	Ltf (% Lth) =	17%	$Ltf\% \phi = 3 Lin / Lth \times 100$
	Bidirecional	<input type="checkbox"/>	Etf (lx) =	314	$Etf=Ltf \cdot \pi / \rho$
Cena do Emboque	Rural	<input type="checkbox"/>	Zona interior	Cin (m) =	119,33
	Urbano	<input checked="" type="checkbox"/>	Lin (cd/m²) =	10	Tabela
	Montanha	<input checked="" type="checkbox"/>	Ein (lx) =	105	$Ein=Lin \cdot \pi / \rho$
	Planície	<input type="checkbox"/>	Zona de Saída	Cs (m) =	160,00
	Depressão	<input type="checkbox"/>	Lsi (cd/m²) =	20	$Lsi=2Lin$
	Reto	<input checked="" type="checkbox"/>	Esi (lx) =	209	$Esi=Lsi \cdot \pi / \rho$
	Curvo	<input type="checkbox"/>	Lsf (cd/m²) =	50	$Lsf=5Lin$
			Esf (lx) =	524	$Esf=Lsf \cdot \pi / \rho$

3. Estratégias Recomendadas para Composição do SAV	
<input checked="" type="checkbox"/> Estratégia 1	Tratamento Superficial
Descrição:	Comentários:
Refletância da Pista: Alterar de 30% para 15%.	Redução de 26% em Lth; Redução de 50% em Ctr Baixo custo.
<input checked="" type="checkbox"/> Estratégia 2	Elementos de Controle da Luz
Descrição:	Comentários:
Entorno do Portal: dispositivo tipo caixa de ovo, 1,60x1,60m, K1=9,8%, ρ=10%; Paisagismo: Adensar vegetação.	Redução de 10% em Lth; Mantém sombreado o plano do portal; Redução de 7% em Ctr; Preservação do meio-ambiente.
<input type="checkbox"/> Estratégia 3	Desenho do Portal
Descrição:	Comentários:
<input type="checkbox"/> Estratégia 4	Túnel Falso
Descrição:	Comentários:
<input type="checkbox"/> Estratégia 5	Módulos Fotovoltaicos
Descrição:	Comentários:

Vista do Emboque



Período de Insolação do Portal



Observações:
a) Insolação: Solstício de Verão
b) Imediações do portal sob sombra durante as medições

Resultados Aplicando as Estratégias Selecionadas ↑

Notas:
 1. SAV: Sistema para Adaptação Visual
 2. DSF: Distância Segura de Frenagem
 3. MAVD: Média Anual de Veículos/Dia

8.2 ESTRATÉGIA 3 (DESENHO DO PORTAL): TI-2 TAMBORÉ

Pelo estudo de insolação (IL.200), observa-se que o plano do portal do emboque TI-2 Tamboré fica exposto à radiação solar direta, no período da tarde, durante todo o ano. O tempo de exposição é variável, aumentando do solstício de inverno para o solstício de verão. O ângulo de sombra do lado direito (β_d) é 25° , dificultando a adoção de dispositivos de controle de luz incorporados à Estratégia 2, pela necessidade de aletas verticais com pequeno distanciamento. Assim, a redução da refletância da pista (Estratégia 1) e o adensamento do paisagismo (Estratégia 2) devem seguir os mesmos procedimentos adotados no emboque TI-3 Vista Alegre, com resultados similares, mas a grade tipo caixa-de-ovo (Estratégia 2) será substituída pela Estratégia 3.

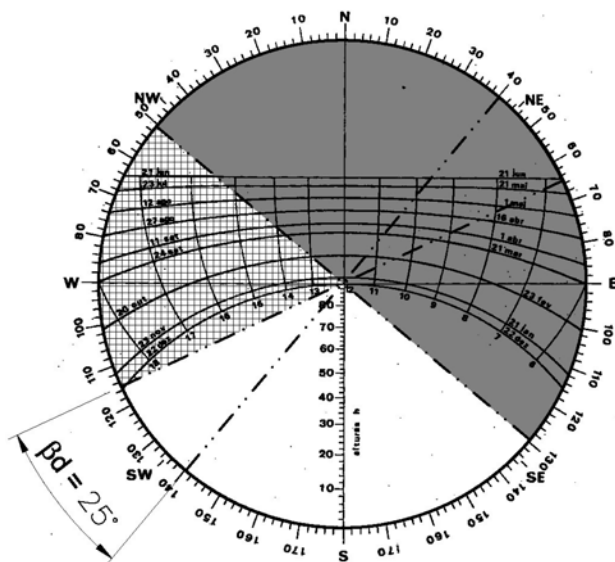


ILUSTRAÇÃO 200 – Estratégias 3. TI-2 Tamboré: Traçado de Máscaras

A maior exposição do plano do portal à radiação solar no período da tarde beneficia o aproveitamento da luz por reflexão. A orientação do portal, próxima à diagonal dos planos verticais Oeste e Sul, são características que podem ser aproveitadas na concepção do dispositivo.

O projeto da Estratégia 3 partiu dessas condicionantes, definindo duas aberturas zenitais ortogonais simétricas, separadas por um plano vertical alinhado com o eixo de simetria. As aberturas foram direcionadas com pequena inclinação (5°) em relação aos planos verticais Sul e Oeste, definindo 45° com o plano do portal. Formam assim um triângulo isósceles, em planta, posicionado acima da altura

do gabarito na boca do túnel, por onde a luz natural penetra. A metade de um octógono regular contorna esse triângulo, configurando um fechamento que avança 22,00m sobre a rodovia aberta, e protege as áreas do emboque do túnel abaixo da elevação 6,00; admitindo a pista como a referência de nível 0,00.

O perímetro do octógono possui duas faces alinhadas com as aberturas zenitais, como um chanfro que facilita a penetração da luz. Na orientação Sul, este chanfro favorece a iluminação, pois aproveita a luz difusa da abóbada celeste, mas na orientação Oeste, a iluminação é prejudicada pela penetração da luz solar direta. Como as regiões do emboque de saída da Pista Externa também interferem significativamente no ofuscamento do emboque de entrada da Pista Interna, optou-se por repetir o dispositivo no emboque de saída da Pista Externa. O conjunto formado pelos dois módulos complementa a obstrução solar necessária, e também melhora as condições de iluminação no emboque de saída da Pista Externa. No encontro dos módulos, a área aberta resultante dos dois chanfros é protegida por uma pérgula de lâminas verticais paralelas ao portal, um elemento auxiliar para obstruir parte da penetração solar em uma região vulnerável do dispositivo.

A cobertura avança dois metros do alinhamento das aberturas zenitais, formando um beiral contínuo em toda sua extensão. Na abertura zenital Sul foram introduzidos *brises* verticais com 65° de ângulo de sombra e, na abertura zenital Oeste, defletores de luz formados por lâminas paralelas, com distanciamento variável, trabalham em conjunto com o avanço da cobertura, impedindo a penetração solar e, ao mesmo tempo, refletindo esta luz para o interior⁵⁶.

O fechamento octogonal possui tratamento diferenciado das superfícies. A parte interior, voltada para as aberturas, é revestida de material claro com refletância de 50%, funcionando como prateleira-de-luz, e as áreas exteriores são de cor escura, com refletância de 2%. A borda inferior arredondada diminui gradualmente a luminância da face externa, enquanto que, na face interna, direciona a luz para o forro do dispositivo (IL.201 e 202).

⁵⁶ Os defletores foram adaptados do Dispositivo Zenital com Seleção Angular apresentado por Moore (1991). Ver seções 3.6.1 e 3.6.2.

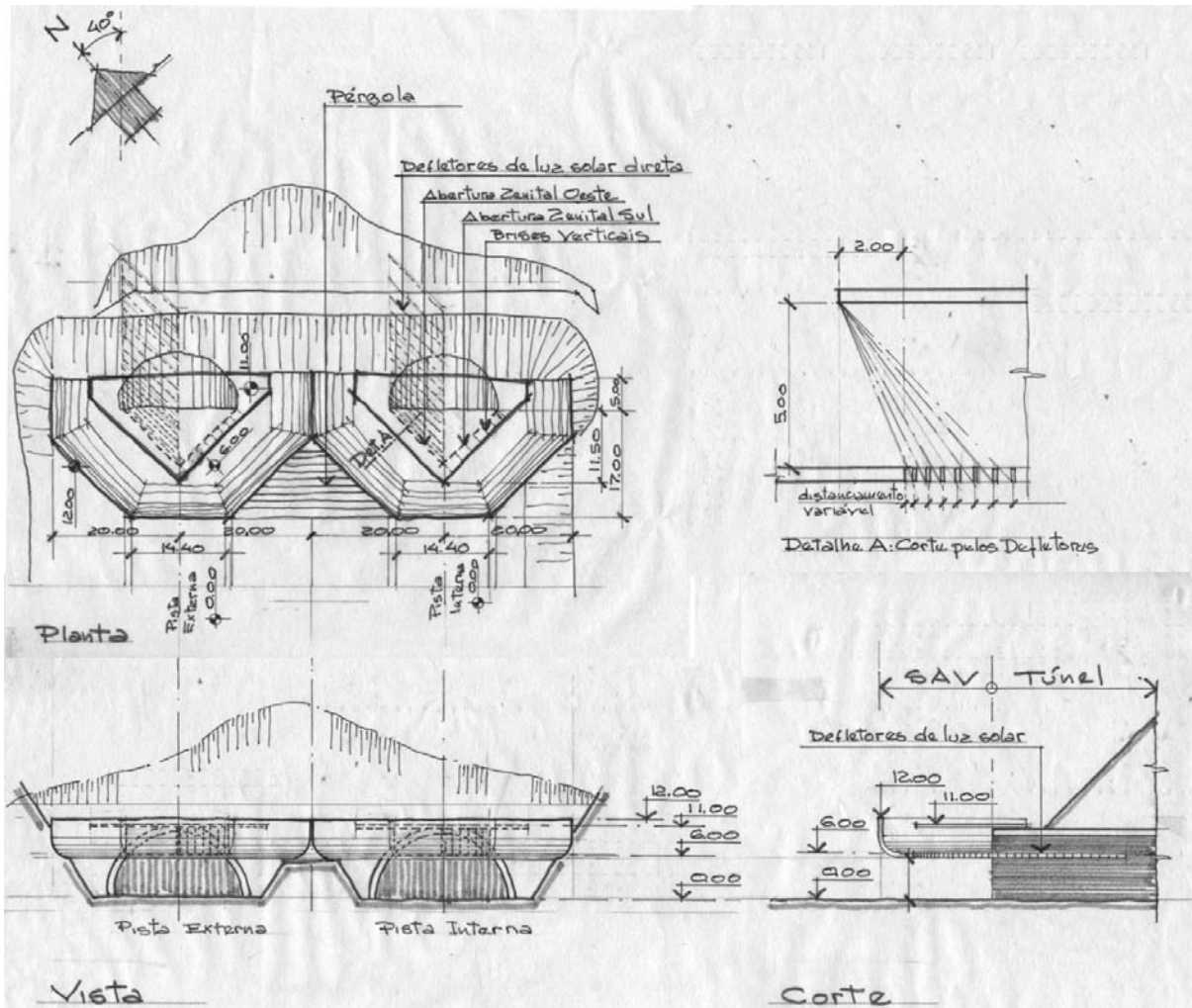


ILUSTRAÇÃO 201 – Estratégia 3. TI-2 Tamboré: Planta, Vista, Corte e Detalhe

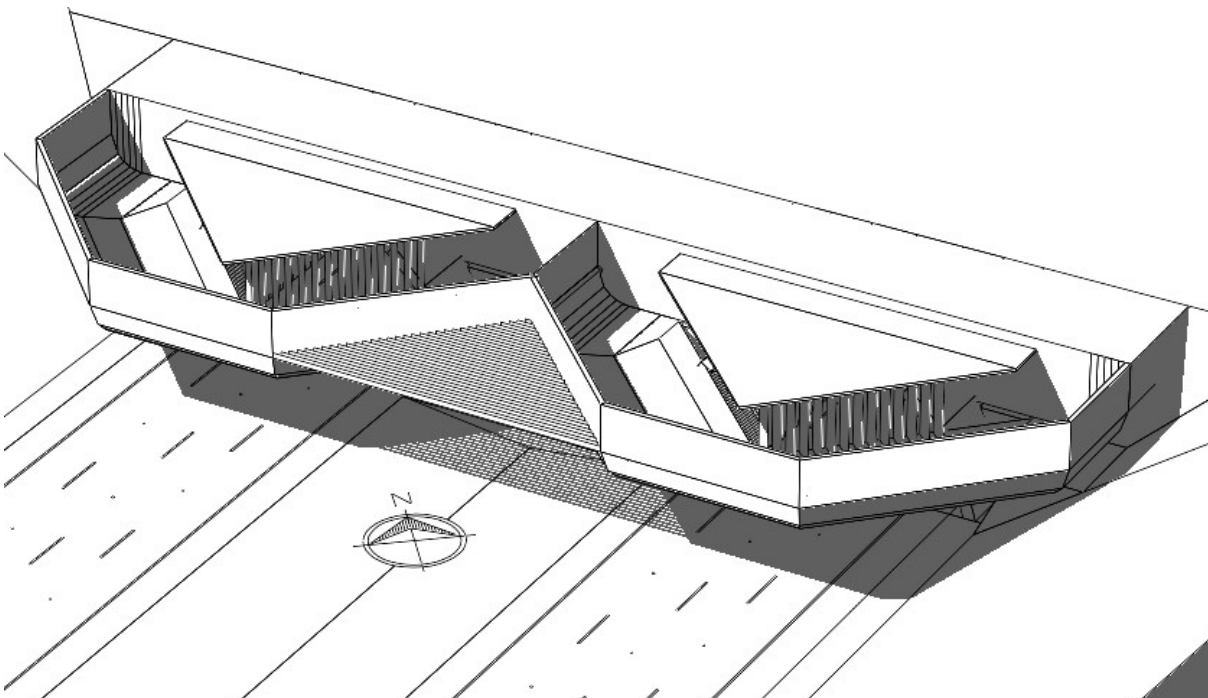


ILUSTRAÇÃO 202 – Estratégia 3. TI-2 Tamboré: Perspectiva Isométrica

8.2.1 VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO LUMINOSO

Foram elaboradas duas simulações computacionais através do Radiance / Ecotect (Simulação E3-A e Simulação E3-B), utilizando os parâmetros da TAB.43, cujos resultados estão apresentados nas IL.203 e 204.

TABELA 43 – Estratégia 3. TI-2 Tamboré: Parâmetros das Simulações

	Tipo de Céu	Hora	Data	Refletâncias				
				SAV			Túnel	
				Face Externa	Face Interna	Forro	Paredes	Pista
Simulação E3-A	Claro	15:00	22/dez	2%	50%	50%	20%	30%
Simulação E3-B	Encoberto	12:00	22/dez	2%	50%	50%	20%	30%

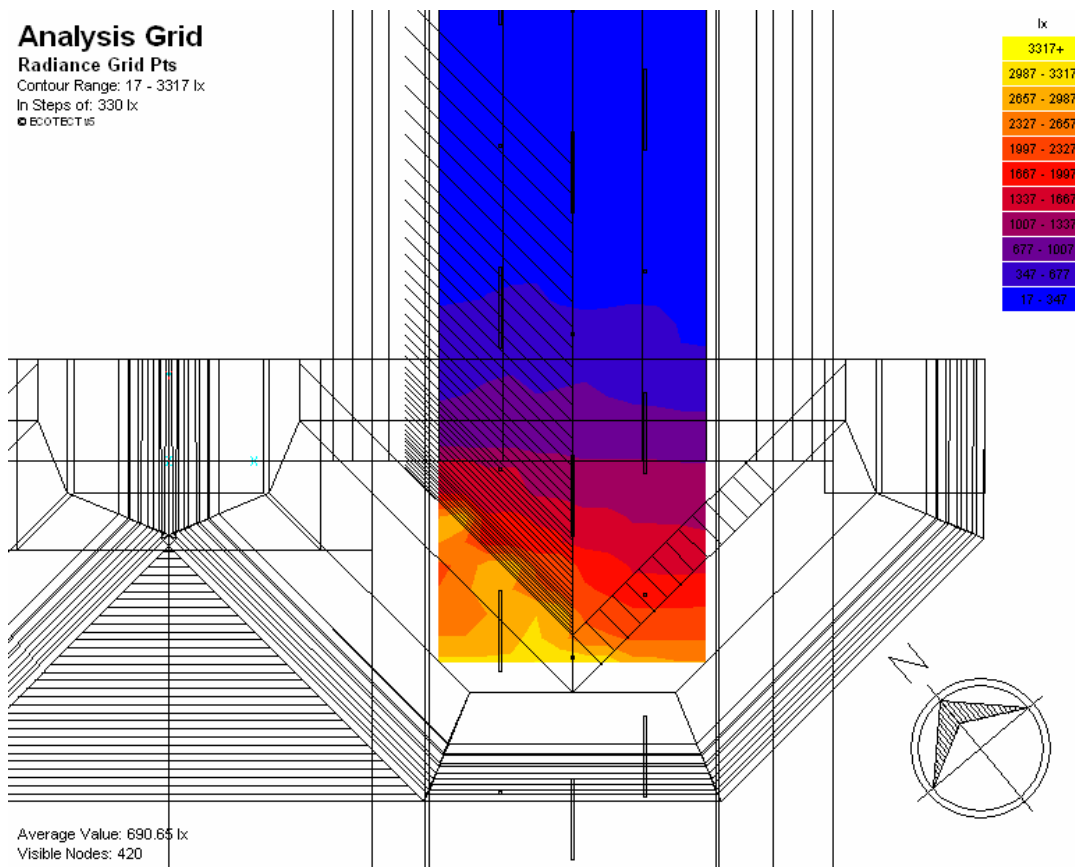


ILUSTRAÇÃO 203 – Estratégia 3: Simulação E3-A. (Céu Claro)

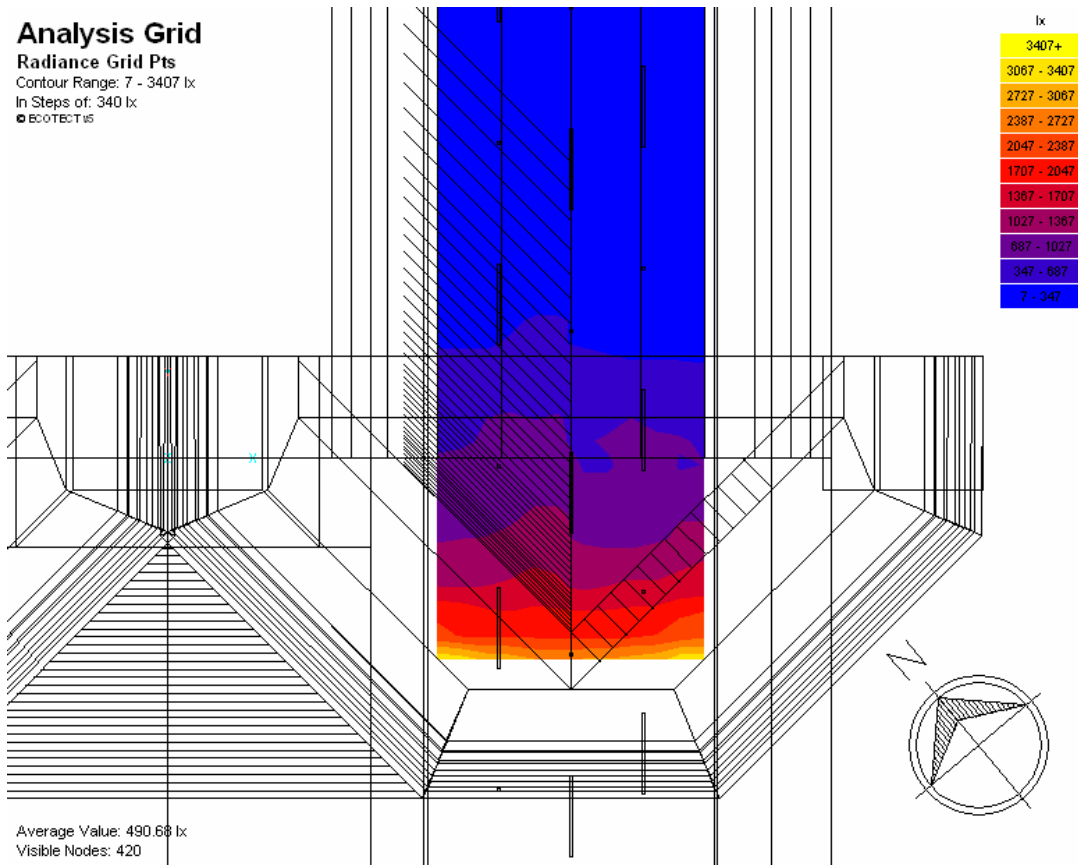


ILUSTRAÇÃO 204 – Estratégia 3: Simulação E3-B (Céu Encoberto)

Na condição de Céu Claro, a iluminância decresce de 3.300 a 600 lx do início ao final do **SAV**, numa extensão de 22,00m. Para o Céu Encoberto, a variação da iluminância é um pouco mais acentuada, entre 3.400 e 400 lx na mesma extensão. Como a luminância de véu do entorno do portal diminui em maiores proporções, pois não ocorre incidência da luz solar direta no tipo de Céu Encoberto, o dispositivo apresentou melhor desempenho nesta condição. Por importar a situação crítica, a verificação de desempenho é aplicável apenas para o Céu Claro, e o Céu Encoberto foi utilizado para confrontar os resultados e identificar possíveis deficiências do sistema. Quanto à condução da luz para o interior do túnel, o maior potencial de aproveitamento da luz natural ocorreu até a distância aproximada de 5m do portal do túnel, decrescendo rapidamente a partir deste ponto.

O desenho do portal, somado às especificações das refletâncias das superfícies, possibilitou diminuir o potencial das fontes de ofuscamento, prover parte da luz necessária na Zona Limiar e também interferiu na sua extensão, pois a nova altura do portal deslocou o ponto de aproximação. Para a avaliação de desempenho, estes tópicos devem ser analisados separadamente, considerando:

- a. redução da extensão da Zona Limiar;
- b. aproveitamento da luz natural;
- c. redução na luminância de véu equivalente.

Em relação aos **tópicos a e b**, o aumento da altura do portal implicou numa redução de 15,00 m no comprimento da Zona Limiar, afastando o Ponto de Adaptação da entrada do túnel, e o dispositivo proporcionou iluminâncias acima de 600 lx numa extensão de 22,00 m.

No **tópico c** estão integradas as três estratégias aplicadas, mas a contribuição de cada uma será discriminada para permitir identificar sua influência proporcional no resultado final. Para estimar a alteração das luminâncias nas áreas sob influência da Estratégia 3 dentro do campo visual do motorista, foi gerada uma imagem do mesmo ponto de vista das medições e aplicado o recurso **falsa cor** do Radiance (IL.205b). Todas as regiões abrangidas pela Estratégia 3 estiveram abaixo de 180 cd/m². As faces chanfradas orientadas para Sul apresentaram 150 cd/m² no momento da simulação. Adotou-se no novo cálculo 180 cd/m² em todas as áreas atingidas, exceto para estes chanfros, pois sempre haverá ao menos uma face da borda do dispositivo com menor incidência da luz solar direta.

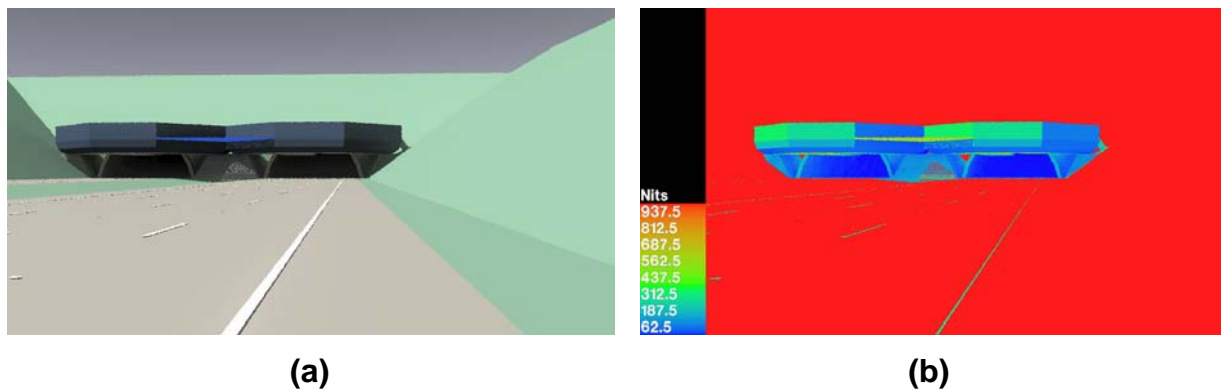


ILUSTRAÇÃO 205 – Simulação E3-A. (Céu Claro): (a) Olho Humano; (b) Falsa Cor

Para as Estratégias 1 e 2 aplicou-se o mesmo procedimento do emboque TI-3 Vista Alegre, reduzindo a refletância da pista de 30% para 15% e adotando o valor medido na vegetação mais densa (0,63 kcd/m²) como luminância máxima nestas áreas. A contenção acima do portal também foi revestida por vegetação (IL.206).

Através do **Método L_{seq}**, verificou-se a alteração das fontes de ofuscamento em função das estratégias e, conseqüentemente, a luminância de véu resultante. As alterações provocadas pelas Estratégias 1 e 2 estão em branco na ilustração e em

itálico na tabela, e as novas luminâncias decorrentes apenas da Estratégia 3 estão em verde claro e em itálico sobre fundo cinza (IL.206 e TAB.44).

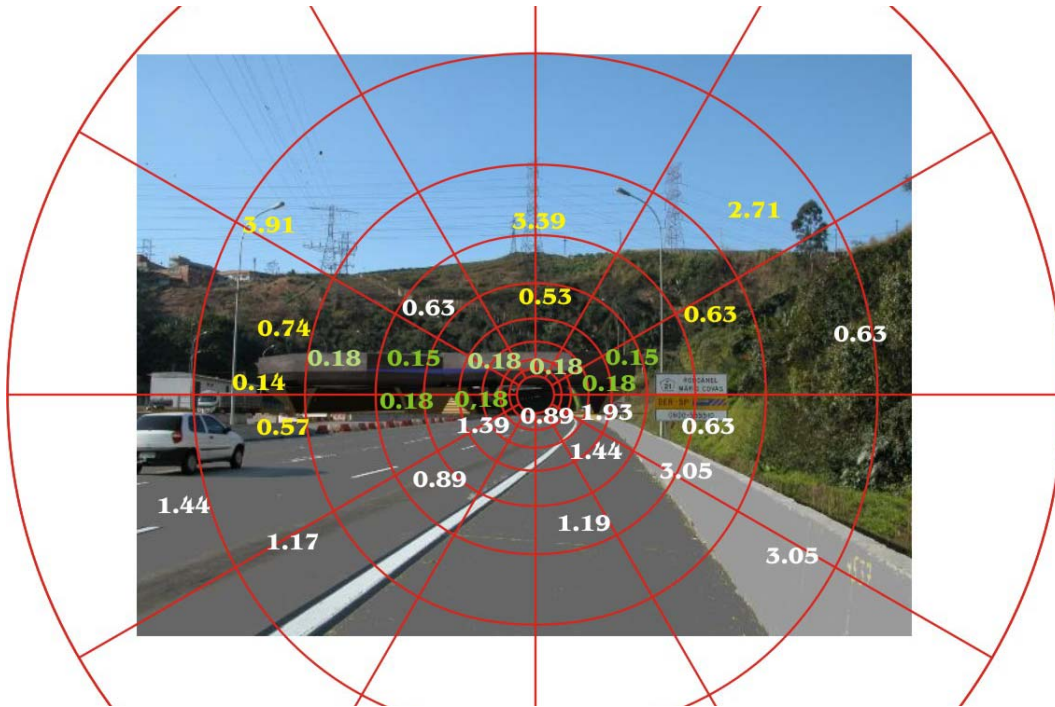


ILUSTRAÇÃO 206 – Estratégias 1, 2 e 3. TI-2 Tamboré: Método L_{seq}

TABELA 44 – Estratégias 1, 2 e 3. TI-2 Tamboré: Método L_{seq}

Túnel: 2 Tamboré

Extensão: 650m

Emboque: Tamboré (TI-2)

data: 24/7/2003

Orientação: 40°SO

hora: 15:45 às 16:15

Seções	ANÉIS									SOMA
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	<i>0,18</i>	<i>0,18</i>	<i>0,18</i>	0,53	0,53	1,40	3,39	3,39	NÃO	9,78
2	<i>0,18</i>	<i>0,18</i>	<i>0,18</i>	0,53	0,53	0,53	1,73	2,71	2,71	9,28
3	0,25	<i>0,18</i>	<i>0,18</i>	<i>0,15</i>	<i>0,39</i>	0,63	<i>0,63</i>	<i>0,63</i>	<i>1,05</i>	4,09
4	0,25	0,25	<i>0,18</i>	<i>0,18</i>	<i>1,06</i>	<i>1,84</i>	<i>1,35</i>	<i>1,11</i>	<i>1,11</i>	7,33
5	0,25	<i>0,18</i>	<i>0,89</i>	<i>1,44</i>	<i>1,44</i>	<i>1,44</i>	<i>1,93</i>	<i>2,25</i>	2,48	12,30
6	<i>0,18</i>	<i>0,18</i>	<i>0,89</i>	<i>1,44</i>	<i>1,44</i>	<i>1,44</i>	<i>1,44</i>	<i>1,44</i>	NÃO	8,45
7	<i>0,18</i>	<i>0,18</i>	<i>0,89</i>	<i>1,16</i>	<i>1,17</i>	<i>1,44</i>	<i>1,44</i>	<i>1,44</i>	NÃO	7,90
8	0,25	<i>0,18</i>	<i>1,39</i>	<i>1,39</i>	<i>0,89</i>	<i>0,89</i>	<i>1,00</i>	<i>1,17</i>	<i>1,17</i>	8,33
9	0,25	0,25	<i>0,18</i>	<i>0,18</i>	<i>1,08</i>	<i>0,54</i>	<i>1,17</i>	<i>1,21</i>	<i>1,21</i>	6,07
10	0,25	<i>0,18</i>	<i>0,18</i>	<i>0,18</i>	<i>0,39</i>	<i>0,39</i>	<i>0,51</i>	1,37	1,37	4,82
11	<i>0,18</i>	<i>0,18</i>	<i>0,18</i>	<i>0,63</i>	<i>0,63</i>	<i>0,63</i>	2,60	3,91	3,91	12,85
12	<i>0,18</i>	<i>0,18</i>	<i>0,18</i>	<i>0,63</i>	0,53	1,40	3,39	3,39	NÃO	9,88
ΣLi (kcd/m ²)										101,08
OBS: Sol direto em todos os pontos										
Lseq (cd/m ²)										52
Lth (cd/m ²)										73
ρ (pavimento)										0,30
Eth (lx)										766

8.2.2 ESTRATÉGIA 3: ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com a aplicação das três estratégias, a luminância de Véu Equivalente L_{seq} , a luminância na Zona Limiar L_{th} e a Iluminância na Zona Limiar E_{th} apresentaram os seguintes valores (TAB.45):

TABELA 45 – Estratégias 1, 2 e 3. TI-2 Tamboré: Resultados

	L_{seq} (cd/m ²)	L_{th} (cd/m ²)	E_{th} (lx)	%
Valores Originais	93	131	1374	100%
Estratégias 1 e 2	66	93	973	71%
Estratégia 3	79	111	1167	85%
Estratégias 1, 2 e 3	52	73	766	56%



(a)



(b)

ILUSTRAÇÃO 207 – TI-2 Tamboré: (a) Existente; (b) Estratégias 1, 2 e 3

As Estratégias 1 e 2 reduziram 29%, enquanto a Estratégia 3 foi responsável por 15%, perfazendo uma economia de 44% na iluminância E_{th} .

Com este nível de iluminação, a Estratégia 3 é praticamente auto-suficiente, durante o dia, na área que abrange, correspondente ao trecho de 22,00 m na entrada do túnel. Somado ao deslocamento do Ponto de Adaptação de 15,00 m, houve uma diminuição de 27% na extensão da Zona Limiar servida pelo sistema artificial de iluminação.

Ao prover a iluminação independente do sistema artificial, a Estratégia 3 garante a visibilidade adequada durante o período diurno em um ponto crítico, oferecendo maior segurança na hipótese de um colapso energético.

A Zona de Saída no túnel da Pista Externa também foi atingida, e a Zona de Transição – com extensão inicial de 21,00 m (linha pontilhada) para 100 km/h – foi excluída, pois as luminâncias inicial e final nesta zona se igualaram devido à diminuição na luminância de véu proporcionada pelo **SAV**. Apenas com as Estratégias 1 e 2 a relação percentual entre L_{tr} e L_{th} passou de 23% (linha pontilhada) para 33% (linha traço-ponto), atingindo 41% (linha tracejada), quando incorporada a Estratégia 3 (IL.208).

As reduções nos comprimentos da Zona de Saída e da Zona de Transição foram incorporadas pela Zona Interior, inclusive a parcela proveniente do avanço do portal sobre a rodovia aberta. Assim, o comprimento total do conjunto formado pelo túnel e pelo **SAV** foi ampliado, mas do ponto de vista da iluminação, este aumento está localizado no trecho de menor consumo, com pequeno impacto em todo o sistema.

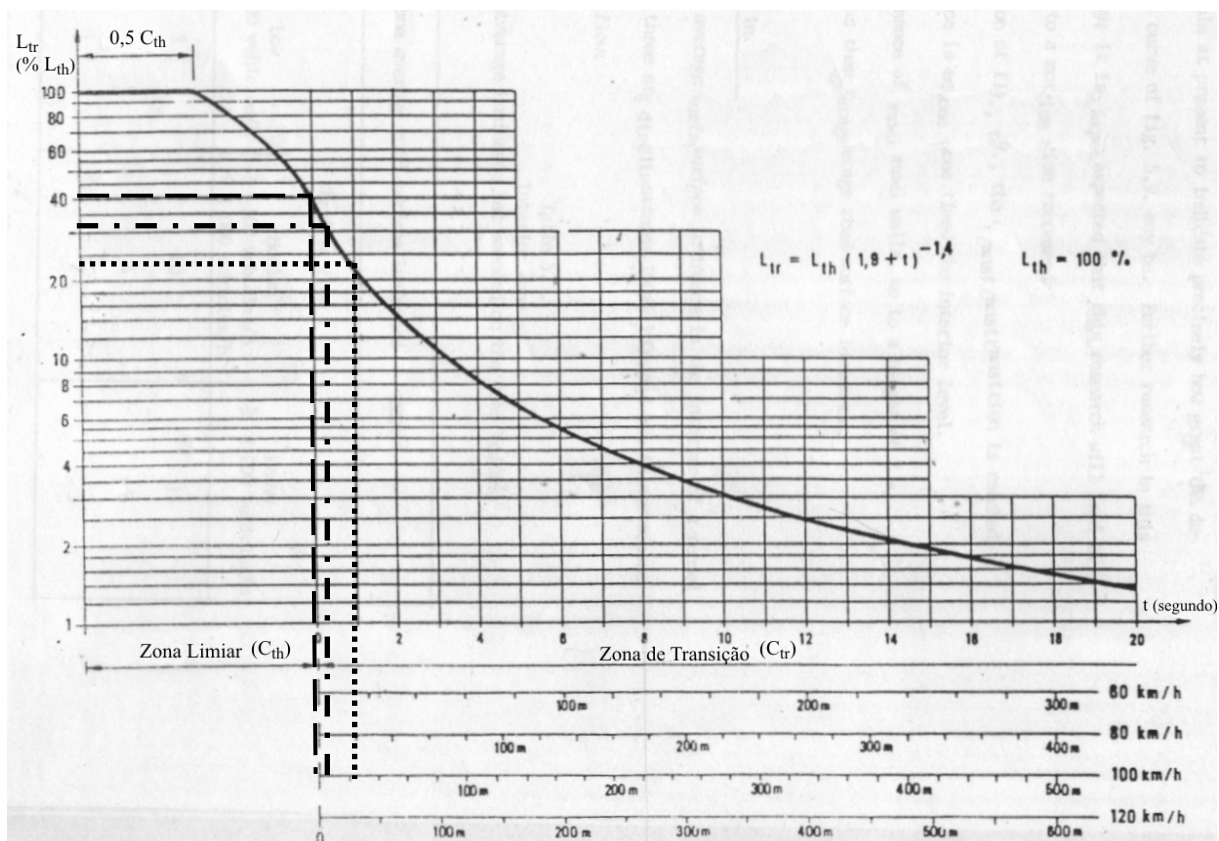

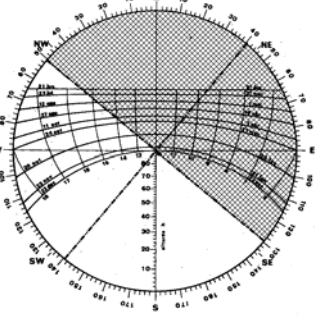


ILUSTRAÇÃO 208 – Estratégias 1, 2 e 3. TI-2 Tamboré: Extensão da Z. Transição

TABELA 46 – Estratégias 1, 2 e 3. TI-2 Tamboré: Ficha Resumo

Obra: Rodoanel Mário Covas Local: São Paulo		Túnel: 2 Tamboré Emboque: Tamboré (TI-2)		Data: 24/7/2003 Horário: 15:45/16:15		
1. Dados do Túnel			2. Cálculos e Parâmetros			
Comprimento Ctot (m)	650,00	Volume de Tráfego <input type="checkbox"/> Leve <input type="checkbox"/> Médio <input checked="" type="checkbox"/> Pesado	Procedimentos Tabela	Referências TAB.35	Notas: 1. SAV: Sistema para Adaptação Visual 2. DSF: Distância Segura de Freagem 3. MAVD: Média Anual de Velocidade/Dia	
Pista Largura (m) Faixas (n°)	14,40 4	Ajuste de Lth <input type="checkbox"/> 0% <input type="checkbox"/> 50% <input checked="" type="checkbox"/> 100%	Fluxograma	IL.185		
Gabarito Largura (m) Altura (m)	15,60 5,50	DSF(m) = 160,00 h(m) = 9,30	Tabela	TAB.36 160,00		
Portal Largura (m) Altura h (m) Orientação	18,42 9,30 40°SO	Ponto de Adaptação $d(m) = \frac{h-1,5}{\tan 10^\circ}$ d (m) = 44,24	IL.187 EQ.66	59,55		
Penetração da Luz Natural Boa Ruim	<input checked="" type="checkbox"/> Boa <input type="checkbox"/> Ruim	Zona Limiar Cth (m) = 135,76 Lth (cd/m²) = 131 Eth (lx) = 1374	$Cth = DSF + 20 \cdot d$ Método Lseq $Eth = Lth \cdot \pi / \rho$	EQ.67 Sec.5.3.1 EQ.5		98,45 73 766
Visibilidade da Saída Sim Não	<input type="checkbox"/> Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não	Zona de Transição Ctr (m) = 21,00 Lti (cd/m²) = 52 Eti (lx) = 549 Ltf (cd/m²) = 30 Ltf (% Lth) = 23% Etf (lx) = 314	Abaco $Lti = 0,4 \cdot Lth$ $Eti = Lti \cdot \pi / \rho$ $Ltf = 3 \cdot Lin (< Lti)$ $Ltf(\%) = 3 \cdot Lin / Lth \times 100$ $Etf = Ltf \cdot \pi / \rho$	IL.188 Sec.7.1.6 EQ.5 Sec.7.1.6 EQ.68 EQ.5		0,00 29 306 30 41% 314
Refletâncias Paredes (%) Pista (%)	20 30	Zona interior Cin (m) = 333,24 Lin (cd/m²) = 10 Ein (lx) = 105	$Cin = Ctot - (Cth + Ctr + Cs)$ Tabela $Ein = Lin \cdot \pi / \rho$	EQ.69 TAB.37 EQ.5		391,55 10 105
Tráfego V. Máx. (km/h) Vol. (MAVD): Unidirecional Bidirecional	100 72665 <input checked="" type="checkbox"/> Unidirecional <input type="checkbox"/> Bidirecional	Zona de Saída Cs (m) = 160,00 Lsi (cd/m²) = 20 Esi (lx) = 209 Lsf (cd/m²) = 50 Esf (lx) = 524	$Cs = DSF$ $Lsi = 2 \cdot Lin$ $Esi = Lsi \cdot \pi / \rho$ $Lsf = 5 \cdot Lin$ $Esf = Lsf \cdot \pi / \rho$	TAB.36 Sec.7.1.8 EQ.5 Sec.7.1.8 EQ.5		160,00 20 209 50 524
Cena do Emboque Rural Urbano Montanha Planície Depressão Reto Curvo	<input type="checkbox"/> Rural <input checked="" type="checkbox"/> Urbano <input checked="" type="checkbox"/> Montanha <input type="checkbox"/> Planície <input type="checkbox"/> Depressão <input type="checkbox"/> Reto <input checked="" type="checkbox"/> Curvo					
Vista do Emboque						
						
Período de Insolação do Portal						
						
Observações: a) Insolação: Período da Tarde b) Cth + SAV: 98,45+22,00 = 120,45 m						
3. Estratégias Recomendadas para Composição do SAV						
<input checked="" type="checkbox"/> Estratégia 1 Tratamento Superficial						
Descrição: Refletância da Pista: Alterar de 30% para 15%.			Comentários: Baixo custo.			
<input checked="" type="checkbox"/> Estratégia 2 Elementos de Controle da Luz						
Descrição: Paisagismo: Adensar vegetação.			Comentários: Estratégias 1 e 2: Redução de 29% em Lth. Redução de 75% em Ctr			
<input checked="" type="checkbox"/> Estratégia 3 Desenho do Portal						
Descrição: Avanço do portal sobre a pista aberta (22,00m), diminuindo a incidência solar direta e provendo a luz através de aberturas zenitais.			Comentários: Redução de 15% em Lth; Redução de 27% em Cth; Redução de 25% em Ctr Auxilia iluminação da Zona de Saída.			
<input type="checkbox"/> Estratégia 4 Túnel Falso						
Descrição:			Comentários:			
<input type="checkbox"/> Estratégia 5 Módulos Fotovoltaicos						
Descrição:			Comentários:			
↑ Resultados Aplicando as Estratégias Selecionadas						

8.3 ESTRATÉGIA 4 (DAV): TE-3 GRAMADO

Assim como nos emboques já apresentados, recomenda-se, inicialmente, a aplicação das Estratégias 1 e 2 para reduzir o potencial das fontes de ofuscamento. Este procedimento é necessário para estimar o nível de iluminação que deverá ser suprido pelo **Dispositivo para Adaptação Visual (DAV)**. Diferentemente dos exemplos anteriores, o cálculo das Estratégias 1 e 2 foi desmembrado neste emboque, para verificar a influência isolada de cada uma. Como a Estratégia 3 será englobada pela Estratégia 4, e esta servirá de sustentação para a Estratégia 5, o emboque TE-3 Gramado configurará um exemplo completo do **Sistema para Adaptação Visual (SAV)**, em que as cinco estratégias estarão aplicadas.

O Capítulo 6 apresentou um estudo detalhado do **DAV**, analisando o potencial de algumas tipologias em relação ao aproveitamento da luz natural. Partindo desses resultados, adotou-se o mesmo emboque para aplicação da Estratégia 4. O emboque escolhido para teste do **DAV** (TE-3 Gramado), além de se aproximar do maior grau de exigência, possui certas características, como as empenas de concreto e o traçado em curva nas imediações do emboque, que restringem prováveis recursos a serem utilizados no projeto arquitetônico, limitando as possibilidades de iluminação lateral e dificultando a adequação do dispositivo ao traçado da pista.



ILUSTRAÇÃO 209 – Vista do TE-3 Gramado

8.3.1 PROCEDIMENTOS PRELIMINARES: ESTRATÉGIAS 1 E 2

Para a Estratégia 1, manteve-se a redução na refletância da pista de 30% para 15%, e para a Estratégia 2, adotou-se a mesma solução do emboque TI-2 Tamboré, restaurando a massa de vegetação sobre os muros de contenção. O valor medido na vegetação lateral (0,94 kcd/m²) foi reproduzido nessas áreas. Considerando essas duas estratégias, os novos resultados, calculados através do **Método L_{seq}**, constam na IL.210 e nas TAB.47, 48 e 49.

As TAB.47 e 48 incorporam isoladamente as Estratégias 1 e 2 no cálculo, e a TAB.49 mostra a influência de ambas no resultado. Manteve-se a mesma representação já adotada para facilitar a identificação de cada uma: na ilustração, a Estratégia 1 em cor branca e a Estratégia 2 em verde claro; nas tabelas, a Estratégia 1 em *itálico* e a Estratégia 2 em *itálico sobre fundo cinza*.

Os demais valores são os originais, permanecendo em amarelo na ilustração e sem alteração da fonte nas tabelas.

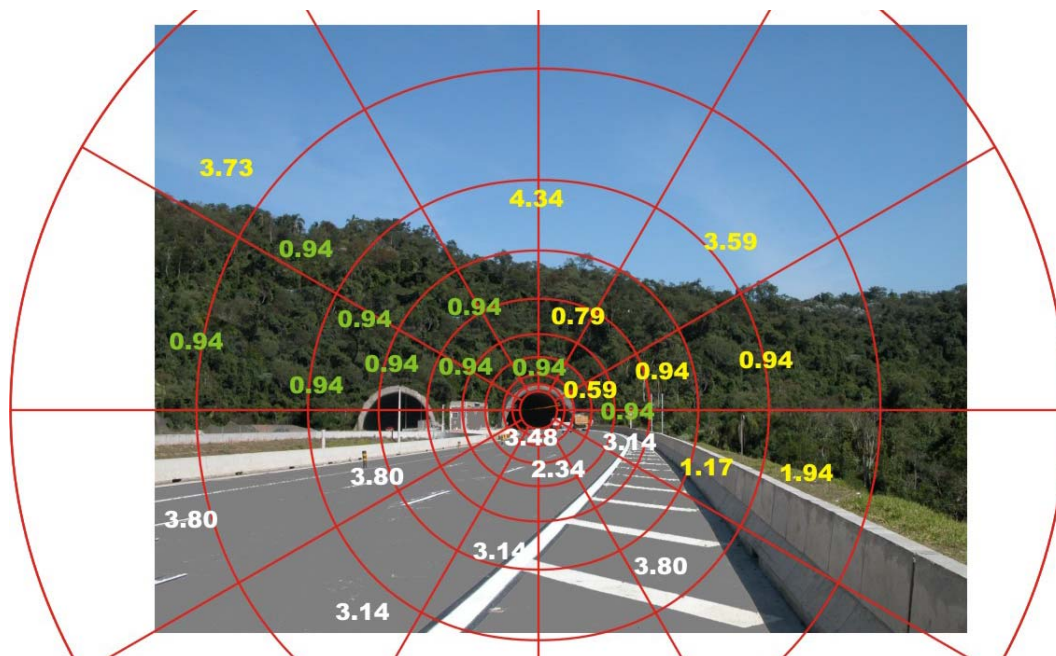


ILUSTRAÇÃO 210 – Estratégias 1 e 2. TE-3 Gramado: Método L_{seq}

TABELA 47 – Estratégia 1. TE-3 Gramado: Método L_{seq}

Túnel: 3 - Régis Bittencourt										
Extensão: 450m										
Emboque: Gramado (TE-3)										
Orientação: 20°NE										
data: 24/7/2003										
hora: 12:45 às 13:00										
ANEIS										
Seções	A	B	C	D	E	F	G	H	I	SOMA
1	4,82	4,82	4,82	3,35	0,79	1,28	4,34	4,34	NÃO	28,56
2	4,82	4,82	4,40	3,20	0,87	0,94	2,53	3,59	3,59	28,76
3	0,25	0,59	0,59	2,02	0,94	0,94	0,94	1,47	1,60	9,34
4	0,25	0,59	1,86	3,35	3,94	3,24	1,06	1,23	1,23	16,75
5	0,25	3,48	3,51	2,34	3,14	3,80	3,48	2,52	2,00	24,52
6	3,48	3,48	3,48	2,34	3,14	3,80	3,80	3,80	NÃO	27,32
7	3,48	3,48	3,48	2,91	2,34	3,14	3,14	3,80	NÃO	25,77
8	0,25	3,60	3,48	3,48	3,00	3,07	2,74	3,14	3,14	25,90
9	0,25	1,16	4,82	6,96	2,91	3,04	3,03	3,00	3,00	28,17
10	0,25	4,82	4,82	4,82	4,79	4,62	4,82	3,77	1,95	34,66
11	4,82	4,82	4,82	4,82	3,58	3,20	2,15	3,19	3,75	35,15
12	4,82	4,82	4,82	3,35	1,58	1,58	4,34	4,34	NÃO	29,65
ΣLi (kcd/m ²)										314,55
OBS: Sol direto predominante										
Lseq (cd/m ²)										161
Lth (cd/m ²)										228
ρ (pavimento)										0,30
Eth (Ix)										2383

TABELA 48 – Estratégia 2. TE-3 Gramado: Método L_{seq}

Túnel: 3 - Régis Bittencourt										
Extensão: 450m										
Emboque: Gramado (TE-3)										
Orientação: 20°NE										
data: 24/7/2003										
hora: 12:45 às 13:00										
ANEIS										
Seções	A	B	C	D	E	F	G	H	I	SOMA
1	4,82	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	4,34	4,34	NÃO	18,20
2	4,82	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	2,53	3,59	3,59	19,23
3	0,25	0,59	0,59	2,02	0,94	0,94	0,94	1,47	1,60	9,34
4	0,25	0,59	1,86	3,35	3,94	3,24	1,06	1,23	1,23	16,75
5	0,25	6,96	4,68	4,68	6,28	7,60	6,96	5,03	3,09	45,53
6	6,96	6,96	6,96	4,68	6,28	7,60	7,60	7,60	NÃO	54,64
7	6,96	6,96	6,96	5,82	4,68	6,28	6,28	7,60	NÃO	51,54
8	0,25	3,60	6,96	6,96	6,00	6,14	5,48	6,28	6,28	47,95
9	0,25	1,16	0,94	6,96	5,82	6,08	6,05	6,00	6,00	39,26
10	0,25	0,94	0,94	4,82	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	11,65
11	4,82	0,94	0,94	4,82	0,94	0,94	0,94	2,19	3,75	20,28
12	4,82	0,94	0,94	3,35	0,94	1,58	4,34	4,34	NÃO	21,25
ΣLi (kcd/m ²)										355,62
OBS: Sol direto predominante										
Lseq (cd/m ²)										182
Lth (cd/m ²)										257
ρ (pavimento)										0,30
Eth (Ix)										2694

TABELA 49 – Estratégias 1 e 2. TE-3 Gramado: Método L_{seq}

Túnel: 3 - Régis Bittencourt RODOANEL METROPOLITANO MÁRIO COVAS										
Extensão: 450m										
Emboque: Gramado (TE-3) data: 24/7/2003										
Orientação: 20°NE hora: 12:45 às 13:00										
ANÉIS										
Seções	A	B	C	D	E	F	G	H	I	SOMA
1	4,82	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	4,34	4,34	NÃO	18,20
2	4,82	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	2,53	3,59	3,59	19,23
3	0,25	0,59	0,59	2,02	0,94	0,94	0,94	1,47	1,60	9,34
4	0,25	0,59	1,86	3,35	3,94	3,24	1,06	1,23	1,23	16,75
5	0,25	3,48	3,51	2,34	3,14	3,80	3,48	2,52	2,00	24,52
6	3,48	3,48	3,48	2,34	3,14	3,80	3,80	3,80	NÃO	27,32
7	3,48	3,48	3,48	2,91	2,34	3,14	3,14	3,80	NÃO	25,77
8	0,25	3,60	3,48	3,48	3,00	3,07	2,74	3,14	3,14	25,90
9	0,25	1,16	0,94	6,96	2,91	3,04	3,03	3,00	3,00	24,29
10	0,25	0,94	0,94	4,82	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	11,65
11	4,82	0,94	0,94	4,82	0,94	0,94	0,94	2,19	3,75	20,28
12	4,82	0,94	0,94	3,35	0,94	1,58	4,34	4,34	NÃO	21,25
ΣLi (kcd/m ²) =										244,50
OBS: Sol direto predominante										
L_{seq} (cd/m ²) =										125
L_{th} (cd/m ²) =										177
ρ (pavimento) =										0,30
E_{th} (lx) =										1852

As duas estratégias possibilitaram a seguinte redução na luminância de Véu Equivalente L_{seq} e, conseqüentemente, na luminância na Zona Limiar L_{th} e na iluminância na Zona Limiar E_{th} (TAB.50):

TABELA 50 – Estratégias 1 e 2. TE-3 Gramado: Resultados

	L_{seq} (cd/m ²)	L_{th} (cd/m ²)	E_{th} (lx)	%
Valores Originais	218	308	3225	100%
Estratégia 1	161	228	2383	74%
Estratégia 2	182	257	2694	84%
Estratégias 1 e 2	125	177	1852	57%

Comparando com os emboques anteriores, as Estratégias 1 e 2 tiveram melhor desempenho no TE-3 Gramado. Tal fato deve-se à maior incidência solar nas imediações deste emboque, aumentando a eficiência das estratégias, por reduzirem uma parcela maior da luz solar refletida em direção ao motorista.



(a)

(b)

ILUSTRAÇÃO 211 – TE-3 Gramado: (a) Existente; (b) Estratégias 1 e 2

A luminância final na Zona de Transição L_{tr} foi de 10% para 13,8% de L_{th} apenas com a Estratégia 1, passando para 17% de L_{th} , com as Estratégias 1 e 2, o que implicou na redução do comprimento da Zona de Transição C_{tr} de 82,00 m (situação original: linha pontilhada) para 62,00 m (Estratégia 1: linha traço-ponto) e, finalmente, para 42,00 m (Estratégias 1 e 2: linha tracejada) como mostra a IL.212.

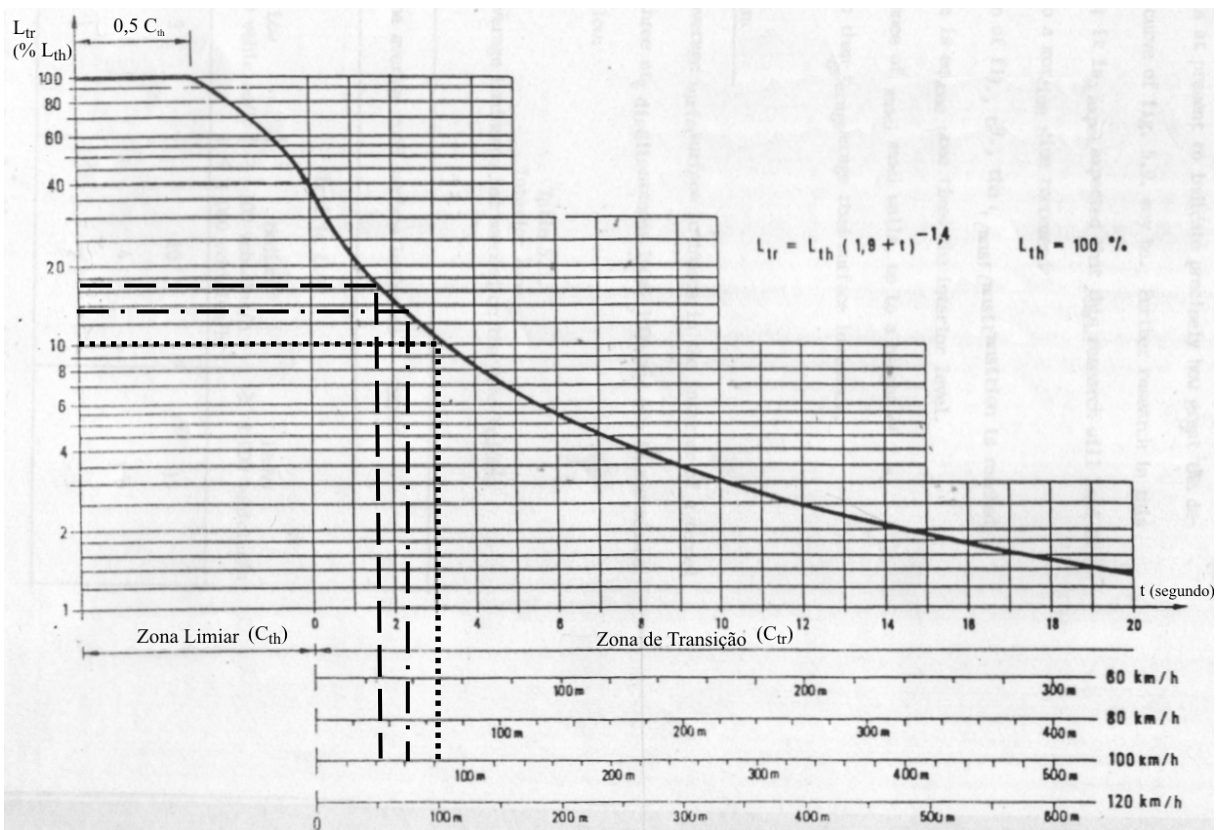


ILUSTRAÇÃO 212 – Estratégias 1 e 2. TE-3 Gramado: Extensão da Z. Transição

8.3.2 ESTRATÉGIA 4: ESTUDO PRELIMINAR

Baseado nos parâmetros de projeto, definiu-se um volume preliminar de abrangência do **DAV** em forma de paralelepípedo, com a largura igual à da pista (14,40m), altura um pouco acima do gabarito para passagem dos veículos (5,75m) e comprimento de 171,00 m, equivalente aproximadamente à soma dos comprimentos da Zona Limiar (128,67 m) e da Zona de Transição (42,00 m). Desta extensão, 155,00 m foram dispostos na rodovia aberta e 16,00 m no interior do túnel. Esta conformação facilitará o ajuste entre os sistemas de iluminação natural e artificial, pois a sazonalidade da luz natural poderá incorrer em brusca passagem para a luminância da Zona Interior, se a Zona de Transição for atendida exclusivamente pelo dispositivo.

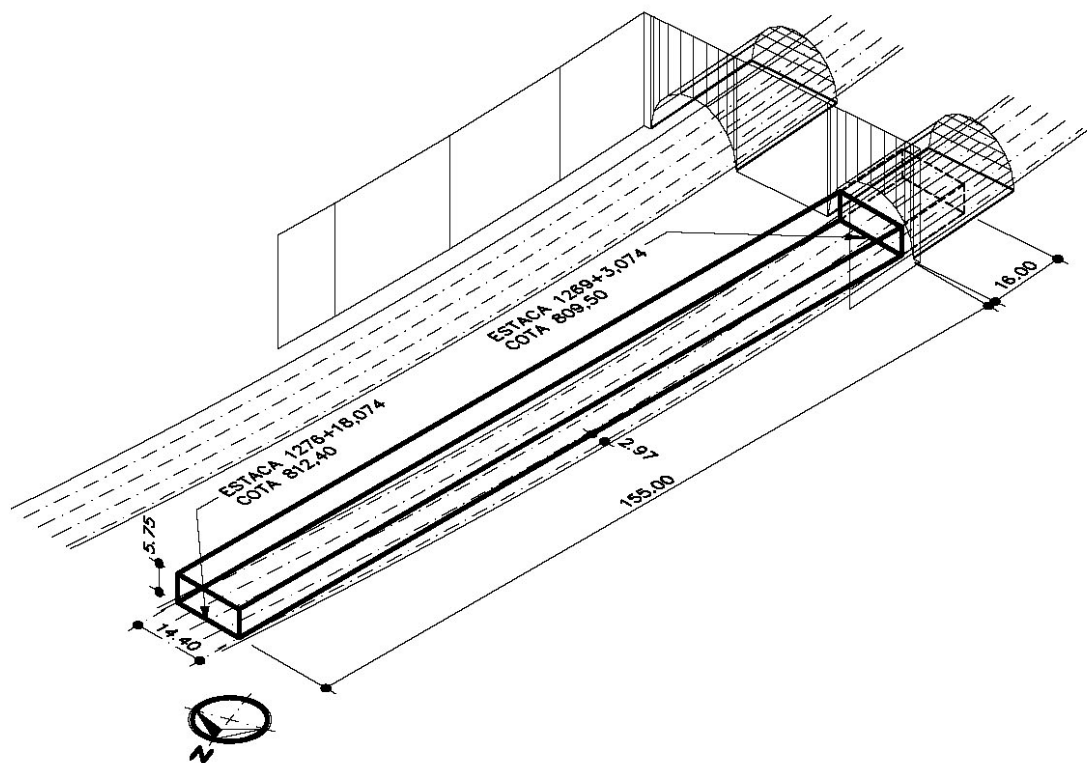


ILUSTRAÇÃO 213- Estratégia 4. TE-3 Gramado: Dimensões do DAV

Pelo traçado em curva da pista, no meio deste volume forma-se uma flecha de aproximadamente 3,00m entre a pista e o dispositivo. Este aspecto não será considerado na modelagem para facilitar os cálculos e as simulações, mas o sistema construtivo do dispositivo deverá incorporá-lo, buscando acompanhar a curvatura da pista (IL.213).

A iluminação natural será obtida através da tela de iluminação zenital, composta por células à prova de penetração solar. Para compor a tela, aplicou-se a mesma célula da Tipologia 3, calculada e dimensionada segundo a Adaptação do Método de Swierstra, conforme consta na seção 6.5.

Admitindo as limitações geométricas determinadas pela pista, gabarito e entorno, definiu-se a seção típica do **DAV**. A diagonal de 1,50m da célula de base quadrada foi posicionada ortogonalmente ao eixo da pista, com altura de 1,25m, inclinação da base de 35° em relação ao plano horizontal e abertura superior voltada para Sudoeste. A altura calculada da célula de 1,07 m foi estendida para 1,25 m, devido à penetração solar observada na Tipologia 3, durante os meses de dezembro e janeiro, entre as 10:30h e 12:00h.

Uma estrutura apertada suporta a tela de iluminação zenital e os fechamentos laterais entre o nível da pista e o limite inferior da tela, a qual ultrapassa 2,55 m do limite da pista em ambos os lados, formando um beiral em toda a extensão do **DAV**. O beiral possibilita manter uma fresta superior, entre o fechamento lateral e a tela, sem que haja penetração solar. Essa fresta facilita a conexão dos elementos, podendo ainda complementar a iluminação, se necessário. Os pórticos são constituídos por duas bases de concreto, até a altura de 4,55 m, interligadas por uma estrutura metálica, formando um arco contínuo que se ajusta internamente à seção transversal do túnel. Posicionados a cada 12,80 m, dividem o **DAV** em 12 módulos iguais.

A faixa central da tela, com 7,50 m de largura, é alinhada com o plano horizontal, passando a ter uma inclinação de 8°, em ambos os lados, a partir da borda desta faixa. Este procedimento possibilita direcionar a luz zenital para as laterais, aumentando a iluminância nesta região e melhorando a uniformidade, além de ajustar a seção do dispositivo ao gabarito. Observa-se uma interferência da base direita do pórtico com o muro de contenção lateral do emboque. Entretanto, o muro avança 18,00 m da entrada do túnel, sendo necessária uma adaptação da base direita apenas nos dois pórticos iniciais do **DAV** (IL.214)..

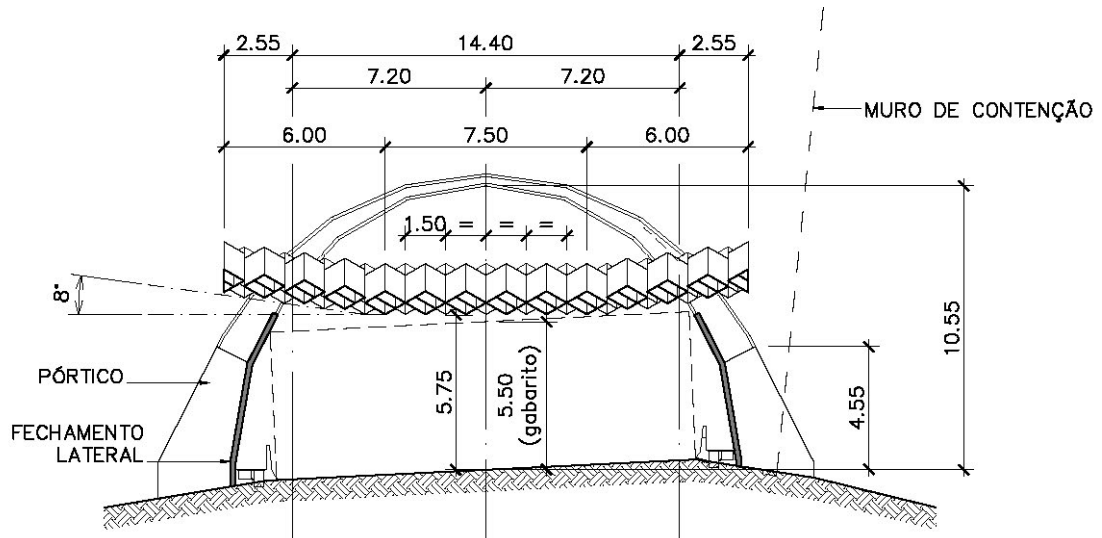


ILUSTRAÇÃO 214– Estratégia 4: Corte Transversal

A menor altura proporcionada pela malha de células é compensada no portal de entrada do **DAV** por *brises* horizontais, os quais cobrem a região acima do gabarito e foram projetados para proporcionar um ângulo de sombra vertical de 20°. A visão do motorista atinge as faces inferiores dos *brises*, que estão sombreadas e deverão possuir baixa refletância, produzindo uma luminância próxima ao interior do dispositivo. Desta forma, mantém-se a mesma redução no cálculo do comprimento da Zona Limiar, proporcionada sem a aplicação do **DAV**, devido à influência da altura do portal de entrada no campo visual do motorista (IL.215).

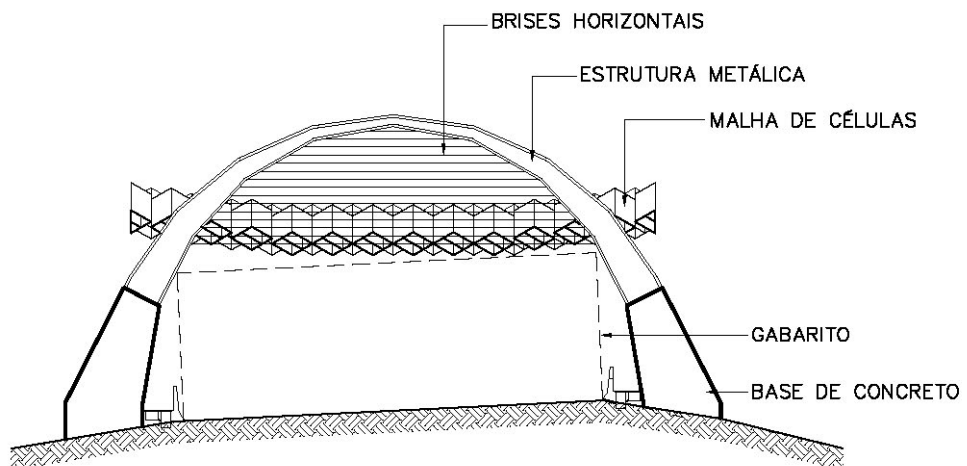


ILUSTRAÇÃO 215– Estratégia 4: Elevação do Portal de Entrada

Os *brises* ainda abrangem as faces da última linha de células voltadas para o motorista, as quais estão expostas à radiação solar direta e configuram significativas fontes de ofuscamento, pela maior proximidade do campo visual central.

A partir da metade do comprimento do **DAV**, diminuiu-se a refletância da cobertura, configurando quatro estágios de iluminação, numerados a partir da entrada do **DAV** (TAB.51 e IL.216)

TABELA 51 – Estratégia 4: Estágios de Iluminação

	Módulos	Refletância	Difusão Especular
Estágio 1	6 (76,80m)	70%	33,30%
Estágio 2	2 (25,60m)	60%	33,30%
Estágio 3	2 (25,60m)	50%	33,30%
Estágio 4	2 (25,60m)	40%	33,30%



ILUSTRAÇÃO 216– Estratégia 4. TE-3 Gramado: Vista Geral do DAV

A refletância dos fechamentos laterais é de 54,80%, e a tela que penetra no interior do túnel, após o Estágio 4, volta à refletância de 70%⁵⁷.

⁵⁷ O valor máximo de 70% na refletância foi baseado nos estudos de Schreuder (1964, p.35) que, ao analisar a influência da refletância no desempenho da malha, adota a faixa entre 3 e 75%.

Os *brises* no portal de entrada do **DAV** mantêm a altura original do portal do túnel, e os objetos no seu interior podem ser identificados devido à ausência do **Efeito Buraco Negro** (IL.217).



ILUSTRAÇÃO 217– Estratégia 4. TE-3 Gramado: Vista Frontal do DAV

8.3.3 ESTRATÉGIA 4: SIMULAÇÕES

As simulações foram elaboradas nos solstícios e equinócios para Céu Claro. No solstício de inverno também foi considerado o Céu Encoberto para o cálculo do FLD – Fator de Luz Diurna (IL.218, 219, 220, 221, 222).

Analysis Grid
Radiance Grid Pts
 Value Range: 76 - 10776 lx
 (c) ECOTECH v5

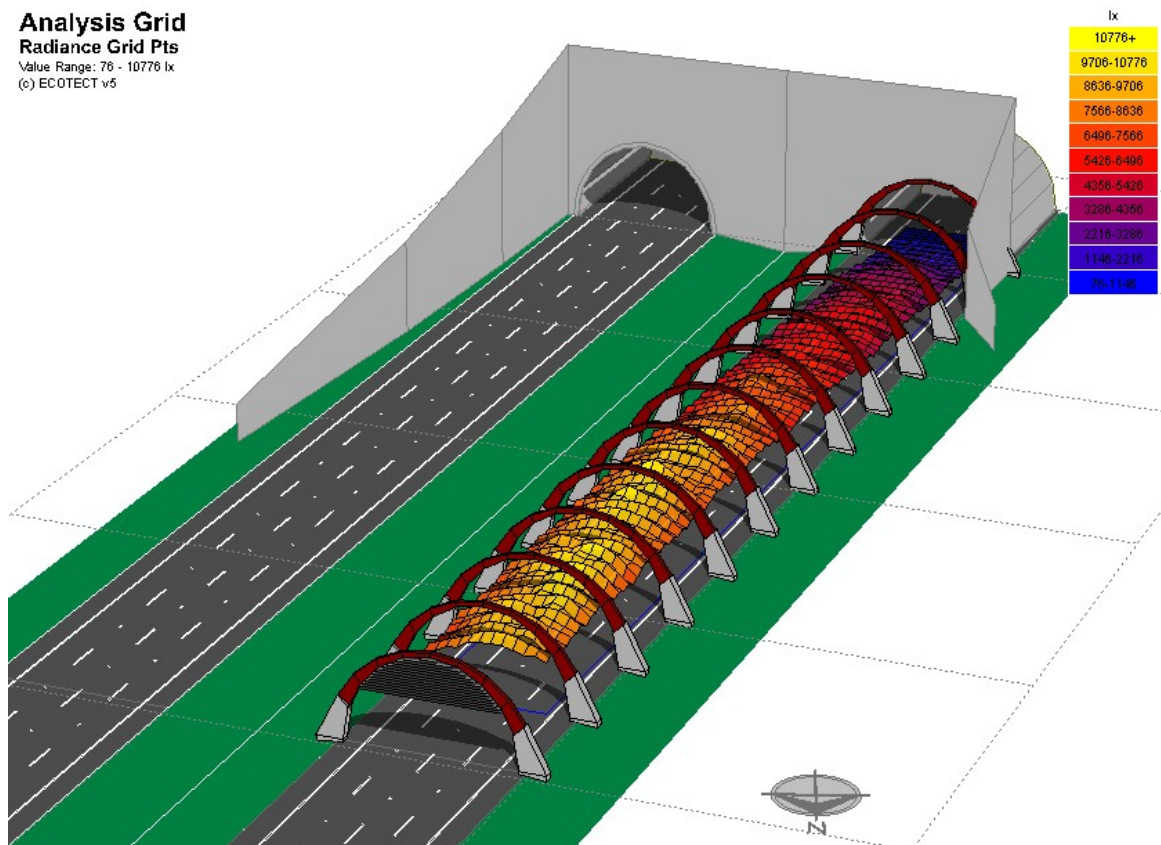


ILUSTRAÇÃO 218 – Estratégia 4: Solstício de Verão Céu Claro 12h

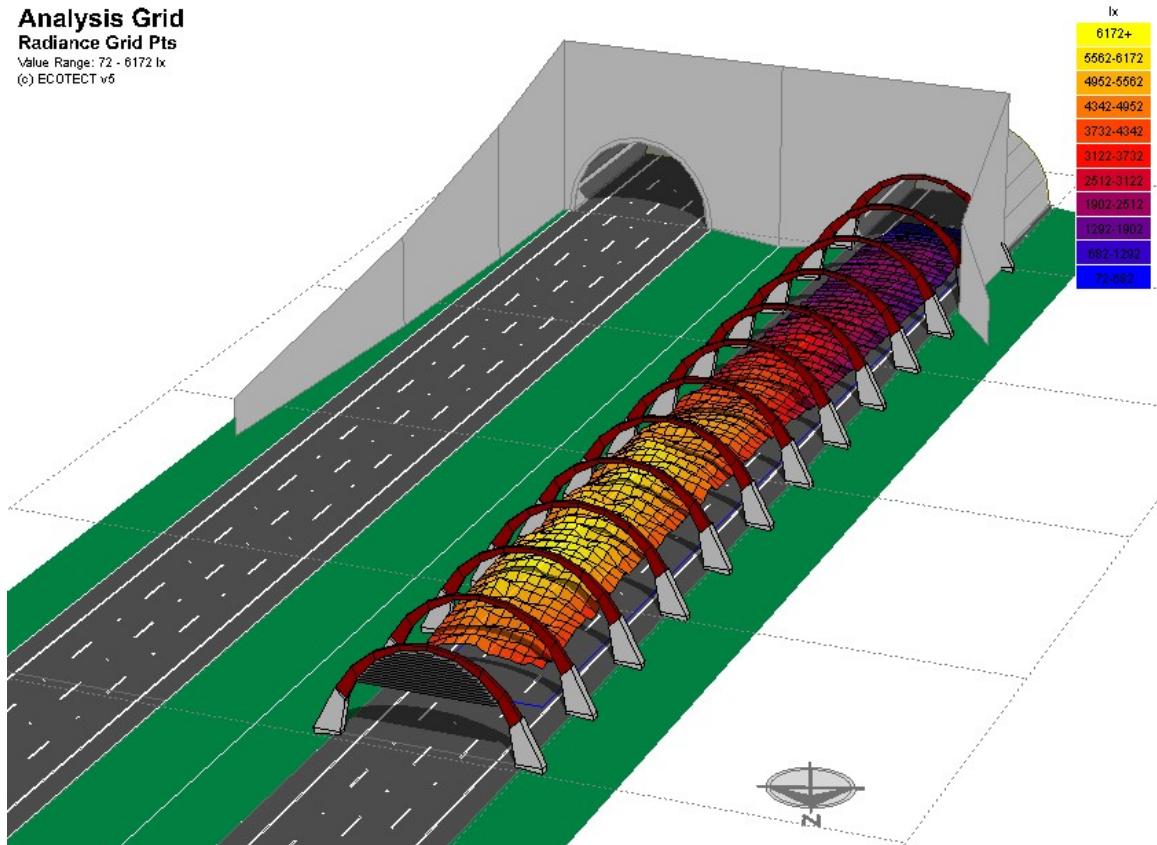


ILUSTRAÇÃO 219 – Estratégia 4: Equinócio de Outono Céu Claro 12h

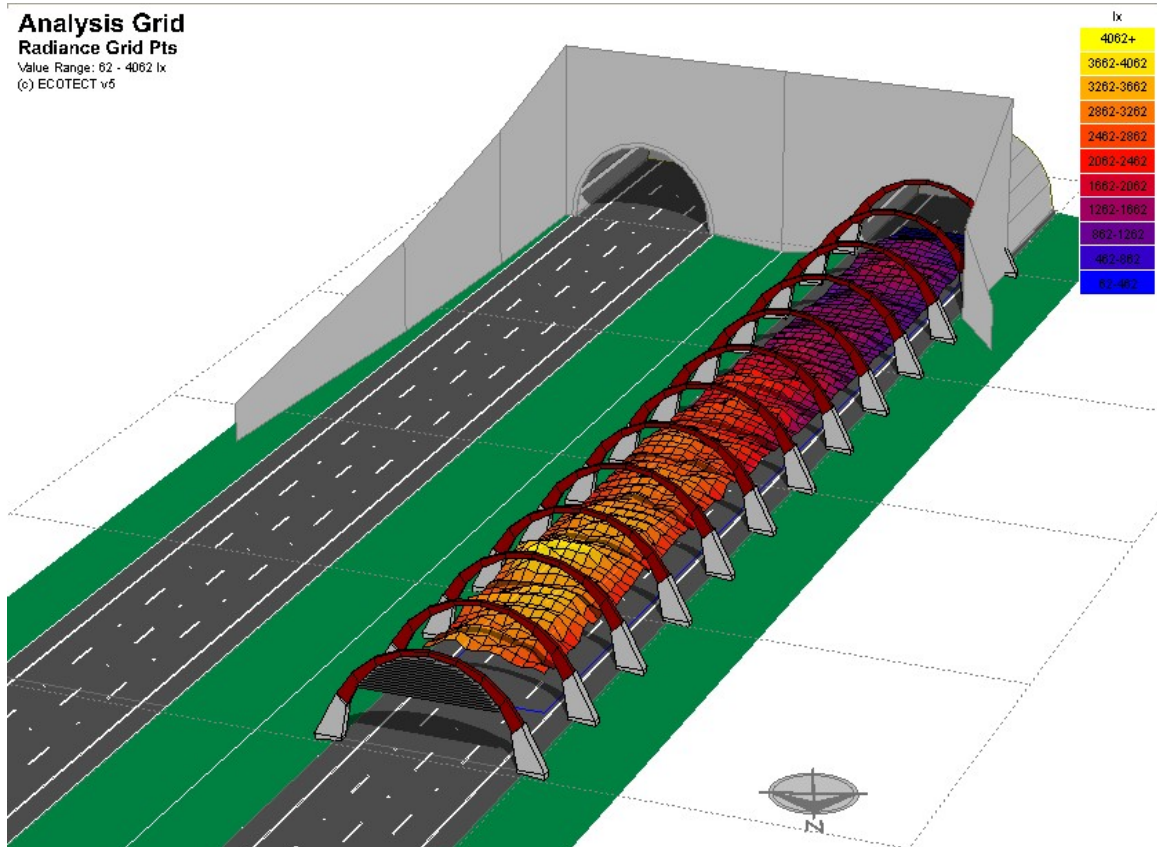


ILUSTRAÇÃO 220 – Estratégia 4: Solstício de Inverno Céu Claro 12h

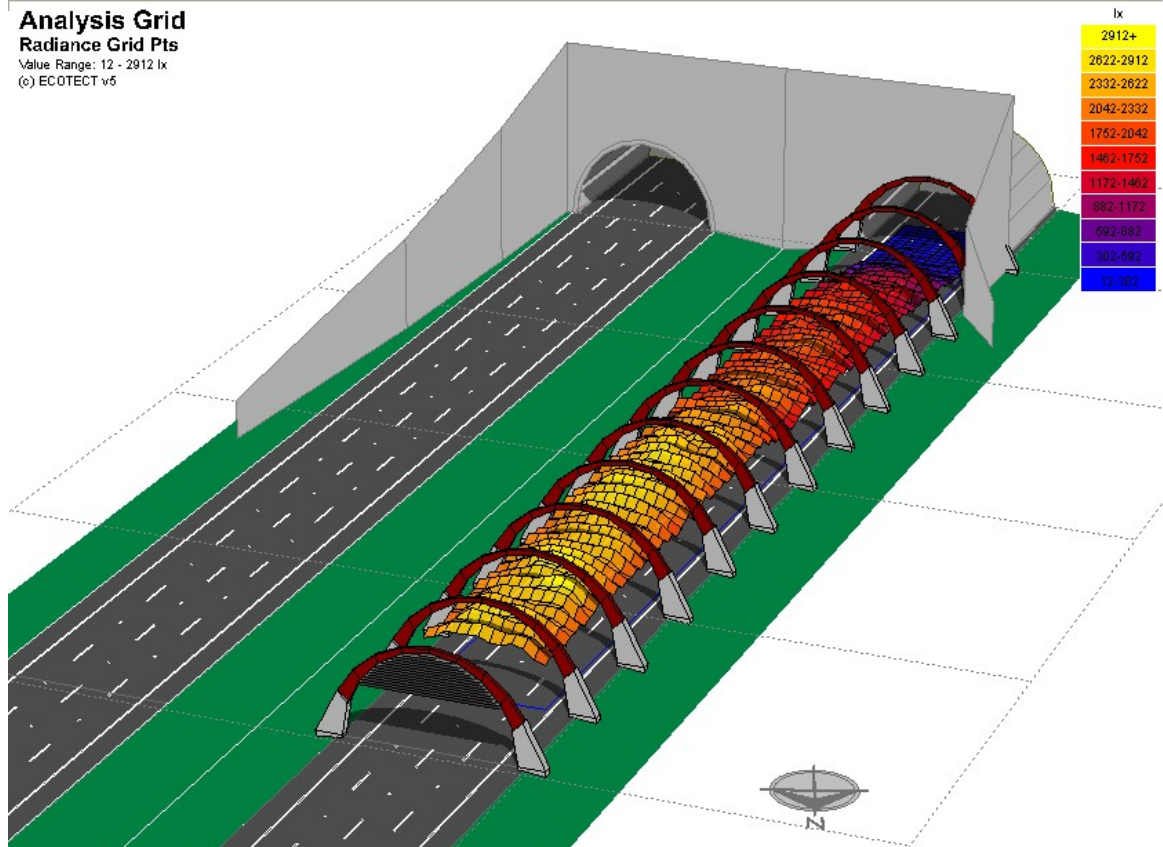


ILUSTRAÇÃO 221 – Estratégia 4: Solstício de Inverno Céu Encoberto 12h

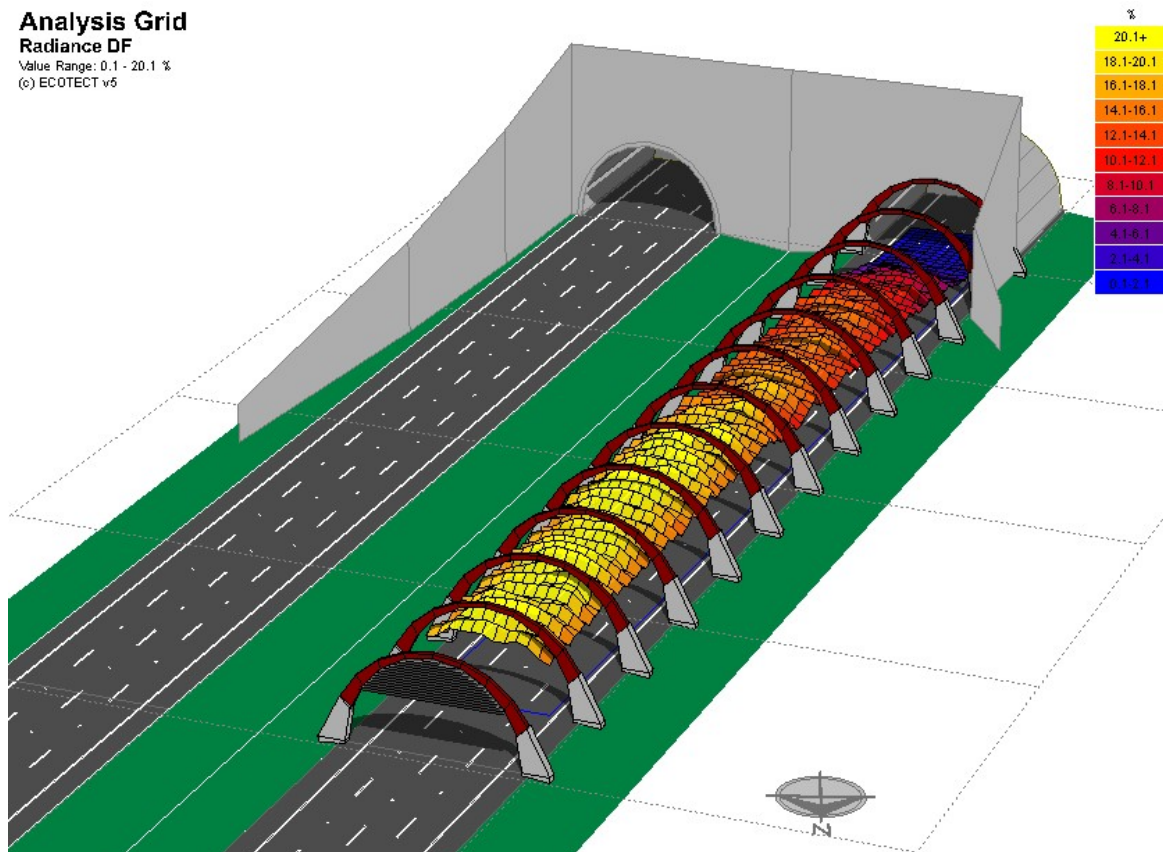


ILUSTRAÇÃO 222 – Estratégia 4: Fator de Luz Diurna (FLD)

8.3.4 ESTRATÉGIA 4: ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os níveis de iluminação obtidos ultrapassaram o necessário para a Zona Limiar. No solstício de verão, o valor máximo acima de 10.700 lux poderia dificultar o ajuste na Zona de Transição. As simulações mostraram bom desempenho também neste aspecto, mas deve ser considerada a dificuldade em garantir os coeficientes de reflexão, devido à agressividade do meio.

A situação mais desfavorável foi observada no solstício de inverno, pois o **DAV** apresentou o menor rendimento quando existe a maior incidência de radiação solar direta no plano do portal do túnel. Ainda assim, o desempenho da Estratégia 4 superou o nível de iluminação necessário, atendendo às premissas de projeto em conjunto com as demais estratégias. Mesmo se desconsiderada a influência das Estratégias 1 e 2 na redução da luminância de véu equivalente, o **DAV** é praticamente auto-suficiente, com iluminância média próxima de 3.000 lx no Estágio 1. Se admitida uma pequena penetração solar, conforme a recomendação CIE (2004, p.16), o **DAV** atenderá com folga aos requisitos de iluminação, mesmo em condições extremas, pois a incidência solar também incrementará a iluminância na Zona Limiar. Assim, a altura da célula calculada (1,07 m) poderá ser adotada no Estágio 1, pois nos demais estágios a penetração solar dificultará a transição para a Zona Interior.

A TAB.52 apresenta as iluminâncias em módulos típicos de cada estágio, para as condições de Céu Claro no solstício de inverno. A grade de pontos coincide com a modulação dos pórticos a cada 11 pontos (12,80 m) e, no sentido transversal, abrange 13,20 m, contendo 12 pontos.

O final da Zona Limiar corresponde ao final do Estágio 3, completando a extensão de 128,00 m. O valor médio e a última linha da grade de pontos apresentaram iluminâncias próximas de 1.200 lx, em torno de $0,4 E_{th}$, estando conforme a recomendação CIE.

O Estágio 4 apresentou iluminância média de 1.048 lx e, a partir do interior do túnel, o nível de iluminação decresceu rapidamente, mas ainda com bom desempenho até a quarta linha da grade de pontos, a partir da qual torna-se necessário um sistema suplementar de iluminação artificial, para ajustar o nível de iluminação até atingir a Zona Interior (fundo cinza na tabela).

A uniformidade esteve sempre conforme a recomendação ANSI/IESNA nos quatro estágios exteriores. A recomendação é aplicada para cada faixa de rolamento mas, na TAB.52, foram considerados todos os pontos da grade, mostrando que o DAV superou as exigências neste quesito.

TABELA 52 – Estratégia 4: Iluminâncias nos Módulos Típicos dos Estágios (IL.220)

		Módulo Típico: Estágio 1 (Zona Limiar)										(lx)		
PORTAL DO DAV		2189	2239	2382	2511	2388	2540	2734	2873	2989	3086	2474		
		2463	2512	2656	2785	2652	2803	3053	3192	3356	3453	2788	Emin	1905
		2645	2731	2621	2865	3177	3245	3557	3679	3252	3582	3138	Emax	4072
		2891	2921	2845	2895	3385	3632	3783	4072	3579	3670	3293	Emed	2992
		3134	3217	2818	2961	3184	3576	3137	3791	3541	3807	3154	Uniformidade	
		3292	3425	2978	2961	3307	3434	3291	3438	3662	3739	3242	Emin/Emed	0,64
		3320	3482	2985	3046	3347	3518	3007	3336	3549	3787	3224	Emin/Emax	0,47
		3380	3443	3066	3053	3267	3398	3026	3097	3516	3680	3169		
		3346	3470	3099	3113	3029	3211	2877	3042	2990	3376	2988	Referências	
		3216	3307	2988	2982	2861	2937	2714	2805	2789	2905	2825	(ANSI/IESNA)	
		2390	2786	2523	2675	2188	2443	2280	2460	2365	2578	2572	Emin/Emed	0,5
		2148	2153	2270	2226	1975	1905	2049	2046	2138	2226	2345	Emin/Emax	0,29
			Módulo Típico: Estágio 2 (Zona Limiar)											
			2105	2106	1948	1968	2077	2107	1850	1860	1600	1599	1623	
		2373	2374	2173	2194	2312	2341	2085	2095	1804	1802	1819	Emin	1155
		2358	2486	2198	2304	2253	2409	2378	2393	1907	1965	2004	Emax	2742
		2427	2399	2267	2259	2330	2319	2486	2565	2041	2060	2130	Emed	2036
		2393	2463	2079	2193	2307	2404	2221	2464	2566	2470	2003	Uniformidade	
		2365	2429	2068	2047	2351	2456	2282	2316	2562	2742	2038	Emin/Emed	0,57
		2273	2352	2018	2027	2059	2321	2173	2307	2153	2467	2002	Emin/Emax	0,42
		2195	2225	1926	1925	1995	2078	2116	2179	2081	2124	1935		
		2137	2178	2060	1999	1854	1954	1897	2028	2230	2224	1863	Referências	
		1954	2025	1903	2007	1715	1756	1767	1805	2105	2272	1765	(ANSI/IESNA)	
		1916	1900	1651	1776	1445	1535	1486	1582	1320	1724	1285	Emin/Emed	0,5
		1725	1769	1490	1541	1299	1305	1366	1337	1187	1168	1155	Emin/Emax	0,29
		Módulo Típico: Estágio 3 (Zona Limiar)												
		1680	1749	1506	1555	1359	1419	1088	1061	1144	1232	1092		
		1821	1891	1647	1696	1522	1581	1224	1197	1261	1348	1189	Emin	894
		1669	1855	1524	1719	1528	1673	1424	1425	1330	1442	1288	Emax	1891
		1712	1722	1581	1658	1598	1672	1508	1600	1357	1445	1322	Emed	1360
		1678	1752	1361	1557	1528	1691	1461	1619	1318	1438	1333	Uniformidade	
		1648	1708	1360	1398	1557	1667	1462	1555	1326	1413	1355	Emin/Emed	0,66
		1423	1553	1544	1513	1331	1558	1211	1394	1234	1367	1221	Emin/Emax	0,47
		1402	1406	1494	1577	1346	1436	1194	1216	1219	1298	1206		
		1595	1557	1334	1459	1185	1341	1157	1201	1169	1245	1076	Referências	
		1509	1644	1251	1309	1126	1173	1103	1149	1103	1140	1032	(ANSI/IESNA)	
		1157	1353	1113	1170	1141	1147	991	1056	1049	1069	1010	Emin/Emed	0,5
		1040	1031	1000	1001	1031	1071	894	921	943	958	913	Emin/Emax	0,29
		Módulo Típico: Estágio 4 (Zona de Transição)												
		822	836	757	792	714	720	803	879	948	1037	931		
		923	937	847	881	798	804	871	947	1022	1111	1019	Emin	714
		1008	1045	1039	1015	1006	980	948	1020	1118	1216	1415	Emax	1514
		1076	1122	1096	1116	1093	1160	996	1072	1172	1301	1450	Emed	1048
		1079	1163	1050	1127	1111	1235	1224	1241	1153	1309	1294	Uniformidade	
		1132	1188	1073	1103	1135	1248	1238	1376	1203	1314	1335	Emin/Emed	0,68
		1300	1325	1032	1087	995	1154	983	1204	1377	1450	1299	Emin/Emax	0,47
		1296	1405	1039	1054	999	1040	989	1024	1353	1514	1279		
		1033	1242	989	1049	896	984	1075	1109	1219	1423	1135	Referências	
		982	1033	946	995	853	880	1027	1140	1184	1322	1091	(ANSI/IESNA)	
		834	924	826	915	832	856	818	976	794	1065	983	Emin/Emed	0,5
		754	786	755	807	757	798	743	785	726	774	891	Emin/Emax	0,29
		Interior do Túnel					Sistema Artificial Suplementar (Zona de Transição)							
PORTAL DO TÚNEL		847	844	644	595	436	389	232	204	132	116	Zona Interior		
		954	952	709	660	464	417	241	214	136	120		Emin	272
		1047	1062	862	749	542	461	269	230	152	129		Emax	1277
		1177	1196	925	837	561	496	273	240	155	136		Emed	786
		1230	1277	987	883	588	517	313	260	160	140		Uniformidade	
		1260	1258	998	878	584	514	309	272	158	139		Emin/Emed	0,35
		1036	1153	817	816	482	471	249	245	124	123		Emin/Emax	0,21
		946	927	765	691	461	410	240	213	120	106			
		737	774	508	554	332	346	185	186	111	101		Referências	
		666	641	469	431	310	281	175	157	106	95		(ANSI/IESNA)	
		451	505	319	346	200	222	130	133	73	78		Emin/Emed	0,5
	407	395	291	272	184	169	121	110	69	62	Emin/Emax	0,29		

TABELA 53 – Estratégias 1, 2, 3 e 4. TE-3 Gramado: Ficha Resumo

Obra: Rodoanel Mário Covas Local: São Paulo Latitude: 23°37'		Túnel: 3 Régis Bittencourt Emboque: Gramado (TE-3)		Data: 24/7/2003 Horário: 12:45/13:00	
1. Dados do Túnel			2. Cálculos e Parâmetros		
Comprimento	Ctot (m)	450,00	Volume de Tráfego <input type="checkbox"/> Leve <input type="checkbox"/> Médio <input checked="" type="checkbox"/> Pesado		Procedimentos Referências Tabela TAB.35
Pista	Largura (m)	14,40	Ajuste de Lth <input type="checkbox"/> 0% <input type="checkbox"/> 50% <input checked="" type="checkbox"/> 100%		Fluxograma IL. 185
	Faixas (n°)	4	DSF(m) = 160,00 h(m) = 10,55		Tabela TAB.36 160,00
Gabarito	Largura (m)	15,60	Ponto de Adaptação d (m) = 51,33		$d = \frac{h-1,5}{\tan 10^\circ}$ IL.187 EQ.66 51,33
	Altura (m)	5,50	Zona Limiar Cth (m) = 128,67 Lth (cd/m²) = 308 Eth (lx) = 3225		$Cth = DSF + 20 \cdot d$ Método Lseq Sec.5.3.1 177 $Eth = Lth \cdot \pi / \rho$ EQ.5 1852
Portal	Largura (m)	18,42	Zona de Transição Ctr (m) = 82,00 Lti (cd/m²) = 123 Eti (lx) = 1288 Ltf (cd/m²) = 30 Ltf (% Lth) = 10% Etf (lx) = 314		Abaco IL.188 42,00 $Lti = 0,4 \cdot Lth$ Sec.7.1.6 71 $Eti = Lti \cdot \pi / \rho$ EQ.5 741 $Ltf = 3 \cdot Lin \cdot (< Lti)$ Sec.7.1.6 30 $Ltf \% \theta = 3 \cdot Lin / Lth \cdot x \cdot 100$ EQ.68 17% $Etf = Ltf \cdot \pi / \rho$ EQ.5 314
	Altura h (m)	10,55	Zona interior Cin (m) = 79,33 Lin (cd/m²) = 10 Ein (lx) = 105		$Cin = Ctot - (Cth + Ctr + Cs)$ EQ.69 119,33 Tabela TAB.37 10 $Ein = Lin \cdot \pi / \rho$ EQ.5 105
	Orientação	20°NE	Zona de Saída Cs (m) = 160,00 Lsi (cd/m²) = 20 Esi (lx) = 209 Lsf (cd/m²) = 50 Esf (lx) = 524		$Cs = DSF$ TAB.36 160,00 $Lsi = 2 \cdot Lin$ Sec.7.1.8 20 $Esi = Lsi \cdot \pi / \rho$ EQ.5 209 $Lsf = 3 \cdot Lin$ Sec.7.1.8 50 $Esf = Lsf \cdot \pi / \rho$ EQ.5 524
Penetração da Luz Natural	Boa	<input checked="" type="checkbox"/>	Refletâncias Paredes (%) 20 Pista (%) 30		
Visibilidade da Saída	Sim	<input type="checkbox"/>	Tráfego V. Máx. (km/h) 100 Vol. (MAVD): 72665 Unidirecional <input checked="" type="checkbox"/> Bidirecional <input type="checkbox"/>		
Refletâncias	Paredes (%)	20	Cena do Emboque Rural <input type="checkbox"/> Urbano <input checked="" type="checkbox"/> Montanha <input checked="" type="checkbox"/> Planície <input type="checkbox"/> Depressão <input type="checkbox"/> Reto <input type="checkbox"/> Curvo <input checked="" type="checkbox"/>		
3. Estratégias Recomendadas para Composição do SAV			Resultados Aplicando as Estratégias Selecionadas ↑		
Estratégia 1 Tratamento Superficial			Descrição: Comentários:		
Refletância da Pista: Alterar de 30% para 15%.			Baixo custo; Redução de 26% em Lth.		
Estratégia 2 Elementos de Controle da Luz			Descrição: Comentários:		
Paisagismo: adensar vegetação. Muro de contenção: substituir por talude com vegetação			Redução de 16,5% em Lth.		
Estratégia 3 Desenho do Portal			Descrição: Comentários:		
Manter a altura do portal de entrada.			É importante manter a altura original do portal, pois a iluminação zenital (Estratégia 4) se aproxima da altura do gabarito, diminuindo a altura do portal de entrada.		
Estratégia 4 Túnel Falso			Descrição: Comentários:		
DAV: Tela a prova de penetração solar na Zona Limiar e início da Zona de Transição; Comprimento: 155,00 m			Autonomia durante o período diurno. Zona Limiar = 128,00m Zona de Transição (parcial) = 25,60m Ajuste: 1,40m (128,00+25,60+1,40=155,00)		
Estratégia 5 Módulos Fotovoltaicos			Descrição: Comentários:		
Observações: Insolação : a) Solstício de Inverno 6:30 às 17:30 h b) Equinócio 6:00 às 15:00 h c) Solstício de Verão 7:00 às 12:00 h			Período de Insolação do Portal		
			Vista do Emboque		
			(Espaço reservado para observações adicionais)		

8.4 ESTRATÉGIA 5 (MÓDULOS FOTOVOLTAICOS): TE-3 GRAMADO

Por posicionar suas superfícies, buscando o melhor aproveitamento da luz difusa e obstrução da luz direta, a célula à prova de penetração solar possui algumas características favoráveis para aproveitamento da energia solar fotovoltaica. Na determinação das diversas faces que a constituem, pode-se incluir, nos requisitos de projeto, a melhor orientação para módulos fotovoltaicos⁵⁸, reservando as regiões mais adequadas para sua instalação, e integrando os módulos à arquitetura.

A concepção da célula da Estratégia 4, apresentada na seção anterior, desconsiderou este aspecto. Mesmo assim, pode-se identificar a existência de faces com orientação próxima ao Norte. As áreas em hachura na IL.223 representam módulos fotovoltaicos de 85Wp, 1,00 x 0,65m, posicionados nessas faces⁵⁹. Por estarem na orientação 30°NE, com inclinação de 66°, não correspondem à posição ideal, quanto ao aproveitamento da radiação solar ao longo do ano.

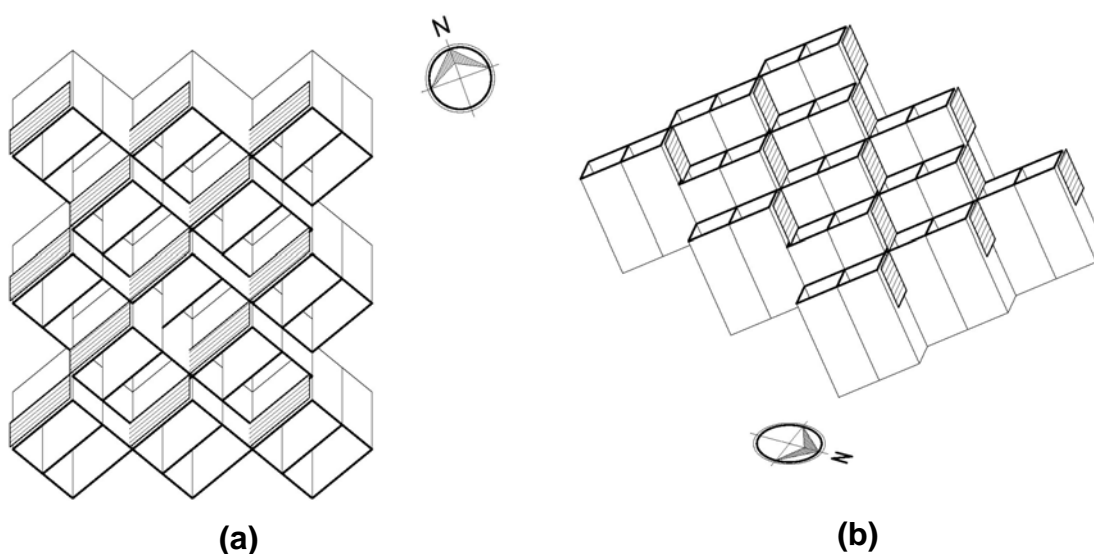


ILUSTRAÇÃO 223 - Estratégias 4 e 5 integradas. (a) Planta; (b) Vista Isométrica

A inclinação de 35° na base da célula define um vértice na maior elevação possível pertencente à face superior, orientado a 20°NE em relação ao seu centro. Na composição da tela, esses vértices determinam diversos alinhamentos, formando uma rede de pontos de apoio e fornecendo uma ampla gama de opções para o arranjo físico do sistema fotovoltaico, pois estes pontos estão na elevação máxima e

⁵⁸ O módulo fotovoltaico é formado pelo agrupamento de diversas células fotovoltaicas. Nesta seção, o sistema fotovoltaico é sempre denominado por **módulo**, reservando apenas para a tela à prova de penetração solar, a denominação **célula**.

⁵⁹ Fonte: KYOCERA, Cod KC85. Disponível em <<http://www.brasilhobby.com.br/descricao.asp?CodProd=KC85>> Acesso em 23 nov. 2006.

não interferem no espaço ocupado pela própria tela. Na IL.224, observa-se que um desses alinhamentos praticamente coincide com a direção Leste / Oeste, sendo apropriado para o posicionamento dos módulos.

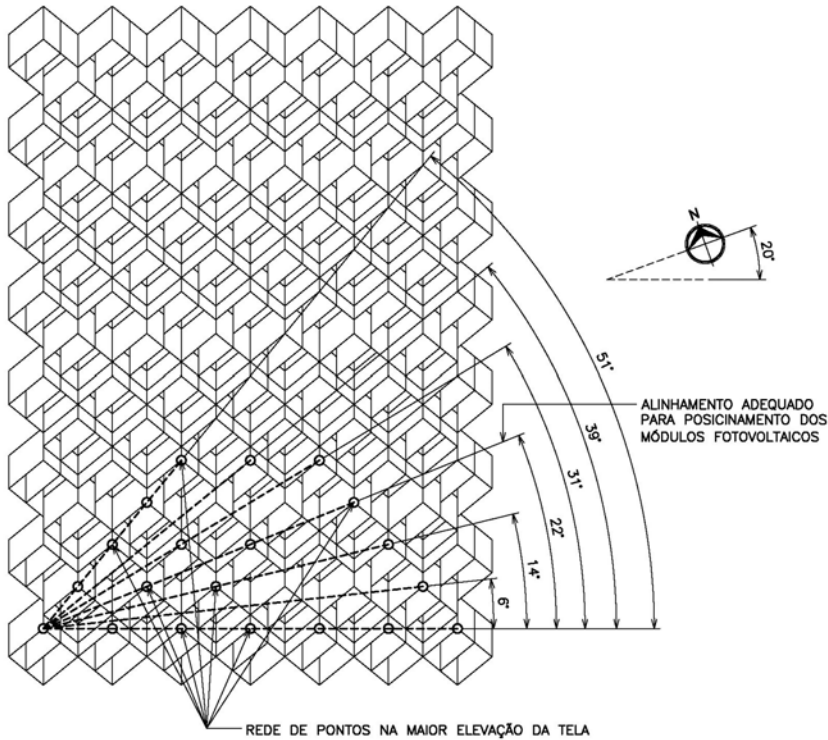


ILUSTRAÇÃO 224 – Estratégia 4: Fator de Luz Diurna (FLD)

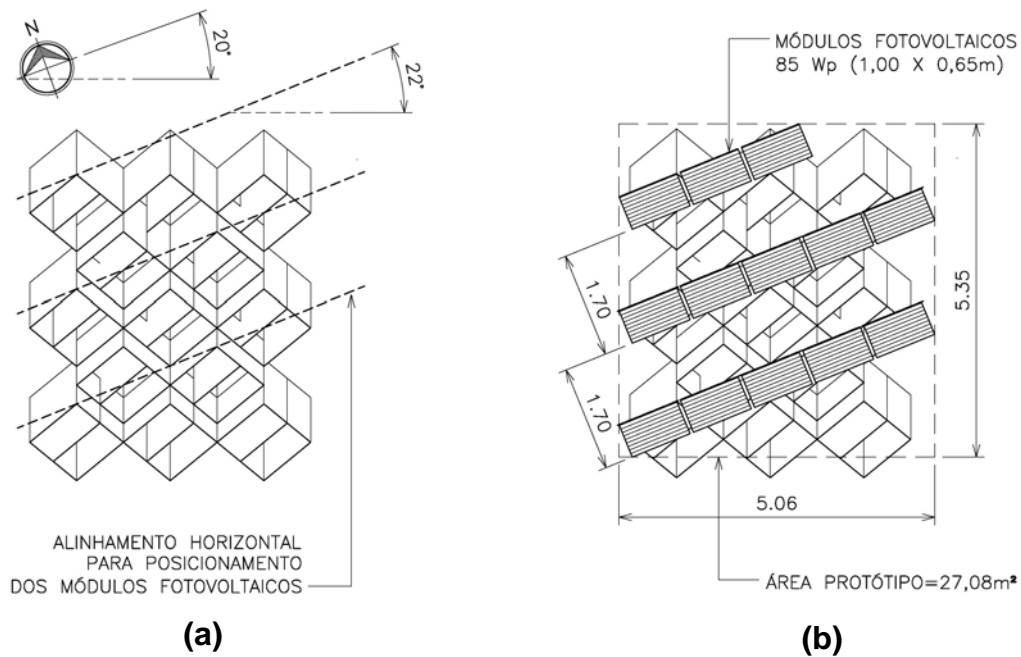


ILUSTRAÇÃO 225 – Estratégias 4 e 5 Sobrepostas: (a) Planta; (b) Vista Isométrica

Determinou-se então, uma área protótipo de 27,08 m² contendo 13 módulos de 85 Wp (1,00 X 0,65m), o que permitirá estimar a área total ocupada pelo sistema (IL.225).

Por este procedimento, a inclinação dos módulos torna-se independente das células, mas o sistema fotovoltaico passa a interferir nas aberturas da tela. Este inconveniente pode ser minimizado através de algumas alterações da célula dentro do mesmo conceito, por exemplo, substituindo a base quadrada original, resultante da justaposição de duas células, por um losango. O ângulo menor do losango deverá ser de tal forma que, ao ser inclinada a célula, a orientação do plano que contém o módulo aproxime-se da orientação Norte. Tal posição foi obtida para este ângulo igual a 40°, mantendo-se a mesma inclinação da base (35°).

8.4.1 AJUSTE DA CÉLULA (ESTRATÉGIA 4) PARA SUPORTE DA ESTRATÉGIA 5

A nova tela, resultante da célula composta base-losango, apresenta um alinhamento horizontal que praticamente coincide com a direção Leste / Oeste, com pequeno desvio de 4°. O alinhamento passa pelos vértices laterais das aberturas das células, servindo de eixo referencial para o posicionamento dos módulos (IL.226).

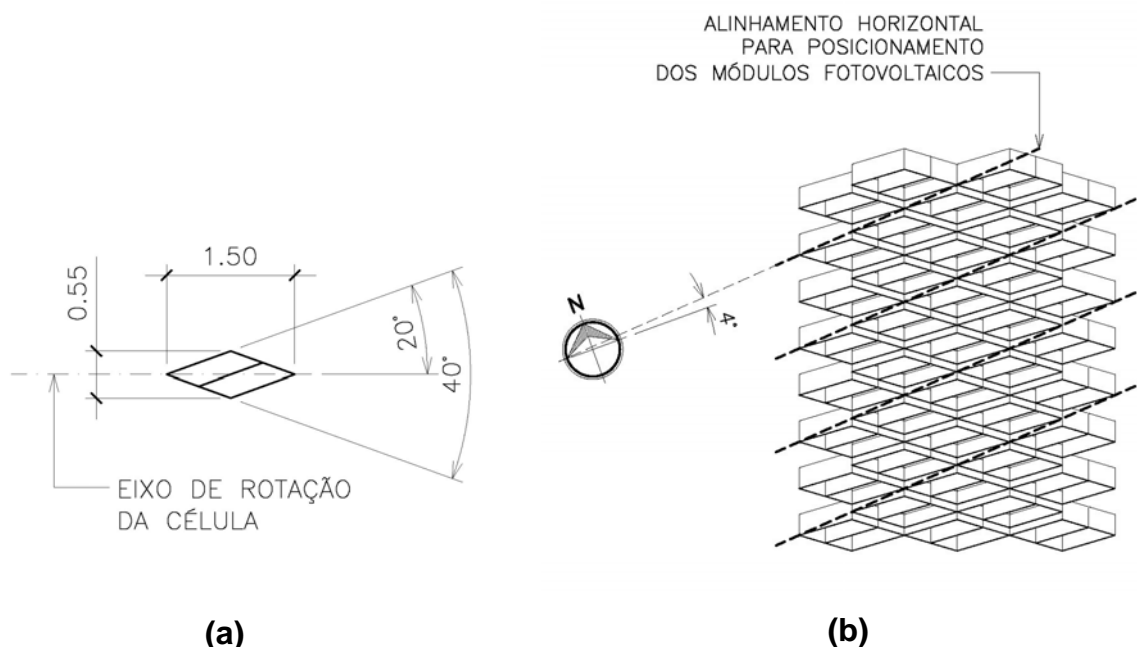


ILUSTRAÇÃO 226 – Ajuste da Célula. (a) Célula em Planta (b) Tela em Planta

Seguindo esse eixo, a inclinação dos módulos torna-se independente das faces da célula. Existem três ângulos recomendados para esta inclinação (CRESESB, 2007b):

- Ângulo 1: igual à latitude;
- Ângulo 2: correspondente à maior média anual da radiação solar;
- Ângulo 3: correspondente ao maior valor mínimo mensal da radiação solar.

O aplicativo SUNDATA v1.0 (GALDINO; GOMES, 2007) calcula a radiação solar média diária mensal no plano horizontal (kWh/m².dia), em todo o território brasileiro, fornecendo os dados para as três localidades disponíveis mais próximas do ponto de interesse. Os valores calculados para o plano horizontal também são convertidos para as três inclinações recomendadas para os módulos fotovoltaicos.

Para a localização de São Paulo, o SUNDATA forneceu os dados das seguintes cidades: São José dos Campos, Taubaté e Tremembé. Além da latitude, os ângulos de inclinação recomendados foram 20° e 30°, respectivamente, para os ângulos 2 e 3.

Optou-se pelo ângulo de 30°, para diminuir a obstrução das aberturas das células pelos módulos fotovoltaicos, melhorando o desempenho do conjunto. Nesta inclinação, a média diária anual da radiação solar foi de 4,63 kWh/m².dia para São José dos Campos e Taubaté, e de 4,58 kWh/m².dia para Tremembé, sendo adotada a média (4,61) como horas de Sol pleno (HSP).

Para evitar a interferência na insolação pelos próprios módulos fotovoltaicos, procurou-se ajustar seu afastamento em função da altura solar. O distanciamento de 1,22 m entre as linhas dos módulos proporcionou um ângulo vertical de obstrução de 26° na direção Norte, permitindo a insolação total das superfícies entre 8:00 e 16:00h na condição mais desfavorável (solstício de inverno). Além disso, o espaçamento entre os módulos sempre deixa uma faixa de células livre de obstrução e, nas células sob os módulos, pode-se retirar a divisão central do losango, pois os próprios módulos fotovoltaicos cumprem sua função, impedindo a penetração solar.

A nova área protótipo de 27,50 m² passou a conter 21 módulos de 85 Wp (1,00 x 0,65m), mostrando melhor aproveitamento do espaço disponível e menor interferência com as aberturas da tela (IL.227).

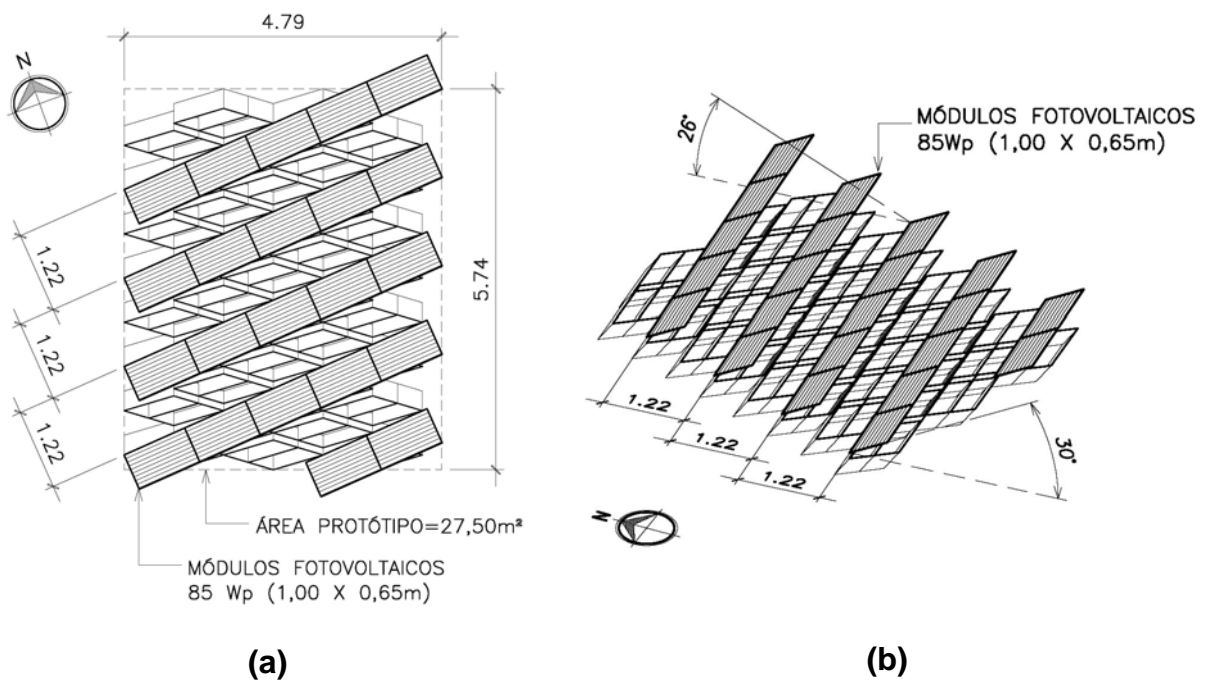


ILUSTRAÇÃO 227 – Estratégias 4 e 5 Ajustadas: (a) Planta (b) Vista Isométrica

A base composta da célula da Estratégia 4 poderá formar outras figuras geométricas para melhor posicionamento dos módulos fotovoltaicos, dependendo da orientação do emboque. É importante observar o resultado da repetição das células, pois algumas figuras geométricas regulares deixam vazios, quando reproduzidas para formar a tela. Entretanto, estes vazios têm geralmente pequena dimensão em relação à célula, sendo mais obstrutivos que essas, quanto à penetração solar.

A incorporação da Estratégia 5 na Estratégia 4 irá normalmente diminuir a eficiência da última, pois deverá obstruir parte da abertura da célula e interferir na refletância das superfícies. Portanto, recomenda-se utilizar este recurso a partir da metade da Zona Limiar, nos estágios onde a luminância passa a decrescer até atingir a Zona de Transição. À medida que se aproxima o portal do túnel, deve-se observar a possível existência de obstruções, como muros de contenção, para o correto posicionamento dos módulos fotovoltaicos. Estes poderão ainda compor um **DAV** no emboque de saída da pista interna, ocupando o canteiro central e contribuindo no sombreamento do entorno do portal de entrada.

8.4.2 ESTRATÉGIA 5: CÁLCULO E DIMENSIONAMENTO

Para estimar o dimensionamento da Estratégia 5, calculou-se a quantidade de módulos necessários para suprir a iluminação diuturna e noturna do Túnel 3 (Pista Externa). Com a aplicação das outras estratégias, eliminou-se a iluminação diurna,

mas a iluminação noturna aumentou, pois o **DAV** passa a ser computado na extensão total do túnel. A TAB.54 mostra as alterações decorrentes da influência das Estratégias 1, 2, 3 e 4 no consumo diário do Túnel 3:

TABELA 54 – Túnel 3: Alteração no Consumo (Estratégias 1, 2, 3 e 4)

	Projeto Original				Projeto Alterado: Estratégias 1, 2, 3 e 4			
	Potência (W) Lâmpada + Perda	Quant.	h/dia	Consumo (Wh/dia)	Potência (W) Lâmpada + Perda	Quant.	h/dia	Consumo (Wh/dia)
Acomodação Visual (Diurno)	440	178	12	939.840	0	0	12	0
Interior (diurno)	440	64	24	675.840	440	64	24	675.840
DAV (noturno)				0	440	24	12	126.720
Total				1.615.680				802.560

O acréscimo no consumo devido à iluminação do **DAV** foi compensado pela redução proporcionada no período diurno, perfazendo uma economia diária da ordem de 800 kWh. Assim, o sistema fotovoltaico deverá suprir apenas a energia para os períodos diurno e noturno, correspondente a 802,56 kWh/dia.

Considerando-se, para análise, duas opções de disposição dos módulos fotovoltaicos (opção 1: base-quadrado conforme a IL.225; opção 2: base-losango conforme a IL.227), e admitindo-se para a cidade de São Paulo 4,61 HSP (horas de Sol pleno), estima-se a quantidade de módulos e a área total necessária para sua instalação. Como a largura total do **DAV** é 19,50m, pode-se obter a extensão ocupada pelo sistema fotovoltaico sobre a cobertura do **DAV** para essas duas opções (TAB.55).

TABELA 55 – Estratégia 5: Cálculo do Sistema Fotovoltaico

Descrição	Quantidade	Unidade	Equação
Consumo Diário (Cd)	802.560	Wh/dia	
Horas de Sol Pleno (HSP)	4,61	h/dia	
Potência Nominal do Módulo (Pm)	85	Wp	
Nº de Módulos (Nm1)	2.048		$Nm1=Cd / (HSP \times Pm)$
Potência Nominal do Sistema (Ps)	174.080	Wp	$Ps=Nm1 \times Pm$
Opção 1: base-quadrado			
Área Protótipo (Ap)	27,08	m ²	
Nº de Módulos por Área (Nm2)	13		
Área Ocupada Total (Ao)	4.266,14	m ²	$Ao=(Nm1 \times Ap) / Nm2$
Largura Ocupada do DAV (Lo)	19,50	m	
Extensão Ocupada do DAV (Co)	218,78	m	$Co=Ao / Lo$
Opção 2: base-losango			
Área Protótipo (Ap)	27,50	m ²	
Nº de Módulos por Área (Nm2)	21		
Área Ocupada Total (Ao)	2.681,90	m ²	$Ao=(Nm1 \times Ap) / Nm2$
Largura Ocupada do DAV (Lo)	19,50	m	
Extensão Ocupada do DAV (Co)	137,53	m	$Co=Ao / Lo$

8.4.3 ESTRATÉGIA 5: ANÁLISE DOS RESULTADOS

Observa-se que a extensão necessária na opção 1 para implantação do sistema fotovoltaico (218,78 m) ultrapassou o comprimento do **DAV** sobre a rodovia aberta (155,00m). Se fosse adotado o ajuste da célula para a base-losango conforme a opção 2, a extensão ocupada passaria a 137,53 m, correspondente a 89% do comprimento total do **DAV**. Como a Estratégia 5 sobre o **DAV** só é recomendada a partir da metade do seu comprimento, em que se inicia a redução das luminâncias até atingir a Zona de Transição, o comprimento aproveitável passa para 77,50 m², não sendo suficiente para compatibilizar integralmente as duas estratégias em nenhuma das opções. É possível aumentar a densidade de módulos por área protótipo até o dobro, o que resultaria em metade das extensões calculadas anteriormente. Este procedimento diminui o rendimento do sistema fotovoltaico no inverno, além de prejudicar o desempenho do **DAV**, mas pode ser uma alternativa perto do portal do túnel. Admitindo ainda como possibilidades de ocupação o emboque de saída da Pista Interna e o canteiro central entre as duas pistas, com largura aproximada de 22,00 m, a implantação do sistema fotovoltaico mostrou-se viável quanto ao espaço disponível, se integradas todas as estratégias.

Pela proximidade da rede elétrica, não haveria necessidade de armazenamento, mas o sistema existente de geração de energia para situações de emergência poderá ser substituído por baterias. A energia excedente do sistema fotovoltaico será entregue à rede, compensando o consumo durante o período noturno.

O posicionamento da Estratégia 5 sobre a Estratégia 4 ajuda a prevenção contra danos nos módulos, por dificultar o acesso aos mesmos. Embora esta característica possa também prejudicar a manutenção, a Estratégia 4 deverá fornecer o suporte necessário para conservação do sistema, prevendo os espaços necessários dentro das exigências de segurança.

A instalação dos módulos sobre a pista poderá apresentar problemas decorrentes do depósito de fuligem proveniente dos gases emitidos pelos veículos. Mesmo considerando a facilidade de limpeza declarada pelos fabricantes, trata-se de uma situação incomum, que deverá ser testada previamente.

A Estratégia 5 é indicada principalmente para regiões não atendidas pela rede elétrica. Entretanto, é sempre recomendável analisar e adotar as demais estratégias como medidas mitigadoras da luminância de véu equivalente, ou provedoras de luz

Capítulo 9: CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre os primeiros aspectos que motivaram a pesquisa, estavam as peculiaridades do objeto e a impressão de um certo paradoxo, que parecia existir na iluminação natural aplicada a túneis rodoviários. Aliás, todo o fenômeno mostrava-se inusitado em relação ao que normalmente se encontra no ambiente construído. O evento causador do processo não é a carência, mas o excesso de luz. A luminância como grandeza fotométrica de referência, o método de cálculo para encontrar os parâmetros de projeto, o observador em movimento e a segurança são características específicas da problemática envolvida na iluminação de túneis. Em tais circunstâncias, pressupôs-se haver condições propícias para identificar inovações no aproveitamento da luz natural, e as hipóteses iniciais foram delineadas neste panorama.

A análise da arquitetura, relacionada à iluminação de túneis rodoviários, revelou um campo do conhecimento desguarnecido, no qual os arquitetos pouco ou nada atuam, por desconhecimento do fenômeno e das possibilidades de intervenção, e que os engenheiros desconsideram, por motivos semelhantes. Os últimos dominam a atividade e, acrescentando a complexidade construtiva envolvida na construção de obras subterrâneas, assumem a questão como um problema de engenharia em essência.

Por outro lado, a iluminação de túneis é um problema de iluminação natural, cujo instrumento de manejo é a concepção do espaço. O termo **Soluções Arquitetônicas**, que aparece no título e na hipótese deste trabalho, mostrou-se adequado por configurar um recurso eficaz e de grande potencial, interferindo sobremaneira nos três requisitos admitidos *a priori*: segurança, eficiência energética e conforto visual.

9.1 SEGURANÇA

O principal propósito da iluminação de túneis é garantir a segurança dos usuários, principalmente no período diurno. Entretanto, avaliar o resultado por este enfoque é difícil, pois, normalmente, não existem dados disponíveis. Os túneis representam um pequeno trecho das estradas, e os dados estatísticos de acidentes dificilmente especificam sua localização. Mesmo quando se identifica um acidente em túnel, a causa não é registrada. Assim, torna-se difícil estimar o custo --benefício e justificar o investimento necessário por este enfoque. Entretanto, os acidentes em túneis podem ser trágicos, o que talvez explique o cuidado observado internacionalmente em sua iluminação. Os maiores incidentes, ocorridos em todo mundo, provocaram a morte de 713 pessoas desde 1995 (FHWA, 2006). Na Europa, acidentes resultando em incêndio no interior de túneis provocaram diversas mortes entre 1999 e 2001:

- Túnel Mont Blanc, entre a França e a Itália, março de 1999, 39 mortes;
- Túnel Túnel Tauern, Áustria, maio de 1999, 12 mortes;
- Túnel Gotthard, Suíça, outubro de 2001, 11 mortes.

No Brasil, não foram encontrados relatos de ocorrências similares em túneis. Tal fato é de surpreender, uma vez que a iluminação é um importante fator de segurança, e tem sido abordado com maior rigor na Europa, e não no Brasil. Entretanto, outros aspectos estão relacionados, como limite de velocidade, quantidade e extensão de túneis por via, volume de tráfego e, além disto, a causa dos acidentes pode não ter relação direta com a iluminação. A importância da iluminação de túneis rodoviários é, então, determinada em função do risco envolvido, devendo proporcionar ao motorista a precisa identificação dos elementos em seu campo visual, para garantir a fluência segura do tráfego em um ponto crítico da via.

O funcionamento do **SAV**, acompanhando as condições da luz natural exterior, favorece a segurança. Os períodos críticos de insolação, que incrementam a Luminância de Véu Equivalente, também aumentam a Iluminância proporcionada pelo **SAV** na Zona Limiar, equilibrando automaticamente o sistema. Além disso, não são necessários os mesmos artifícios de segurança recomendados para o sistema convencional, em caso de interrupção do fornecimento de energia. Assim, a iluminação de emergência serve apenas de balizamento, e a possibilidade de ofuscamento desabilitador, causada pelo Efeito Buraco Negro, fica descartada.

9.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Na Zona Limiar dos túneis do Rodoanel foram utilizadas 164 lâmpadas HPS 400W, resultando no consumo mensal, incluindo as perdas e os períodos de funcionamento, de 27.245 kWh. Dividindo este consumo pela área abrangida por esta zona (15,60 x 60,00m = 936,00 m²), tem-se 29 kWh ./ m² mês, acima do verificado, por exemplo, no consumo mensal por metro quadrado do setor de supermercados de pequeno e médio porte (24 kWh / m² mês)⁶⁰. Considerando o tipo de atividade, tem-se o mesmo nível de iluminação indicado para tarefas prolongadas de elevada acuidade, acima de 3.000 lx, atendendo a uma situação transitória de dirigir, em que o requisito visual é baixo. Portanto, embora o problema do ofuscamento desabilitador em túneis rodoviários possa ser resolvido pela iluminação artificial, existem outras implicações a serem consideradas, como o consumo inadequado à atividade. Intervir nos elementos que provocam o fenômeno está de acordo com a noção de conservação de energia, que não pode ser entendida como uma mera redução de consumo. “O objetivo de um programa de conservação não é simplesmente conservar energia, mas conservar trabalho, porque é este que mede a eficiência da produtividade da energia.” (BERMANN, 2000).

A preocupação com o consumo elevado na Zona Limiar está presente no sistema hoje instalado nos túneis do Rodoanel, por isso a iluminação diurna e diuturna. No final da tarde, a iluminação é ajustada automaticamente, desligando algumas luminárias, para adequar-se ao período noturno. Este momento foi registrado durante as medições no Emboque Jesus (TE-1), com todas as luminárias acesas às 17:00h e, logo a seguir às 17:10h, apenas as luminárias da iluminação diuturna permaneceram acesas (IL.228).



ILUSTRAÇÃO 228 – TE-1: (a) Iluminação Total 17:00h; (b) Iluminação Parcial 17:10h

⁶⁰ IEEUSP/SEBRAE, 2001. p.8.

O projeto luminotécnico do Rodoanel está conforme as recomendações ABNT, já as diretrizes, utilizadas para composição do **Sistema para Adaptação Visual (SAV)**, seguiram as recomendações internacionais selecionadas. Para facilitar a avaliação comparativa de desempenho, aplicaram-se ao **Sistema Convencional**, composto apenas de iluminação artificial, as mesmas recomendações adotadas nas estratégias. O Emboque Gramado (TE-3) Túnel 3 da Pista Externa foi escolhido para esta análise, em que o **Sistema Convencional A** reproduz o projeto luminotécnico do Rodoanel, baseado nas recomendações ABNT, enquanto o **Sistema Convencional B** representa o sistema de iluminação artificial alterado, para atender às recomendações internacionais. Este último serviu de base nesta análise, uniformizando o critério de avaliação (TAB.57 e IL.229).

TABELA 57 – TE-3: Análise do Desempenho Cumulativo das Estratégias

			ABNT		Normas Internacionais					
			Sistema Convencional		SAV - Sistema de Adaptação Visual (Estratégias)					
Consumo Diário (kWh / dia)	Zona	Período	A	B	1	1+2	1+2+3	1+2+3+4	1+2+3+4+5	
	Limiar	Diurno		824	1.605	1.162	887	718		
		Diurno		84	253	253	253	211		
		Noturno						21	95	95
	Transição	Diurno		116	264	148	84	84	11	11
		Diurno		84	127	106	63	63	42	42
		Noturno							21	21
Interior	Diurno		507	127	148	190	211	401	528	
Saída	Diurno			158	158	158	158	158	84	
	Diurno			253	253	253	253	253	127	
	Noturno								63	
Total			1.616	2.788	2.228	1.890	1.721	982	972	
Consumo Mensal		kWh/mês	48.470	83.635	66.845	56.707	51.638	29.462	29.146	
Consumo Anual		kWh/ano	589.723	1.017.562	813.278	689.938	628.267	358.459	354.605	
Variação Percentual *			57,95%	100,00%	79,92%	67,80%	61,74%	35,23%	34,85%	
Potência Instalada		kW	106.480	200.640	154.000	125.840	112.640	52.800	51.920	
Variação Percentual *			53,07%	100,00%	76,75%	62,72%	56,14%	26,32%	25,88%	
Potência de Alimentação		kW	106.480	200.640	154.000	125.840	110.880	43.120	36.960	
Variação Percentual *			53,07%	100,00%	76,75%	62,72%	55,26%	21,49%	18,42%	
Fator de Demanda			1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,82	0,71	

* Variação percentual com base no Sistema Convencional B

A primeira observação evidente é a diferença entre os sistemas convencionais, mostrando uma variação negativa, em torno de 42%, no consumo do **Sistema Convencional A**. Tal fato não representa maior eficiência desse sistema, mas sim uma iluminação inadequada segundo os parâmetros internacionais, devido, principalmente, à menor extensão das diversas zonas de iluminação.

Já na redução gradual proporcionada pelas estratégias do **SAV**, mantém-se o mesmo requisito da iluminação proporcionada pelo **Sistema Convencional B**, resultando em maior eficiência do sistema, quanto ao consumo. Tal aspecto está de

acordo com as formulações de Bermann (2000), pois a redução do consumo advém da conservação de trabalho, sem perdas na qualidade proporcionada.

Com a soma das Estratégias 1, 2 e 3, o consumo aproximou-se do **Sistema Convencional A**. Desta forma, intervenções arquitetônicas possibilitaram adequar a iluminação às recomendações internacionais, com o mesmo recurso da instalação elétrica existente. Como os túneis da Pista Externa são os mais críticos, nos túneis da Pista Interna haverá redução ainda maior do consumo e das instalações, mantendo a conformidade com as recomendações internacionais.

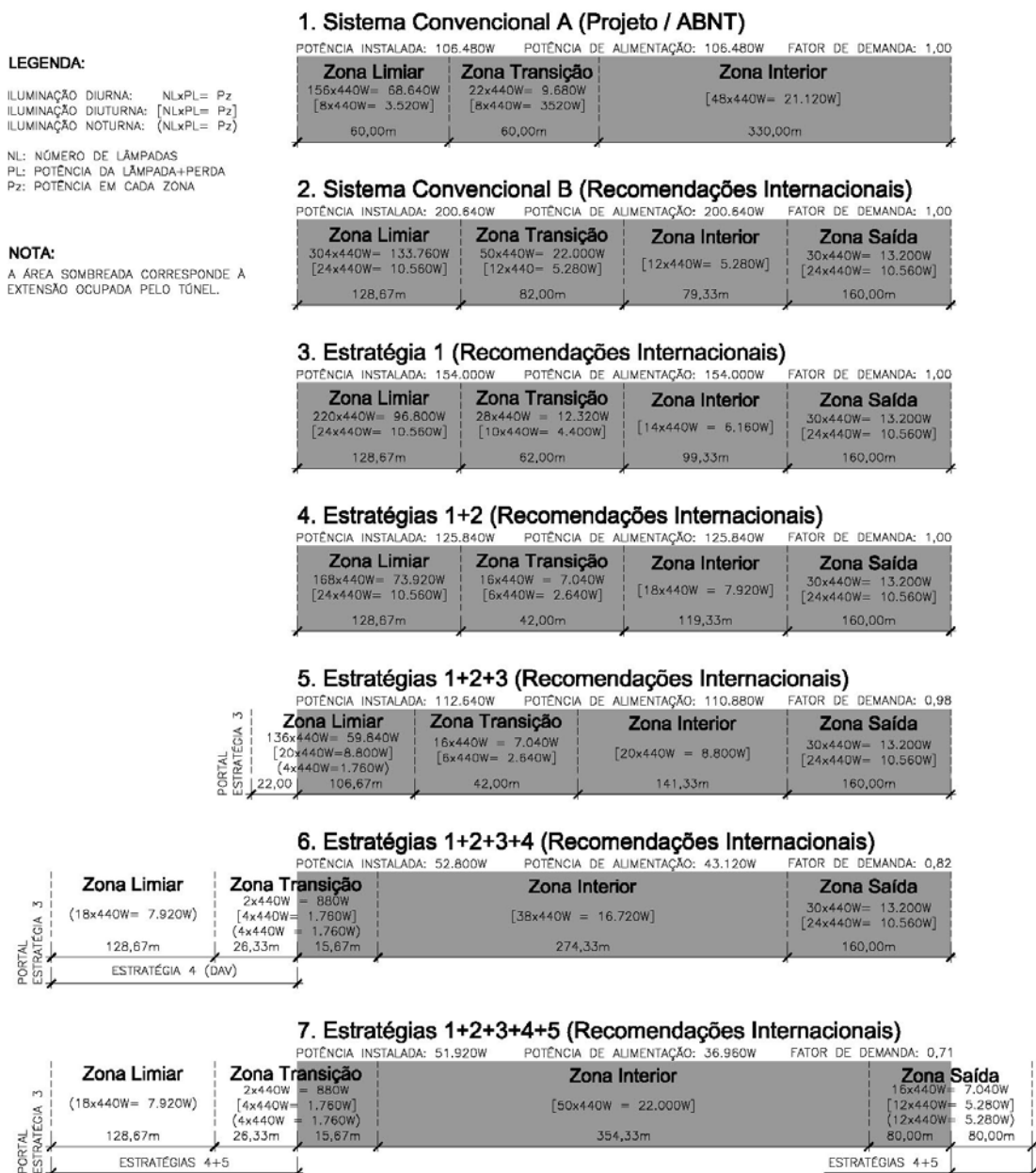


ILUSTRAÇÃO 229 – TE-3: Representação Esquemática dos Sistemas

A Zona de Saída, que não é abordada pela ABNT, apresentou impacto significativo no dimensionamento do sistema, decorrente da extensão e do nível de iluminação necessários.

Com as Estratégias 4 e 5, a redução do consumo e da potência é notória. O avanço sobre a rodovia aberta induz a necessidade apenas de iluminação noturna nessas áreas, deslocando o consumo diurno da Zona Limiar, e parte da Zona de Transição, para um período em que, além do menor nível requerido de iluminação artificial, há mais folga na capacidade de geração de energia, afastando-se do horário de pico. A partir da Estratégia 3, o fator de demanda é menor do que 1, pois a potência instalada passa a ser maior que a potência de alimentação, devido ao deslocamento do consumo, em alguns trechos, para o período noturno.

As representações esquemáticas da IL.229 mostram como atuam os sistemas. A cada estratégia, a Zona Interior é estendida, chegando a ocupar 78,66% da extensão do túnel na Estratégia 5. Desta forma, os trechos mais problemáticos vão sendo lançados para fora do túnel, onde estão os recursos passivos de intervenção. A simples alteração das superfícies, representada pelas Estratégias 1 e 2, já faz este movimento, pois reduz a Zona de Transição e amplia a Zona Interior.

O consumo na Estratégia 5 é suprido pelo próprio sistema, e a aplicação do **DAV**, na Zona de Saída, é necessária por aumentar a área disponível para a instalação dos módulos fotovoltaicos. Esta opção também é válida na Estratégia 4, mas a relação com a conservação de energia é menor, podendo inviabilizar o investimento nesta alternativa.

Em algumas instruções normativas pesquisadas, há menção quanto à iluminação noturna exterior, instalada nas imediações do portal de entrada e de saída. Esta iluminação não tem qualquer relação com a iluminação diurna, não sendo incluída neste estudo. A iluminação noturna tratada aqui diz respeito apenas ao **DAV**, que no período diurno supre a iluminação com luz natural, mas, durante a noite, é incorporado ao túnel, aumentando a extensão servida pelo sistema artificial.

No projeto do Rodoanel, o comprimento da Zona Limiar é 60,00 m. O consumo mensal durante o dia, nesta zona, é igual à soma da contribuição da iluminação diurna ($156 \text{ lâmpadas} \times 440\text{W} \times 360\text{h} = 24.710 \text{ kWh}$) com metade da iluminação diuturna ($8 \text{ lâmpadas} \times 440\text{W} \times 720\text{h} / 2 = 1.267 \text{ kWh}$), resultando em 25.977 kWh/mês. Como o trecho do **DAV** correspondente à Zona Limiar abrange 128,67 m – admitindo a redução no nível de iluminação, que pode ser aplicada a

partir da metade da Zona Limiar até atingir 40% da luminância inicial – o consumo mensal durante o dia passaria, apenas neste trecho, de 25.977 kWh para 51.955 kWh, seguindo as exigências internacionais. Esta seria a economia proporcionada pelo **DAV** durante o dia, em condições equivalentes de exigência. Entretanto, no período noturno, haverá um acréscimo de 128,57 m na extensão do túnel, requerendo 18 lâmpadas adicionais HPS 400W, com o consumo mensal de 2.851 kWh, incluindo a perda de 40W por lâmpada. Este deverá ser deduzido de 51.955 kWh/mês, resultando na economia de 49.104 kWh/mês⁶¹.

Em relação à Estratégia 5, a integração com as demais estratégias foi um recurso imprescindível para viabilizar sua aplicação. No caso estudado na seção 8.4, admitindo apenas a Estratégia 5, o sistema fotovoltaico necessitaria suprir o consumo diário de 1.615 kWh em vez de 802 kWh (TAB.54). Respeitando as recomendações internacionais, o consumo sobe para 2.788 kWh/dia, de acordo com o **Sistema Convencional B** (TAB.57).

Nestas condições, mesmo duplicando o número de módulos pela área modular, a área total ocupada passaria a 1,74 da anterior, elevando em 3,47 vezes a potência nominal do sistema.

Na TAB.58, a **Alternativa A** se refere ao cálculo já apresentado para a Opção 2 da TAB.55, estimando a dimensão da Estratégia 5 quando integrada às demais estratégias, e a **Alternativa B** exclui a contribuição das Estratégias 1, 2, 3 e 4.

TABELA 58 – Análise Comparativa: Alternativa A x Alternativa B

Descrição	Alternativa A Quantidade	Alternativa B Quantidade	Unidade	Varição Alt.B / Alt.A
Consumo Diário (Cd)	802.560	2.788.000	Wh/dia	3,47
Horas de Sol Pleno (HSP)	4,61	4,61	h/dia	
Potência Nominal do Módulo (Pm)	85	85,00	Wp	
Nº de Módulos (Nm1)	2.048	7.114		3,47
Potência Nominal do Sistema (Ps)	174.080	604.690	Wp	3,47
Área Protótipo (Ap)	27,50	27,50	m ²	
Nº de Módulos por Área (Nm2)	21,00	42,00		2,00
Área Ocupada Total (Ao)	2.681,90	4.657,98	m ²	1,74

O acréscimo na dimensão do sistema, adotando a **Alternativa B**, confirma a importância de integrar as estratégias para otimizá-lo. De fato, a concepção do **SAV**

⁶¹ No APÊNDICE A consta uma análise simplificada de custos para a iluminação da Zona Limiar comparando o Dispositivo para Adaptação Visual (DAV) e o Sistema Convencional (SC).

parte dessa premissa, e as estratégias nele contidas são gradualmente complementares. Para o preço do Wp em torno de US\$6.00⁶², o custo da **Alternativa A** seria US\$1,044,480.00; enquanto o da **Alternativa B** seria US\$3,628,140.00.

Incluindo a área necessária e o impacto ambiental para implantação do sistema, a aplicação isolada da Estratégia 5 se mostrou inadequada, uma vez que a Estratégia 4 supre com vantagens a iluminação diurna, período de maior consumo, e as Estratégias 1, 2 e 3 permitem reduzir sensivelmente, nesse mesmo período, e a um custo significativamente menor, a iluminação necessária na Zona Limiar.

Curiosamente, na Arábia Saudita – o único exemplo real encontrado, aplicando o sistema fotovoltaico em 13 túneis rodoviários⁶³ – a Estratégia 5 foi implantada isoladamente (ERI; KACST, 2003, p.82-8). Mesmo sem ter acesso a detalhes do projeto, e baseando-se no consumo adotado por metro de via, entre 25 e 35 W, a iluminação parece ter sido dimensionada para suprir apenas a Zona Interior. Comparando este dimensionamento com o projeto luminotécnico dos túneis do Rodoanel, a Zona Interior possui duas lâmpadas de vapor de sódio de 400 W a cada 15,00 m, resultando em 58,7 W por metro, incluindo as perdas (40W por lâmpada). Como existem 4 faixas de rolamento no Rodoanel contra 2 faixas nos túneis da Arábia Saudita, o consumo por metro do primeiro, a cada duas faixas, passa para 26,5 W, dentro do intervalo de consumo admitido no segundo.

A suposta inexistência das zonas nesses túneis poderia ser atribuída às suas extensões, que em geral estão abaixo de 200,00 m, ou ao traçado da via, que na imagem do artigo mostra um túnel em reta, com visualização do portal de saída. Outra possibilidade seria a inviabilidade de atender às diversas zonas pelo sistema adotado, optando-se por um mínimo aceitável, mas o artigo frisa a necessidade de mais iluminação na entrada dos túneis, e também cita a Zona de Transição. Conclui-se que, embora as zonas de iluminação tenham sido abordadas, todo o sistema foi dimensionado para valores mínimos, ou abaixo dos normalmente adotados internacionalmente, distribuindo as perdas nos diversos trechos. Outros elementos, como a refletância das superfícies e a pequena extensão de alguns túneis, podem

⁶² Existem grandes variações nos valores tomados como referência para estimar o preço do Wp. O valor adotado de US\$6.00 baseou-se em dados do mercado nacional, aplicando uma redução de 25% devido à grande quantidade que estaria envolvida no empreendimento. Esse valor aproxima-se do preço do Wp do sistema fotovoltaico implantado na Arábia Saudita (ERI; KACST, 2003).

⁶³ Ver seção 4.3.3.

ter contribuído para adequar a iluminação, compensando a maior necessidade dos túneis mais longos.

O custo para implantação do sistema fotovoltaico, envolvendo treze túneis com extensão total de 3.548,00 m, foi de US\$ 4.1 milhões, com potência nominal de 732.000 Wp⁶⁴. O principal argumento que justificou a alternativa foi a dificuldade de atingir o local pela rede elétrica, devido ao relevo montanhoso, mas o investimento poderia ser reduzido, se utilizadas as outras estratégias, principalmente a Estratégia 4 para suprir a Zona Limiar.

9.3 ARQUITETURA E CONFORTO VISUAL

A relevância de qualquer tema depende da conjuntura em que está inserido. As condições impostas para a construção de túneis representam exigências para a engenharia que, não sem motivo, expõe certo orgulho e uma velada vaidade ao celebrar a conclusão dessas obras, repletas de desafios para os profissionais. Na fase final deste trabalho, dia 12 de janeiro de 2007, a cidade de São Paulo conheceu uma tragédia na obra da Estação Pinheiros / Linha 4 do Metrô, resultado do desmoronamento parcial, do poço de 40 m de diâmetro, que dava acesso aos túneis. À parte as falhas de diversas ordens que causaram o desastre, o lamentável fato revela as dificuldades ainda relacionadas a esse tipo de obra, mesmo com toda a tecnologia disponível.

Nesse contexto, incluindo as divergências clássicas, e por vezes saudáveis, entre arquitetura e engenharia, é difícil incorporar no elenco de atribuições, a que as obras de túneis devem satisfazer, temas como estética e conforto visual. Quando Schreuder (1964) trata da estética, parece advertir quanto à subordinação desta aos requisitos utilitários da construção, como se a contribuição estética estivesse restrita ao ornamento e intervenções superficiais, que, segundo ele, são até toleradas, se não prejudicarem a funcionalidade da obra. De maneira semelhante, a abordagem do conforto visual é dificultada, uma preocupação fora de propósito em um empreendimento com outras prioridades.

Espera-se que tenha ficado claro, no decurso deste trabalho, a necessidade de incorporar as Soluções Arquitetônicas na fase de projeto, e que estas não se resumem a arremedos, mas contribuem no resultado da obra em diversas instâncias. O mesmo equívoco de que se queixa Schreuder – quanto ao concreto

⁶⁴ Por esses dados, o preço do Wp foi de US\$ 5.60.

ornamental de cor clara aplicado na fachada do túnel Velsen – pode ser observado em diversos túneis, sem qualquer preocupação estética, pela mera falta de preocupação com a refletância dos materiais e com sua importância no **Efeito Buraco Negro**. Em outras palavras, não foi a estética que prejudicou o resultado no túnel Velsen, mas a incompatibilidade das decisões de projeto, as quais, por vezes, ocorrem desarticuladas e configuram conflitos, nem ao menos discutidos previamente entre as equipes envolvidas, e acabam ficando evidentes, e permanentes, no resultado pós-obra.

As estratégias propostas para concepção do **SAV** trabalham em sintonia com os requisitos do projeto luminotécnico, e a intervenção arquitetônica passa a ser definida por estes requisitos. Esta peculiaridade leva a um processo de projeto incomum, em que o programa de necessidades não está relacionado à utilização do espaço, mas à acuidade visual. Pelo tempo disponível para ocorrer a adaptação visual, em uma faixa ampla de luminâncias, o olho humano é solicitado no limite de sua percepção, e a sensação de desconforto é quase inevitável. Entretanto, pela pequena duração do processo e rara ocorrência em toda a via, tal sensação é minimizada, mas a identificação de um objeto-crítico, mesmo nesse pequeno período, precisa estar garantida.

Nessas condições, diminuir a faixa de luminâncias que provocam o problema, favorece a percepção e, conseqüentemente, o conforto visual. Iniciando por soluções simples, as estratégias apresentaram resultados eficientes, atuando na causa do fenômeno, nível e extensão das zonas de iluminação em tal grau que foram tomadas como pré-requisito na especificação dos materiais.

A partir da Estratégia 3, aumentam-se a qualidade, dimensão e complexidade construtiva. Nesse grupo, o **DAV**, Estratégia 4, contém a essência do objeto da pesquisa, e respondeu não só às exigências de iluminação, mas conseguiu adequar-se a outras condicionantes, devido à versatilidade resultante da Adaptação do Método de Swierstra. O conceito que envolve a célula à prova de penetração solar formando uma tela, contém diversos recursos que não foram esgotados aqui. De fato, como na natureza, a célula pode se adaptar à forma de qualquer organismo. Quando surgiu a necessidade de compatibilizar as Estratégias 4 e 5, a tela proporcionou o suporte necessário para receber os módulos. Assim como correspondeu às rígidas exigências de orientação do sistema fotovoltaico, com uma

pequena alteração da célula, poderá adequar-se a qualquer relevo ou superfície, com liberdade na conformação da envoltória.

Outro aspecto a ser observado é a preservação do meio ambiente, uma qualidade importante associada a obras subterrâneas,:

O que a maioria das pessoas menciona como uma linda vista, os engenheiros de túneis, geólogos e empreiteiros vêm como um desafio a ser superado e também a ser preservado. Muito antes de a palavra “sustentabilidade” ser criada, os túneis no Brasil já contribuíam para a sustentabilidade do ambiente rural e urbano, de fato desde 1860. (PARKER In: CBT, 2006, p.11)

De maneira geral, as estratégias potencializaram esta qualidade, tanto pela diminuição do consumo como pela restauração do meio ambiente. Entretanto, o **DAV** é um elemento significativo que passa a integrar a paisagem, o que poderá ser um aspecto negativo em áreas com maior rigor de proteção. Como sua implantação é sobre a pista de rolamento, ou seja, uma área já descaracterizada do ambiente, esta deficiência é minimizada, embora continue evidente a maior interferência na paisagem proporcionada pelo **DAV**. Se estiver integrado aos projetos de engenharia, algumas contenções do emboque poderão ser incorporadas pela obra, restituindo parte do relevo natural e diminuindo o volume afetado. No meio urbano, é freqüente a existência de túneis em depressão, o que torna possível a implantação do dispositivo com menor interferência, pelo aproveitamento dos muros laterais do emboque. Por fim, agregar a Estratégia 5 na Estratégia 4 reduziu sobremaneira a área abrangida pelo sistema fotovoltaico que, assim como o **DAV**, foi implantado sobre a pista de rolamento, diminuindo o impacto ambiental.

As Cinco Estratégias mostraram diversos aspectos da interação do desempenho luminoso com a concepção do espaço. Por vezes, a intervenção arquitetônica só é entendida como tal, quando constitui um espaço tridimensional, atribuindo uma categoria inferior a intervenções tipo revestimento de superfícies. Por este enfoque, a Estratégia 1 não deveria estar incluída na mesma categoria das demais, e o termo Soluções Arquitetônicas não seria aplicável nesse caso. Entretanto, na Estratégia 1 está o âmago do fenômeno que rege a iluminação de túneis, e esta não pode ser vista aqui como um artifício menor, relacionado a uma maquiagem introduzida para contornar problemas de projeto. Aliás, é muitas vezes dela que depende a eficiência do sistema, o que foi observado no túnel Thorold, em que o resultado formal parece correto para o aproveitamento da luz, mas o revestimento prejudicou, ou até neutralizou seu desempenho.

Um exemplo deste conceito em arquitetura está nos poços de iluminação da Casa Batlló de Gaudí (IL.230). O revestimento cerâmico vai mudando de intensidade, do azul mais escuro, na parte superior onde a luz é mais intensa, até o azul quase branco ao se aproximar do pavimento térreo. Desta forma, a iluminação natural é distribuída quase por igual (GÜELL, 1994, p.132). A dimensão das aberturas também varia em relação direta com a profundidade do poço, incrementando gradualmente a penetração da luz no ambiente, à medida que esta se torna mais escassa.

A solução não é tão intuitiva quanto possa parecer, mas mostra um pouco da genialidade de Gaudí e seu preciso conhecimento do comportamento da luz. Relacionando este exemplo com a iluminação dos túneis do Rodoanel, nota-se a preocupação em intensificar a luz nas proximidades da entrada do túnel, pela fileira adicional sobreposta à linha de luminárias (IL.231). Curiosamente, no projeto luminotécnico, esta linha adicional estava localizada a partir do alinhamento do portal, coincidindo com as primeiras luminárias, mas na obra foram posicionadas um pouco mais adentro, mostrando a preocupação, *in loco*, de corrigir ou melhorar o resultado.



ILUSTRAÇÃO 230 – Casa Batlló: Poço de Iluminação
FONTE - CARMEL-ARTHUR, 2000, p.69



ILUSTRAÇÃO 231 – TE-2 Emboque Parque Imperial: Vista Próxima ao Portal

A refletância do revestimento interior é maior perto da entrada do túnel e, mesmo não tendo sido intencional, fruto de preocupações com a iluminação, tal aspecto nada favorece a iluminação, podendo até prejudicar pelo aumento da luminância de véu equivalente. Assim, tanto as lâmpadas adicionais como a refletância mais elevada deveriam estar afastadas do portal, intensificando a luz nas regiões mais distantes da entrada, desprovidas de luz natural.

A diferença de equilíbrio na intensidade da luz nesses dois exemplos é notável, mesmo considerando as distorções das imagens fotográficas, que não correspondem à percepção do olho humano e nem foram obtidas com a mesma câmera. O movimento contrário das refletâncias em relação ao caminho da luz na IL.230 compensa parcialmente as perdas, melhorando a percepção visual em toda extensão do poço. Se aplicada no interior de túneis rodoviários, a proposta de Gaudí teria efeito semelhante, com uma característica adicional proporcionada pela dinâmica do observador. Desde que não desvie a atenção do motorista, a composição visual é livre, utilizando a paginação de pequenos elementos como na casa Batló, ou faixas paralelas com regiões entremeadas, resultando num *dégradé* que compense a luminância das superfícies, mostrando como o ornamento também pode servir a propósitos técnicos.

9.4 CONCLUSÕES E PROPOSTA DE PESQUISAS PARA DESENVOLVIMENTO FUTURO

Para compreender o objeto de pesquisa, foi necessário percorrer por campos do conhecimento pouco usuais ao arquiteto, com características incomuns no ambiente construído. Esta trajetória teve seus momentos de conflito e tensão, como parece natural ao desenvolvimento em qualquer esfera do conhecimento. Em determinado estágio da pesquisa, configurou-se uma segunda extensão do objeto, abrangendo espaços de transição em arquitetura. Por ampliar muito o recorte do objeto, a segunda extensão foi descartada, mas pode-se notar sua influência em alguns instantes deste trabalho. De fato, é praticamente impossível a um arquiteto restringir a discussão ao emboque de túneis, ainda mais com resultados que extrapolaram o contorno do objeto da pesquisa, fornecendo elementos e ferramentas com possibilidades de utilização em todo ambiente construído e ampliando a aplicação prática do estudo. Alguns destes aspectos são retomados mais adiante, como sugestão para pesquisa futura.

Analisando os resultados obtidos, conclui-se que:

- Trabalhando em correspondência com a disponibilidade de luz natural, o **SAV**, englobando até a Estratégia 4, proporcionou um ajuste intrínseco que favoreceu a Segurança e o Conforto Visual, acomodando a iluminação numa faixa mais ampla, que acompanha a sazonalidade da luz natural e atende ao requisito de projeto como valor mínimo desta faixa;

- Em relação à Eficiência Energética, as zonas de iluminação mostraram-se sensíveis às estratégias, reduzindo significativamente a potência instalada e o consumo, deslocando ainda a potência de alimentação do horário de pico;
- A importância das instruções normativas na prática brasileira revelou a urgência de uma revisão no Projeto de Norma ABNT **P-NB-318**, utilizando novos parâmetros, para corrigir a condição atual em que se encontra a iluminação de nossos túneis. A rigidez nas recomendações ABNT, sem correspondência com a teoria adotada internacionalmente, leva a procedimentos que desconsideram as condicionantes específicas de cada caso, e também os recursos passivos para reduzir o consumo e a demanda. Sendo assim, para estar conforme a ABNT, não importam os instrumentos e providências disponíveis para controlar o potencial das fontes de ofuscamento nos emboques de túneis. A alta refletância da pista de concreto no Rodoanel – necessitando que as faixas brancas de sinalização recebam uma borda preta para se tornarem visíveis – confirma a falta de preocupação com as superfícies ofuscantes na Zona de Aproximação;
- Comparada ao sistema de iluminação existente no Rodoanel, a aplicação das estratégias reduziu a dimensão das instalações, a demanda e o consumo, mesmo aumentando os requisitos da iluminação, devido ao atendimento às recomendações internacionais;
- A Estratégia 4 (**DAV**), tomada como o argumento principal do **SAV**, atendeu aos requisitos de desempenho e execução, configurando um sistema construtivo versátil, para se adaptar às exigências de implantação e integração com as demais estratégias. A célula à prova de penetração solar proporcionou a iluminação necessária, com a uniformidade adequada no plano da pista, mesmo quando atingiu níveis elevados;
- Pelas primeiras aproximações, o retorno do investimento até a Estratégia 4 ocorreria no período de 1,72 ano⁶⁵. Embora o cálculo não tenha a precisão necessária, pois alguns parâmetros são de mais de uma década, o resultado serviu como uma referência inicial favorável à viabilidade da obra. Além disso, outras benfeitorias relacionadas à segurança, impacto ambiental e otimização do sistema devem ser consideradas nesta avaliação;

⁶⁵ Ver Apêndice A

- A Estratégia 5 (Módulos Fotovoltaicos), se incorporada às demais estratégias, pode ser uma alternativa viável, principalmente em regiões desprovidas de energia elétrica. De qualquer forma, prever sua instalação futura é sempre recomendável, pois a viabilidade do sistema fotovoltaico pode ser atingida com a redução do custo do Wp, o que tem sido uma tendência do mercado;
- O **SAV** pode ser implantado como medida corretiva em obras existentes, mas, quando introduzido nas fases iniciais de concepção, interage com os diversos projetos de engenharia, proporcionando melhor resultado a um custo menor;
- A luz como prerrogativa do projeto arquitetônico mostrou uma nova postura na concepção do espaço. A troca do programa de uso pelos rigores da iluminação necessária no **SAV** favoreceu testar os limites de aproveitamento qualitativo e quantitativo da luz natural, com rebatimento no resultado arquitetônico;
- O traçado de máscaras pela Adaptação do Método de Swierstra otimizou o aproveitamento da luz natural difusa. Este procedimento pode ser aplicado a qualquer inclinação do plano e a qualquer orientação, ampliando a aplicação do método, para compor dispositivos de proteção e reflexão da luz solar direta em fachadas e coberturas.

Este trabalho apresentou uma metodologia para otimizar a iluminação de túneis, e os resultados estão baseados em medições tomadas em um único dia, próximo ao solstício de inverno. Mesmo admitindo esta situação como crítica, devido à maior incidência solar nas imediações do portal em alguns emboques, a amostragem é muito pequena. Este fato não prejudicou os resultados, pois os valores de referência foram checados com medições efetuadas em todo o mundo, e mostraram-se coerentes. Entretanto, a maior precisão das medições é fundamental para aprofundar o estudo das estratégias, o que não foi possível devido aos recursos disponíveis para a pesquisa. Desta forma, enumeram-se a seguir algumas sugestões para desenvolvimento futuro:

- Programa de medições em emboques de túneis rodoviários, registrando as luminâncias das superfícies do entorno do portal nas condições de céu claro, em todo o território brasileiro durante os solstícios e equinócios. A extensão

deste trabalho, que pode desencorajar qualquer iniciativa nesse sentido, já deveria estar em andamento, se fossem atendidas as recomendações internacionais. Novamente, reforça-se a importância da revisão do Projeto de Norma ABNT, pois, a partir daí, seria de interesse das próprias empresas gerenciadoras de estradas a coleta destes dados, o que comporia, gradualmente, uma base primária confiável para aplicação da metodologia apresentada, para cálculo, concepção e dimensionamento do sistema de iluminação;

- Ensaios utilizando modelo físico em escala reduzida, para analisar o desempenho do **DAV**. O ensaio deve ser dinâmico, buscando simular as condições reais do fenômeno, semelhante aos estudos elaborados por Schreuder (1964, p.96-104);
- Estudo detalhado do efeito da penetração solar pela tela de cobertura do **DAV**, analisando os resultados e limites deste recurso na Zona Limiar do túnel. A intermitência, dimensões das aberturas e sua influência na Zona de Transição devem ser analisadas, para verificar as reais possibilidades de utilização desta recomendação, recentemente adotada pela CIE (2004).

Os desdobramentos que foram observados durante o trabalho, ampliando o alcance da aplicação dos resultados para todo o ambiente construído, mostraram muito trabalho por fazer, com possibilidade de abrir diversas frentes de pesquisa, destacando-se os seguintes aspectos:

- Da Adaptação do Método de Swierstra e da célula resultante, decorrem diversas possibilidades de aplicação a serem desenvolvidas para o espaço construído. Assim como a célula é definida em função de seu posicionamento, o posicionamento pode ser definido em função da célula. Este aspecto possibilita a utilização de produtos de linha encontrados no mercado, como telas e *brises*, com implicações econômicas e funcionais que favorecem a execução da obra. A célula pode ainda assumir dimensões e forma compatíveis com a produção industrial, configurando telas ou elementos modulares para fabricação em série. Desta forma, diversas aplicações são identificadas na construção civil, como a cobertura de galpões, pavilhões, ou como elemento de proteção da radiação solar direta em espaços abertos ou

confinados. Acrescenta-se que a célula não precisa necessariamente compor uma malha. Por exemplo, a solução para iluminação zenital adotada por Aalto na Biblioteca “Viipuri”, pode ser adaptada para outras latitudes, através da Adaptação do Método de Swierstra, com resultado semelhante, se aplicada a inclinação adequada ao poço dos domus ou ao plano de sua base (IL.232).

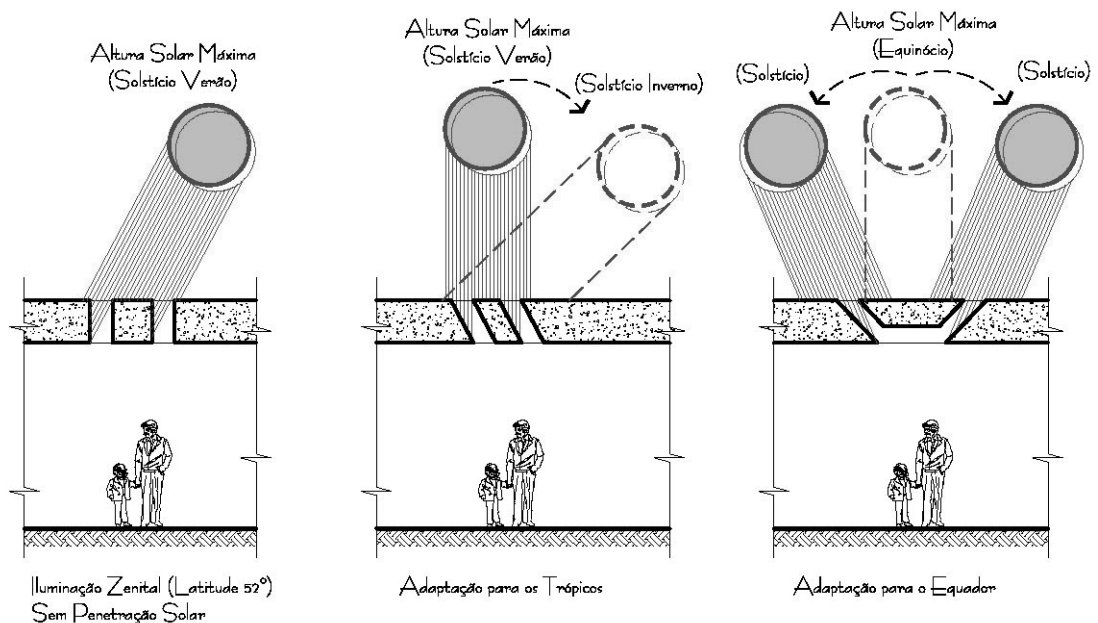


ILUSTRAÇÃO 232 - Adaptações da Iluminação Zenital

- O conceito da **célula à prova de penetração solar**, condição adotada quando é aplicado ao **DAV**, pode ser estendido para **células de controle da penetração solar**. Passa-se, então, a dosar a penetração da luz natural direta, oferecendo obstrução total ou parcial conforme convenha. Determinam o funcionamento da célula, depois de definida a geometria da base, a inclinação e a altura. Se fixarmos a altura, variando apenas a inclinação da base, identificam-se dois critérios para tratamento da luz natural: o primeiro permitindo a penetração solar, alterando a eficiência da célula para parcial; o segundo mantendo a eficiência total de obstrução da penetração solar, mas aumentando a obstrução da luz natural difusa no plano horizontal. O mesmo ocorre variando apenas a altura e mantendo fixa a inclinação. Este fato oferece diversos recursos de projeto a serem pesquisados:

1. A célula repetida não precisa ser necessariamente igual. Variando a inclinação da célula e adotando a eficiência total da obstrução solar

- como critério, ocorrem diferentes gradientes de luz no ambiente, podendo-se tirar partido disto para a composição arquitetônica (IL.233);
2. O aproveitamento da luz natural e o controle da insolação têm correspondência direta com o conforto térmico e a conservação de energia. A luz natural difusa apresenta eficácia luminosa comparável às lâmpadas de maior eficiência do mercado, como as de vapor de sódio, mas sem apresentar os inconvenientes desta, relacionados ao rendimento cromático. Nas lâmpadas de vapor de sódio, a eficácia luminosa atinge 130 lm/W (alta pressão) e 180 lm/W (baixa pressão). Já a eficácia luminosa difusa do céu claro e encoberto está entre 100 e 145 lm/W (PEREIRA, 1994, p.218). Além disso, com o controle proporcionado pela célula, pode-se sombrear ou deixar a luz direta permear pela tela, fornecendo condições para implantação de jardins ou espelhos d'água e provocando a movimentação do ar, para o aquecimento ou resfriamento passivo do edifício;
 3. A tela idealizada como um elemento vazado pode receber fechamentos transparentes ou translúcidos, formando uma cobertura estanque. Sua conformação também possibilita definir aberturas para ventilação independentes da iluminação, utilizando as faces de obstrução. Desta forma, evitam-se inconvenientes, por vezes encontrados em tipologias convencionais tipo *shed*, quando a melhor orientação para a iluminação não é compatível com a melhor orientação para a ventilação;
 4. Uma tela horizontal de eficiência total pode ser inclinada, arredondada ou torcida, com diferentes resultados na luz, insolação do ambiente e na arquitetura. Definem-se as regiões e períodos em que o Sol deve penetrar, os ambientes introspectivos, as áreas de convivência e circulação, os momentos de destaque, resguardo deste ou daquele elemento, resultando num jogo de luz que cria cenários difusos ou dramáticos, e a tela será moldada, para atender a tais requisitos: a luz define a arquitetura.

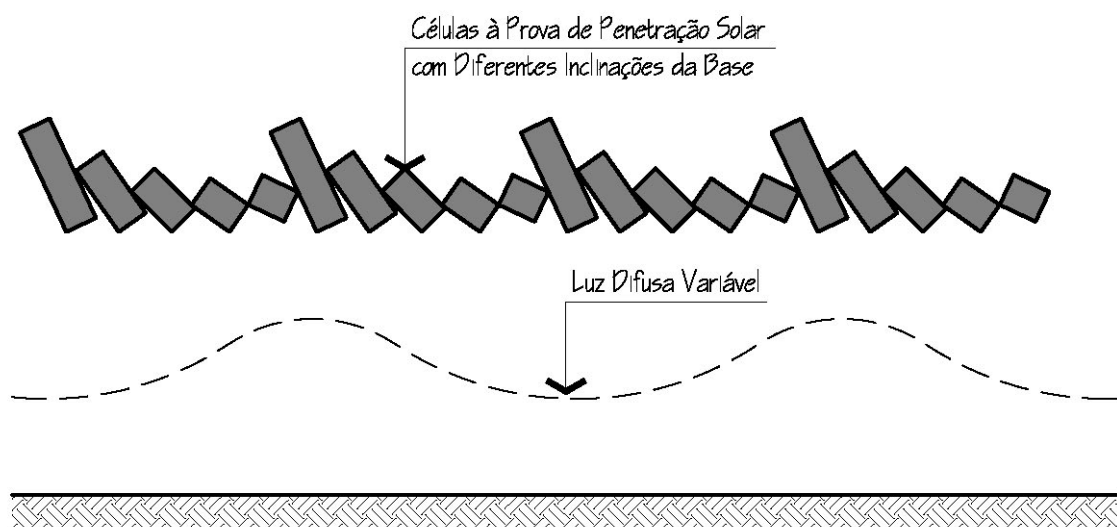


ILUSTRAÇÃO 233 – Variações da Luz Difusa com a Inclinação da Célula

Já no início deste trabalho, quando ocorreram os primeiros contatos com técnicos e especialistas de áreas afins, ficava uma pergunta subentendida que, de alguma forma, acompanhou todo este percurso: o que um arquiteto, preocupado com iluminação natural, estaria fazendo (ou se intrometendo) em iluminação de túneis rodoviários?

Realmente, à primeira vista, a noção de túnel contém a negação da luz natural e também da arquitetura. Alguém poderá discordar, principalmente quanto à arquitetura, citando obras subterrâneas com valor arquitetônico, mas, no caso de túneis rodoviários, é uma obra subterrânea extremamente utilitária, em que o rigor forma-função poderia aborrecer até um ferrenho arquiteto modernista.

Ficou claro, durante a pesquisa, que a problemática envolvida na iluminação de túneis é crítica durante o dia, provocada pela luz natural. Aqui começa a antítese do tema tratado, pois a luz natural, normalmente tida como solução para a iluminação do ambiente, passa a ser a causa do problema. Como o tratamento da

luz natural, no ambiente construído, é uma questão de arquitetura, há de se encontrar uma maneira de intervir no espaço e na luz. E foi assim, meio às avessas, que um tema tão controverso mostrou-se fascinante, repercutindo ainda em diversas áreas correlatas.

As **Soluções Arquitetônicas**, extrapoladas do **DAV**, ampliaram a aplicação dos resultados da pesquisa. Neste raciocínio, não só a eficiência energética é fundamental, mas as relações dos elementos na composição do espaço, com implicações que vão além de avaliações quantitativas. Os elementos, que podem controlar e dosar a iluminação com extremo rigor, também interagem com a forma e as cores, em nuances dinâmicas características da luz natural. As possibilidades de expressão e bem estar que daí decorrem superam os índices de conforto, aproximando-se da dimensão mais complexa que envolve as sensações humanas e a arquitetura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **P-NB-318: Iluminação de Túneis**. Rio de Janeiro, 1976. 10 p.
- ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-1. Iluminação Natural – Parte 1: Conceitos Básicos e Definições**. Rio de Janeiro, 2005. 5 p.
- ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-2. Iluminação Natural – Parte 2 – Procedimentos de Cálculo para a Estimativa da Disponibilidade de Luz Natural**. Rio de Janeiro, 2005. 17 p.
- ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-3. Iluminação natural – Parte 3 – Procedimento de Cálculo para a Determinação da Iluminação Natural em Ambientes Internos**. Rio de Janeiro, 2005. 33 p.
- ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-4. Iluminação Natural – Parte 4 – Verificação Experimental das Condições de Iluminação Interna de Edificações – Método de Medição**. Rio de Janeiro, 2005. 13 p.
- ADRIAN, W. **A Method for the Design of Tunnel Entrance Lighting**. Journal of the IES. winter 1990. p. 125-33.
- ADRIAN, W. **Investigations on the Required Luminance in Tunnel Entrances**. Lighting Research & Technology, v.14, n.3, 1982. p. 151-9.
- ALEXANDER, G. A.; HOBSON, R. C.; McKNIGHT, S.W. **Lighting the New Four-Line Highway Tunnel at Thorold, Ontario**. Journal of the IES. March 1970. p. 163-171.
- ALUCCI, M. P. **Conforto Térmico, Conforto Luminoso e Conservação de Energia Elétrica**. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992. 224 p.
- ALUCCI, M. P. **Climaticus**. Versão 1.0. São Paulo, 2003.
- ALUCCI, M. P. **Lux**. Versão 2.0. São Paulo, 2005.
- ALUCCI, M. P. **Vidros e Policarbonatos na Arquitetura**. CECACE-FUPAM, São Paulo, 2001. p.56-71.
- AMORIM, C. N. D. **Iluminação Natural e Eficiência Energética – Parte II Sistemas Inovadores para a Luz Natural**. In: Paranoá: Cadernos Eletrônicos de Arquitetura e Urbanismo, v.4, 2002. 9 p. Disponível em <<http://www.unb.br/fau/>> Acesso em: 12 jun. 2006.
- ANDER, G. D. **Daylighting Performance and Design**. New York: VNR, 1995. p.74.

ANSI / IESNA - AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE / ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. **RP-22-96: American National Standard Practice for Tunnel Lighting**. New York, 1996. 31 p.

ANSI / IESNA - AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE / ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. **RP-22-05: American National Standard Practice for Tunnel Lighting**. New York, 2006. 41 p.

ANTAC, **Anais do VI Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído e III Encontro Latino Americano sobre Conforto no Ambiente Construído. – ENCAC 2001**. São Pedro, 2001.

BACHELARD, G. **A Filosofia do Não**, In: Bachelard, (“Os Pensadores”), São Paulo: Abril S.A. Cultural, 1984. p.1-87

BARDI, P. M.. **Lembrança de Le Corbusier – Atenas, Itália, Brasil**. São Paulo: Nobel, 1984. p. 57-69

BENÉVOLO, L. **História da Arquitetura Moderna**. São Paulo: Perspectiva, 1976. p.39;720-9

BERKELEY LAB; MARINSOFT. **Desktop Radiance 2.0 Beta**. Marinsoft, Inc and Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001

BERMANN, C. **Ensino e Pesquisa na Área de Energia**. CECACE 1: Curso de Especialização em Conforto Ambiental e Conservação de Energia FAUUSP/FUPAM: 2000. Não Paginado. Notas de Aula.

BJLLAARDT, D. **Tunnel Lighting Practice in the Netherlands** In: SCHREUDER, D. A. et al. **Symposium on Tunnel Lighting**. Lighting Research & Technology, v.7, n.2, 1975. p. 85-105.

BERTOLOTTI, D. **Iluminação Natural em Projetos de Escolas: Uma Proposta de Metodologia para Melhorar a Qualidade da Iluminação e Conservar Energia**. Dissertação. (Mestrado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. p.40.

BOMMIM SOLAR **The Heliostat Principle**. Disponível em < <http://www.bomin-solar.de/English/heliostats.htm>> Acesso em 17 abr. 2007.

BOMMEL, W. **Tunnel Lighting Practice World-Wide**. Lighting Research & Technology, v.13, n.2, 1981. p. 80-6.

BOTTURA, E. J. **Características do Motorista**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2004. p. 103-12. Notas de Aula.

BRIDGMAN, P. W. **The Logic of Modern Physics**, New York: The Macmillan Company, 1932. p.5 apud MOON, P. **The Scientific Basis of Illuminating Engineering**. New York: McGraw-Hill, 1936. p.536.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 5489: Road Lighting: Code of Practice for the Lighting of Tunnels and Underpasses**. 3. ed. London, 1992. 38 p.

BRUAND, Yves. **Arquitetura Contemporânea no Brasil**. São Paulo: Perspectiva, 1981. p.11-18;115-37; 269-71.

BUNGE, M. **Teoria e Realidade**. São Paulo: Perspectiva, 1974. 243p.

CABÚS, R. **Troplux: Um Sotaque Tropical na Simulação da Luz Natural em Edificações**. In: VIII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído e VIII Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído – ENCAC 2005. Maceió, 2005. p.240-9.

CARAM, R. M. **Estudo e Caracterização de Fachadas Transparentes para uso na Arquitetura: Ênfase na Eficiência Energética**. Tese (Livre-Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, 2002. p. 57-80.

CARMEL-ARTHUR, J. **Antoni Gaudí**. Tradução Len Berg. São Paulo: Cosac & Naify, 2000. p.69.

CBIEE – Câmara Brasileira de Investidores em Energia Elétrica / Tendências Consultoria Integrada. **Setor Elétrico Brasileiro: Cenários de Crescimento e Requisitos para a Retomada de Investimentos**. São Paulo: 2003. Disponível em <<http://www.acendebrasil.com.br/site/secoes/Estudos.asp>> Acesso em 10 jan. 2007.

CBT-COMITÊ BRASILEIRO DE TÚNEIS. **Túneis do Brasil**. São Paulo: Dórea Books and Art - DBA, 2006. p. 11-107.

CHICHIERCHIO, L. C. **Manual Técnico de Iluminação Zenital**. São Paulo: Colorplast, 1970. 44p.

CHICHIERCHIO, L. C. **Percepção Arquitetônica**. AU Arquitetura e Urbanismo, São Paulo, v.43, 1992. p.18-9.

CIE-COMISSION INTERNATIONALE DE ÉCLAIRAGE. **CIE 16 (E-3.2): Daylight**. 1970. 79 p.

CIE-COMISSION INTERNATIONALE DE ÉCLAIRAGE. **CIE 30-2: Calculation and Measurement of Luminance and Illuminance in Road Lighting**. 1982. 159 p.

CIE-COMISSION INTERNATIONALE DE ÉCLAIRAGE. **CIE 55: Discomfort Glare in the Interior Working Environment**. 1983. 43 p.

CIE-COMISSION INTERNATIONALE DE ÉCLAIRAGE. **CIE 110: Spatial Distribution of Daylight – Luminance Distributions of Various Reference Skies**. 1994. 42 p.

CIE-COMISSION INTERNATIONALE DE ÉCLAIRAGE. **CIE S 003.3/E-1996: Spatial Distribution of Daylight – CIE Standard Overcast Sky and Clear Sky**. 1996. 5p.

CIE-COMISSION INTERNATIONALE DE ÉCLAIRAGE / INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **CIE S 011E:2003 / ISO 15469:2004(E): Spatial Distribution of Daylight – CIE Standard General Sky.** 2003. 7p.

CIE-COMISSION INTERNATIONALE DE ÉCLAIRAGE. **CIE 88: Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses.** 1990. 42 p.

CIE-COMISSION INTERNATIONALE DE ÉCLAIRAGE. **CIE 88: Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses.** 2nd ed. 2004. 32 p.

CLARO, A. **Modelo Vetorial Esférico para Radiosidade Aplicado à Iluminação Natural.** Tese. (Doutorado em Engenharia) – Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1998. p.8-34.

CLARO, A.; PEREIRA, F. O. R.; AGUIAR, G. P. **Desenvolvimento do Protótipo do Programa Luz Solar para Análise de Iluminação Natural em Arquitetura.** 2^o Fórum de Pesquisa e Desenvolvimento – CELESC. Florianópolis, 2003. n.p.

CRESESB – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO **Energia Solar: Princípios e Aplicações.** Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/solar/apstenergiasolar.htm>> Acesso em 08 jan. 2007a.

CRESESB – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO **Potencial Solar – SUNDATA.** Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br/sundatn.htm>> Acesso em 02 fev. 2007b.

DER/SP- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Projeto de Túnel: Instrução de Projeto: código: IP-DE-C00/002. Rev. A.** 2005. p.11. Disponível em ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/IP-DE-C00-002_A.pdf Acesso em 27 abr. 2007.

DERSA – DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A. **Rodoanel Metropolitano de São Paulo.** Projeto Geométrico e Estrutural. 1998. Projeto Detalhado. Projetista: Vetec Engenharia.

DERSA – DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A. **Rodoanel Metropolitano de São Paulo.** Projeto Geométrico. 1999. Projeto Detalhado. Projetista: Vence Engenharia e Empreendimentos.

DERSA – DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A. **Rodoanel Metropolitano de São Paulo.** Projeto Luminotécnico e Elétrico. 2001. Projeto Detalhado. Projetista: HARSA Hidro Brasileira

DERSA – DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A. **Rodoanel Metropolitano de São Paulo: A Conclusão do Trecho Oeste. Mapa Geral.** Disponível em <<http://www.dersa.com.br/rodoanel/imagens/album/mapa.html>> Acesso em 06 fev. 2007

DOMINGUES, F. A. A. **Geometria da Insolação**. São Paulo: FAUUSP, 1976. 43 p.

EGAN, M. D. **Concepts in Architectural Lighting**. New York: McGraw-Hill, 1983. p. 168-219.

ELETROPAULO **Tarifas de Energia**. Disponível em: <http://www.eletropaulo.com.br/portal/page.cfm?tipocli=publ&conteudo_id=963&desc=Tarifas%20de%20Energia>. Acesso em: 11 jan. 2007.

EMURB – EMPRESA MUNICIPAL DE URBANIZAÇÃO. **Túnel Maria Maluf**. Sistema de Iluminação. 1993a. Projeto Detalhado. Projetista: Figueiredo Ferraz Consultoria e Engenharia de Projeto.

EMURB – EMPRESA MUNICIPAL DE URBANIZAÇÃO. **Túnel Tribunal de Justiça**. Sistema de Iluminação. 1993b. Projeto Detalhado. Projetista: Promon Engenharia.

EMURB – EMPRESA MUNICIPAL DE URBANIZAÇÃO. **Túnel Ayrton Senna**. Sistema de Iluminação. 1995a. Projeto Detalhado. Projetista: Planservi Engenharia.

EMURB – EMPRESA MUNICIPAL DE URBANIZAÇÃO. **Passagem Tom Jobim**. Instalações Elétricas. 1995b. Projeto Executivo. Projetista: Hidrobrasileira Engenharia e Projetos.

EMURB – EMPRESA MUNICIPAL DE URBANIZAÇÃO. **Túnel Sebastião Camargo**. Sistema de Iluminação. 1995c. Projeto Detalhado. Projetista: Promon Engenharia.

EMURB – EMPRESA MUNICIPAL DE URBANIZAÇÃO. **Túnel Anhangabaú**. Instalações Elétricas. 1996a. Projeto Executivo. Projetista: Hidrobrasileira Engenharia e Projetos.

EMURB – EMPRESA MUNICIPAL DE URBANIZAÇÃO. **Túnel Jânio Quadros**. Sistema de Iluminação. 1996b. Projeto Detalhado. Projetista: Promon Engenharia.

EMURB – EMPRESA MUNICIPAL DE URBANIZAÇÃO. **Túnel Max Feffer**. Sistema de Iluminação. 2003. Projeto Detalhado. Projetista: Planservi Engenharia.

ERI - ENERGY RESEARCH INSTITUTE; KACST-KING ABDULAZIZ CITY FOR SCIENCE AND TECHNOLOGY. **Lighting Tunnels: Saudi Arábia**. p.82-8. Disponível em: <<http://tcdc.undp.org/experiences/vol8/Saudi%20Arabia.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2003.

FHWA - FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Underground Transportation Systems in Europe: Safety, Operations, and Emergency Response - June 2006**. Disponível em: <http://international.fhwa.dot.gov/uts/uts_eu06_02>. Acesso em: 08 setembro 2006.

FROTA, A. B. **Geometria da Insolação**. São Paulo: Geros, 2004. p. 27-33;183-90.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico** 4.ed. São Paulo: Nobel, 2000. passim.

GALDINO, M. A.; GOMES, C. M. **SUNDATA v1.0** Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br/sundatn.htm>> Acesso em 02 fev. 2007.

GAMA, R. **Esboço para uma História da Iluminação Pública**. In: Eletropaulo, São Paulo. Cidade Iluminada: Tecnologia e Política a Serviço da Light no Início do Século. São Paulo: Div. Preservação do Patrimônio arquitetônico / Patr. Hist, 1989. p.9-19.

GILLETTE, G.; KUSUDA, T. **A Daylighting Computation Procedure for Use in DOE-2 and Other Dynamic Building Energy Analysis Programs**. Journal of the IES v.12, n.2 1983. p. 78-85.

GRAAFF, A.B. **Description of Existing Installations** In: BOER, J.B. de, Public Lighting. Eindhoven: N.V. Philips. p.649-65.

GRANVILLE, W.A. et al. **Elementos de Cálculo Diferencial e Integral**. Tradução J. Abdelhay. 5.ed. Rio de Janeiro: Ed. Científica, 1966. p.230-42.

GUIANET. **Mapa Político do Brasil**. 1 mapa color. Disponível em <<http://www.guianet.com.br/brasil/mapapolitico.htm>> Acesso em 02 maio 2007.

HALBERTSMA, N. A. **Preface** In: SCHREUDER, D. A. **The Lighting of Vehicular Traffic Tunnels**. Eindhoven: N.V. Philips, 1964. p. iii.

HOPKINSON, R.G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J. **Iluminação Natural**. 2.ed. Lisboa: C. Gulbenkian, 1975. passim.

HOUAISS, A.; VILLAR, M.S.; FRANCO, F.M.M. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2001.

IDMP-CIE International Daylight Measurement Programme / Commission Internationale de l'Eclairage. Disponível em: <<http://idmp.entpe.fr/home.html-ssi>>. Acesso em: 6 de out. 2006.

IEEUSP-Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo. **Guia para o Uso Racional de Energia Elétrica no Setor de Supermercados**. São Paulo: SEBRAE, 2001. 34 p.

IES-ILUMINATING ENGINEERING SOCIETY. **Lighting Traffic Tunnels and Underpasses**. Journal of the IES. June 1957. p.325 - 35.

IES-ILUMINATING ENGINEERING SOCIETY. **Lighting During Daylight Hours**. London: IES, Tech. Rep. n.4, 1962 apud HOPKINSON, R.G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J. **Iluminação Natural**. 2.ed. Lisboa: C. Gulbenkian, 1975, p.561.

IESNA-ILUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. **Lighting Handbook Reference & Application**. 9.ed. New York: IESNA, 2000. cap.1, cap.2, cap.3, cap.8, cap.9.

IESNA-ILUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. **RP-5: Recommended Practice of Daylighting**. New York: IESNA, 1999. 40 p.

IESNA-ILUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. **RP-8: Roadway Lighting**. New York. IESNA, 1972. 44 p.

IGAWA, N.; NAKAMURA, H. **All Sky Model as a Standard Sky for the Simulation of Daylit Environment**. Building and Environment, v.36, n.6. p.763-770.

KABAYAMA, H. Study on Adaptive Illumination for Sudden Change of Brightness, J. Illum. Eng. Inst. Japan 47, 1963 p. 488-96 apud SCHREUDER, D. A. **Tunnel Lighting** In: BOER, J.B. de, **Public Lighting** Eindhoven: N.V. Philips, 1967.

KETVIRTIS, A. **Visibility Study for Long Vehicular Tunnels**. Journal of the IES, v.4, 1975. p. 120-8.

KITTLER, R. **Luminance Distribution Characteristics of Homogeneous Skies: a Measurement and Prediction Strategy**. Lighting Research & Technology, v.17, n.4, 1985. p. 183-8.

KITTLER, R. **Some Considerations Concerning the Zenith Luminance of the Cloudless Sky**. Attached Document of Circular Letter No.11 of CIE Committee E-3.2, Aug. 1970 apud CIE-COMMISSION INTERNATIONALE DE ÉCLAIRAGE. **CIE 110: Spatial Distribution of Daylight – Luminance Distributions of Various Reference Skies**. 1994. p. 11.

KOENIGSBERGER, O.H. et al. **Viviendas y Edificios en Zonas Cálidas y Tropicales**. Madrid: Paraninfo. 1977. p.145-80.

KÖESTER LICHTPLANUNG. **Macro Structured Daylight Retro Blind**. Disponível em: <<http://www.koester-lichtplanung.de>>. Acesso em: 19 abr. 2007.

KOSTOF, S. **A History of Architecture**. 2.^a ed. New York: Oxford University Press, 1995, 792 p.

KROCHMANN, J. **Über die Horizontalbeleuchtungsstärke der Tagesbeleuchtung**, Lichttechnik, 15/11, p.559-62, 1963 apud CIE-COMMISSION INTERNATIONALE DE ÉCLAIRAGE. **CIE 110: Spatial Distribution of Daylight – Luminance Distributions of Various Reference Skies**. 1994. p. 13.

LD+A - LIGHTING DESIGN + APPLICATION. **The Pioneers**. New York: IESNA, jan. 2006. p.58-60

LYNES, J. A. **Principles of Natural Lighting**. London: Elsevier, 1968. p. 23-33 ; 134-7; 144-55.

LE CORBUSIER, **Por Uma Arquitetura**. Coleção Estudos. 3.^aed., São Paulo: Perspectiva, 1981, passim.

LITTLEFAIR, P. J. **The Luminance Distribution of an Average Sky**. Lighting Research & Technology, v.13, n.4, 1981. p. 192-8.

MACÊDO, C. C. **Análise do Desempenho Térmico e Luminoso de Sistemas de Iluminação Natural que Utilizam a Luz Direta do Sol**. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) – Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002. p.20-37

MARDALJEVIC J. **Daylight Simulation: Validation, Sky Models And Daylight Coefficients** (PhD thesis). De Montfort University Leicester. 1999. 313p.

MARDALJEVIC, J. **Validation of Lighting Simulation Program Under Real Sky Conditions**. Lighting Research & Technology, v.27, n.4, 1995. p. 181-188.

MARSH, A. J. **Ecotect**. Perth: Square One, 2003.

MASON, H. E. **Discussion**. In: ALEXANDER, G. A.; HOBSON, R. C.; MC KNIGHT, S.W. **Lighting the New Four-Line Highway Tunnel at Thorold, Ontario**. Journal of the IES. March 1970. p. 170-1.

MC CULLOUGH V. A.; KETVIRTIS A. **Vertical Illuminance as a Criterion for Energy-Effective Tunnel Lighting Design**. Journal of the IES. October 1983. p.230-242.

MESHKOV, V. V. **Fundamentals of Illumination Engineering**. Tradução V. M. Matskovsky. Moscou: Mir Publishers, 1981. p. 54-77. Original russo.

MILNE, M.; ZURICK, J. **Daylight Prediction Techniques in Energy Design Tools**. In: INTERNATIONAL DAYLIGHTING CONFERENCE '98. Ottawa: 1998. p. 89-95.

MINDLIN, Henrique Ephim. **Modern Architecture in Brazil**. Rio de Janeiro: Colibris, 1956. passim.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. 1 fotografia color. Disponível em <<http://www.transportes.gov.br/bit/br/fotos/br101sc/br101sc003.jpg>> Acesso em: 14 set. 2006.

MOON, P. **The Scientific Basis of Illuminating Engineering**. New York: McGraw-Hill, 1936. p.255-9; 396-413.

MOON, P., SPENCER, D.E. **Lighting Design**. Massachusetts: Addison-Wesley. 1948. p.130-144; 264-267.

MOORE, F. **Concepts and Practice of Architectural Daylighting**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. p. 52-61; 167-97.

MOURA, N.C.S. **Lumina: Aplicativo para Cálculo do Desempenho Luminoso de Dispositivos de Controle da Luz Natural por Obstrução e Reflexão**. In: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído – ENTAC 2006. Florianópolis, 2006. p.624-33.

MURDOCH, J. B. **Illumination Engineering**. New York: Macmillam Publishing, 1985. p. 367-90.

NAKAMURA, H.; OKI, M.; HAYASHI, Y.; **Luminance Distribution of Intermediate Sky**. Journal of Light e Visual Environment . v.9 n.1, 1985. p. 6-13 apud IGAWA, N.; NAKAMURA, H. **All Sky Model as a Standard Sky for the Simulation of Daylit Environment**. Building and Environment, v.36, n.6. p.763.

NARISADA, K. **Latest Research in Tunnel Lighting in Japan**. Annual Meeting, Highway Research Board, Washington, 1971 apud SCHREUDER, D. **A Tunnel Entrance Lighting – a Comparison of Recommended Practice**. Lighting Research & Technology, v.3, n.4, 1971. p. 274-8.

NARISADA, K.; YOSHIKAWA, K. **Tunnel Entrance Lighting – Effect of Fixation Point and other Factors on the Determination of Requirements**. Lighting Research & Technology, v.6, n.1, 1974. p. 9-18.

NAVVAB, M. et al. **Analysis of Atmospheric Turbidity for Daylight Calculations**. Energy and Buildings, 6, 1984. p. 293-303 apud CIE-COMMISSION INTERNATIONALE DE ÉCLAIRAGE. **CIE 110: Spatial Distribution of Daylight – Luminance Distributions of Various Reference Skies**. 1994. p. 11.

NUTAU, Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura, **Anais do X Congresso Ibérico de Energia Solar e V Congresso Ibero-Americano de Energia Solar. As Energias Renováveis do Novo Milênio**. São Paulo: FAUUSP, 2000.

OLIVEIRA, S. H. F.; ZILLES, R. **Edificações Fotovoltaicas Conectadas à Rede de Distribuição de Eletricidade (EFCR); Situação Atual no País**. Informe das apresentações ocorridas no encontro para promoção e disseminação das EFCR. São Paulo: IEEUSP, 1998. n.p.

OSRAM. **Catálogo Geral: Conceitos Luminotécnicos** Disponível em <http://br.osram.info/download_center/download_catalogo.htm> Acesso em: 5 abr. 2007.

PARKER, H. W. **Prefácio** In: CBT-COMITÊ BRASILEIRO DE TÚNEIS. Túneis do Brasil. São Paulo: Dórea Books and Art – DBA, 2006. p. 11.

PAVLOV, I. P. **XII Congress of Naturalists and Phisycians**, Collected Works, v.III, Medgiz 1951. apud MESHKOV, V. V. **Fundamentals of Illumination Engineering**. Tradução V. M. Matskovsky. Moscou: Mir Publishers, 1979. p. 54-77. Original russo.

PEREIRA, D. A. **Iluminação Pública**. Revista G. E. (separata). abr. 1954. p.1.

PEREIRA, F. O. R. **Luminous and Thermal Performance of Window Shading and Sunlighting Reflecting Devices**. Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy at the Building Science Unit School of Architectural Studies University of Sheffield, UK, 1992. 301p.

PEREIRA, F. O. R.; MADEIRA, A. Q.; XAVIER, A. A. **Iluminação Natural – Disponibilidade da Luz Natural**, Projeto Normalização em Conforto Ambiental, UFSC-FINEP, 1996 apud SOUZA, R. V.G. de. **Iluminação Natural em Edificações: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)** Florianópolis: UFSC, 1997, p. 22

PERRAUDEAU, M. **Luminance Models**. Proc. National Lighting Conference. Cambridge, 1988. p. 291-2 apud IGAWA, N.; NAKAMURA, H. **All Sky Model as a Standard Sky for the Simulation of Daylit Environment**. Building and Environment, v.36, n.6. p.763.

PHILIPS. **Manual de Iluminação**. 3.ed. Eindhoven: N.V. Philips, 1981. p.153-8.

PIMENTA, J. L. **A Luz no Emboque do Túnel**. Revista Lumiere. n.46. fev. 2002. p.84-90.

PLEIJEL, G. **The Computation of Natural Radiation in Architecture and Town Planning**. Stockholm: Statens nämnd för byggnadsforskning, 1954. p. 120-38.

PLEIJEL, G. **Daylight Investigation: Description of Test Set-up and Results of Selected Test Series**. Stockholm: State Committee for Building Research, n.17, 1949. p. 2.

POPKESS, A. **Traffic Control & Road Accident Prevention**. London: Chapman & Hall, 1957. p. 5-15.

POPPER, K. R. **A Lógica da Pesquisa Científica**. São Paulo: Cultrix (EDUSP), 1996. p.11-159.

PRADO, L.C. **Iluminação**: Curso desenvolvido na FAUUSP. São Paulo: FAUUSP, 1961. 206 p.

ROBBINS, C. L. **Daylighting: Design and Analysis**. New York: V. N. Reinhold, 1986. p. 157-216.

ROMÉRO, M. A. **Método de Avaliação do Potencial de Conservação de Energia Elétrica em Campi Universitários: O Caso da Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira**. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992. v.1, cap.2, p.52-66.

RORIZ, M. **Luz do Sol: Radiação Solar e Iluminação Natural**. Versão 1.1. 1995

SAVAGE, C. I. **An Economic History of Transport**. London: Hutchinson University Library, 1967. p. 116-20.

SCARAZZATO, P. S.; SILVA, R. R. **Cálculo de Disponibilidade de Luz Natural – DLN**. Versão 2.06, 1997.

SCHREUDER, D. A. **The Lighting of Vehicular Traffic Tunnels**. Eindhoven: Centrex, 1964. 117 p.

SCHREUDER, D. A. **Tunnel Lighting**. In: BOER, J.B. de, Public Lighting. Eindhoven: N.V. Philips, 1967. p.156-92.

SCHREUDER, D. A **Tunnel Entrance Lighting – a Comparison of Recommended Practice**. Lighting Research & Technology, v.3, n.4, 1971. p. 274-8.

SCHREUDER, D. A. et al. **Symposium on Tunnel Lighting**. Lighting Research & Technology, v.7, n.2, 1975. p. 85-105.

SCHREUDER, D. A **The Lighting of Traffic Tunnels**. Leidschendam: Institute for Road Safety Research SWOV, R-88-18, 1988. p. 2-10.

SILVA, A.C.; MALATO, J.J. **Geometria da Insolação de Edifícios**. Lisboa: MOP, 1969. p. 3-22.

SITECO. **Daylight Systems**: Micro Sun Shielding Louvre; Movable Prism Systems. Disponível em: <<http://www.siteco.co.uk/en/products/daylight-systems>>. Acesso em: 19 abr. 2007.

SOUZA, R. V. G. **Iluminação Natural em Edificações: cálculo de iluminâncias internas – desenvolvimento de ferramenta simplificada**. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) – Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1997. 153 p.

SOUZA, R. V. G. **Daylighting Simulation: Pros and Cons**. In: PLEA 2001 – THE 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE. Florianópolis: novembro 2001. p. 197-201.

STEAD, H. **A Mountain Tunnel – How to Light It**. Journal of the IES. V.56, 1961. p.676-7.

SUBCOMMITTEE ON LIGHTING OF TUNNELS AND UNDERPASSES OF THE ROADWAY LIGHTING COMMITTEE OF THE ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY. **Lighting of Tunnels**. Journal of the IES, v.1, 1972. p. 247-55.

SUDA, K. Iluminação Viária – Iluminação Natural. **Documentos em Síntese – Dersa**. São Paulo. nº 5 -Ano 2. 1993. p.17-8.

SWIERSTRA, R. **De Bepaling van de Dagvelichting in Fabrieken em Werkplaatsen Met Bovenlichten**. Polyt. Tijdschr. 7, 1952. p.652-6, 689-93, 725-8 apud SCHREUDER, D. A. **The Lighting of Vehicular Traffic Tunnels**. Eindhoven: N.V. Philips, 1964. p.33-4.

SWIERSTRA, R. **Nieuwe Methoden ter Bepaling van Bezinning em Dagverlichting**. Polyt. Tijdschr. 6, 1951. p.278-82; 312-8; 388-92. apud SCHREUDER, D. A. **The Lighting of Vehicular Traffic Tunnels**. Eindhoven: N.V. Philips, 1964. p.33-4.

SZOKOLAY, S.V. **Solar Geometry**. In: PLEA NOTES Note 1. Brisbane: Dept. Architecture University of Queensland, 1996. 56 p.

TABOADA, J. A. **Manual OSRAM**. Madrid: OSRAM, 1975. p. 71-5.

TREGENZA, P. R. **A Simple Mathematical model of Illumination from a cloudy sky**. *Lighting Research & Technology*, v.12, n.3, 1980. p. 121-8.

TREGENZA, P.; LOE; D. **The Design of Lighting**. London: Spon, 1998. p. 3-8; 31-35.

TESSON, M.; MONIÉ, B. **Road Tunnel Lighting Design: Simplification**. *Lighting Research & Technology*, v.21, n.4, 1989. p. 171-9.

TURISMO CATARINENSE. 1 fotografia color. Disponível em <<http://www.turismoemsantacatarina.tur.br/transportes/tuneis/tunel.htm/tunelmorrodo boi.jpg>> Acesso em 14 set. 2006.

UBBELOHDE, M.S.; HUMANN, C. **A Comparative Evaluation of Daylighting Software: SuperLite, Lumen Micro, Lightscape and Radiance**. In: INTERNATIONAL DAYLIGHTING CONFERENCE '98. Ottawa: 1998. p. 97-104.

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **America's Highways 1776 / 1976. A History of the Federal-Aid Program**. 1976, p.112-174.

VIANNA, N. S.; GONÇALVES, J. C. S. **Iluminação e Arquitetura**. São Paulo: Virtus, 2001. p. 67-74.

WALDRAM, J. M. **Lighting and Visibility in the Approaches to Underpasses**, *GEC Journal* 29, 1962. p. 119-29 apud SCHREUDER, D. A. **Tunnel Lighting**. In: BOER, J.B. de, *Public Lighting*. Eindhoven: N.V. Philips, 1967. p.175.

WEINSTEIN, G. W.; HOBSON, R. R.; DOWLING, J. E. **Light and Dark Adaptation in the Isolated Rat Retina**. *Nature* 215, 1967. p.134-8 apud ADRIAN, W. **Investigations on the Required Luminance in Tunnel Entrances**. *Lighting Research & Technology*, v.14, n.3, 1982. p. 153.

WENTINK, H. C. **Ministry of Public Works, Private Communication**. 1962 apud SCHREUDER, D. A. **The Lighting of Vehicular Traffic Tunnels**. Eindhoven: N.V. Philips, 1964. p.33.

WESTON, R. **Alvar Aalto**. London: Phaidon, 1995. passim.

WISNIK, Guilherme. **Lucio Costa**. São Paulo: Cosac & Naify, 2001. passim.

YOSHIDA, C. B. et al. **Henrique Ephim Mindlin – o Homem e o Arquiteto**. Prêmio "Arquiteto Henrique Mindlin". São Paulo: Instituto Roberto Simonsen, 1975. p.101-59

GLOSSÁRIO

Termos Gerais

ACOMODAÇÃO VISUAL: Processo pelo qual o olho ajusta o foco de uma distância para a outra.

ADAPTAÇÃO VISUAL: Processo pelo qual a retina torna-se acostumada a mais ou menos luz do que estava exposta no imediato período precedente.

Nota: utiliza-se também este termo para referir-se ao estado final do processo, quando se a condição de adaptação para um determinado nível de luminância.

ÂNGULO SÓLIDO [sr]: Medida da porção do espaço definida por uma superfície cônica.

BRILHO APARENTE: Percepção subjetiva da luminância.

CAMPO VISUAL: Região no espaço em que os objetos são percebidos mantendo-se a cabeça e os olhos fixos.

CAMPO VISUAL CENTRAL: Região do campo visual que corresponde à porção da fóvea na retina, onde os objetos são percebidos em detalhe de cor e forma.

CAMPO VISUAL PERIFÉRICO: Porção do campo visual que corresponde à parte externa da região ocupada pelo campo visual central, diminuindo gradualmente a percepção de cores e detalhes à medida que se afasta da linha de visão.

COMPONENTE CELESTE (CC) [%]: Razão entre a iluminância em determinado ponto de um plano horizontal no espaço interior, devido à luz recebida diretamente da parcela de céu visível pelo ponto, e a iluminância em um plano horizontal exterior desobstruído, devido à luz proveniente de toda a abóbada celeste.

COMPONENTE DE REFLEXÃO EXTERNA (CRE) [%]: Razão entre a iluminância em determinado ponto de um plano horizontal no espaço interior, devido à luz do céu recebida por reflexão das superfícies externas, e a iluminância em um plano horizontal exterior desobstruído, devido à luz proveniente de toda a abóbada celeste.

COMPONENTE DE REFLEXÃO INTERNA (CRI) [%]: Razão entre a iluminância em determinado ponto de um plano horizontal no espaço interior, devido à luz natural difusa recebida por reflexão das superfícies internas, e a iluminância em um plano horizontal exterior desobstruído, devido à luz proveniente de toda a abóbada celeste.

CONSUMO [kWh]: Quantidade de energia elétrica utilizada em um determinado intervalo de tempo

CONTRIBUIÇÃO DE ILUMINAÇÃO NATURAL (CIN) [%]: Equivalente ao Fator de Luz Diurna aplicado para quaisquer condições de céu com distribuição de luminâncias conhecida.

CONTRASTE: Relação entre a luminância de um objeto-alvo e de seu fundo imediato, segundo a equação: $C = (L_o - L_f) / L_f$, sendo C o contraste, L_o a luminância do objeto-alvo e L_f a luminância do fundo.

CONTRASTE REDUZIDO: Contraste quando ocorre a interferência de uma luminância de véu entre o objeto alvo e o observador, segundo a equação:

$C' = C L_f / (L_f + L_v)$, sendo C' o contraste reduzido, C o contraste e L_f a luminância do fundo.

DIFUSÃO PERFEITA: Distribuição uniforme do fluxo luminoso de acordo com a lei do co-seno de Lambert.

EFICÁCIA LUMINOSA [lm / W]: Razão entre o fluxo luminoso total emitido por uma fonte e a potência elétrica absorvida. Para a luz natural, considera-se o quociente entre o fluxo luminoso e o fluxo radiante incidente na superfície.

ESFERORRADIANO: Unidade de ângulo sólido que subtende sobre a superfície de uma esfera, centrada no vértice desse ângulo, uma calota de área igual ao quadrado do raio.

EXITÂNCIA [lm / m²]: Densidade de fluxo luminoso que é emitido por um ponto de uma superfície.

FATOR DE CONFIGURAÇÃO: Razão entre a iluminância em um ponto de uma superfície (superfície 1) – devido ao fluxo recebido diretamente de outra superfície lambertiana (superfície 2) – e a exitância da superfície 2.

FATOR DE DEMANDA [%]: Fator que indica a simultaneidade de utilização de equipamentos ligados a um quadro de distribuição, ou de todos os equipamentos de utilização ligados a um quadro de distribuição, no instante de maior solicitação. Pode ser determinado pela razão entre a potência de alimentação e a potência instalada.

FATOR DE FORMA: Razão entre o fluxo diretamente recebido por uma superfície (superfície 1) - proveniente de outra superfície lambertiana (superfície 2) – e o fluxo total emitido pela superfície 2.

FATOR DE LUZ DIURNA (FLD) [%]: Razão entre a iluminância em determinado ponto de um plano horizontal no espaço interior, devido à luz recebida direta ou indiretamente da abóbada celeste, e a iluminância em um plano horizontal exterior desobstruído, devido à luz proveniente de toda a abóbada celeste.:

FLUXO LUMINOSO [lm]: Fluxo radiante emitido na unidade de tempo dentro da faixa visível do espectro eletromagnético.

FLUXO RADIANTE: ou **POTÊNCIA RADIANTE** [W]: Potência emitida, transferida ou recebida em forma de radiação. Pode conter frações visíveis e não visíveis.

ILUMINÂNCIA [lx]: Densidade de fluxo luminoso incidente em uma superfície.

ÍNDICE DE REPRODUÇÃO DE COR: Medida do grau de alteração na cor dos objetos provocado por determinada fonte de luz em comparação com uma fonte de referência.

INTENSIDADE LUMINOSA [cd]: Fluxo luminoso por unidade de ângulo sólido em determinada direção. Portanto, corresponde ao fluxo luminoso em determinada direção, produzido por uma fonte pontual em uma pequena superfície centralizada e normal a essa direção, dividido pelo ângulo sólido, em esferorradianos, definido pela fonte e a superfície.

LINHA DE VISÃO: Direção visada pelo observador, que corresponde ao eixo do campo visual.

LUMINÂNCIA [cd / m²]: Quociente entre a Intensidade luminosa numa determinada direção, produzida por um elemento de uma superfície, e a área do elemento projetada ortogonalmente na mesma direção.

LUMINÂNCIA DE VÉU [cd / m²]: Luminância sobreposta à imagem que reduz o contraste.

LUMINÂNCIA DE VÉU EQUIVALENTE [cd / m²]: Luminância refletida de uma superfície brilhante que é sobreposta a um objeto de interesse, produzindo neste um efeito de véu devido à luz desviada dentro do olho que interfere na imagem de interesse.

LUZ: Energia radiante capaz de excitar a retina e produzir a sensação visual. A faixa visível dentro do espectro eletromagnético se estende de 380 a 780 nanômetros.

OFUSCAMENTO DE DESCONFORTO: Ofuscamento que causa desconforto, sem necessariamente prejudicar a visão dos objetos.

OFUSCAMENTO DESABILITADOR: Ofuscamento que prejudica a visão dos objetos, sem necessariamente causar desconforto.

POTÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO [W ou kW]: Soma das potências nominais de entrada dos equipamentos de utilização ligados a um quadro de distribuição, que estejam em funcionamento no instante de maior solicitação da instalação.

POTÊNCIA INSTALADA [W ou kW]: Soma das potências nominais de entrada de todos os equipamentos de utilização de uma instalação.

REFLETÂNCIA [%]: Razão entre o fluxo refletido e o fluxo incidente

SUPERFÍCIE LAMBERTIANA: Superfície que emite ou reflete a luz de acordo com a lei de Lambert, apresentando luminância constante em todas as direções.

TEMPERATURA CORRELATA DE COR [K]: Temperatura absoluta do corpo negro cuja cromaticidade mais se aproxima da fonte em análise.

TRANSMITÂNCIA [%]: Razão entre o fluxo transmitido e o fluxo incidente.

Termos Específicos Aplicados à Iluminação de Túneis

DISPOSITIVO PARA ADAPTAÇÃO VISUAL (DAV): Túnel falso implantado no trecho de rodovia aberta imediato ao portal de entrada do túnel que provê a iluminação diurna na Zona Limiar através da luz natural.

DISTÂNCIA SEGURA DE FRENAGEM (DSF) [m]: Distância visual requerida, em função da velocidade, para que o motorista possa frear com segurança ao identificar um elemento inesperado na rodovia. Esta distância considera o tempo de percepção e reação do motorista, além da distância necessária para frear o veículo.

DISTÂNCIA DE ADAPTAÇÃO [m]: Distância entre o ponto de adaptação e o portal do túnel.

EFEITO BURACO NEGRO: Termo aplicado à iluminação diurna de túneis rodoviários, resultado do ofuscamento desabilitador provocado pela reflexão da luz nas superfícies das imediações do portal de entrada, impedindo a percepção de detalhes no interior do túnel.

EMBOQUE (obra civil) : Trecho inicial do túnel de extensão cerca de três vezes o seu diâmetro a partir do portal.

EMBOQUE (adotado na pesquisa): Extensão total ocupada pelo emboque e praça do emboque da obra civil.

ILUMINAÇÃO DIURNA: Iluminação diária correspondente ao período de 12 horas, iniciando às 6:00 h e terminando às 18:00 h.

ILUMINAÇÃO DIUTURNA: Iluminação diária ininterrupta, correspondente ao período de 24 horas.

ILUMINAÇÃO NOTURNA: Iluminação correspondente ao período de 12 horas, iniciando às 18:00 h e terminando às 6:00 h do dia seguinte.

LUMINÂNCIA L_{20} [cd / m²]: Luminância média no ângulo cônico de 20°, com eixo na linha de visão do motorista situado no ponto de fixação.

MÉTODO L_{20} : Método proposto pela CIE em 1973 para cálculo da Luminância da Zona Limiar (L_{th}). Estima a luminância de véu equivalente na Zona de Aproximação do túnel considerando um ângulo cônico de 20°. Este método foi refutado por Adrian (1990) que apresentou como alternativa o Método L_{seq} .

MÉTODO L_{seq} : Método proposto por Adrian (1990) em substituição ao Método L_{20} para cálculo da Luminância da Zona Limiar (L_{th}). Estima a luminância de véu equivalente na Zona de Aproximação através de um diagrama polar baseado na fórmula clássica de Holladay. Este método passou a ser adotado recentemente pela CIE (2004) e também pela IESNA (2005).

OBJETO-CRÍTICO, OBJETO-ALVO ou OBSTÁCULO DE REFERÊNCIA: Cubo com aresta 20 cm e refletância de 20%, adotado como referência mínima para identificação pelo motorista, considerando o contraste de 0,2 entre o objeto e o fundo imediato.

PONTO DE ADAPTAÇÃO: Posição na rodovia aberta em que a abertura do portal de entrada torna-se o principal elemento no campo visual do motorista que se aproxima do túnel.

PONTO DE FIXAÇÃO: Posição na rodovia aberta cuja distância do portal de entrada equivale à Distância Segura de Frenagem.

PRAÇA DO EMBOQUE (obra civil): Área na frente do portal do túnel, onde a conformação do terrapleno passa a ser adaptada e planejada para as necessidades de execução do emboque do túnel.

SISTEMA PARA ADAPTAÇÃO VISUAL (SAV): Sistema composto de soluções arquitetônicas para prover ou otimizar a iluminação diurna de túneis rodoviários.

TÚNEL: Construção sobre a rodovia que restringe a iluminação diurna, reduzindo substancialmente a capacidade visual do motorista.

ZONA DE ACESSO OU DE APROXIMAÇÃO: Trecho de rodovia aberta entre o ponto de fixação e o portal de entrada.

ZONA INTERIOR: Trecho entre a Zona de Transição e a Zona de Saída, no qual o nível de iluminação é mínimo.

ZONA LIMIAR: Primeiro trecho após o portal de entrada, no qual está o primeiro estágio de adaptação da visão e o maior nível de iluminação.

ZONA DE SAÍDA: Trecho entre o final da Zona Interior e o portal de saída. Sofre influência da iluminação exterior e o nível de iluminação é crescente, podendo variar em estágios até a razão 1:3.

ZONA DE TRANSIÇÃO: Trecho que interliga a Zona Limiar e a Zona Interior. Nível de iluminação decrescente, podendo variar em estágios até a razão 1:3.

LUMINÂNCIA DA ZONA INTERIOR (L_{in}) [cd / m²]: Luminância média no pavimento da Zona Interior;

LUMINÂNCIA DA ZONA LIMIAR (L_{th}) [cd / m²]: Luminância média no pavimento da Zona Limiar;

LUMINÂNCIA DA ZONA DE SAÍDA (L_s) [cd / m²]: Luminância média no pavimento em cada estágio da Zona de Saída. Neste trabalho adotaram-se L_{si} para a luminância inicial, limítrofe com a Zona Interior, e L_{sf} para a luminância final, limítrofe com o portal de saída.

LUMINÂNCIA DA ZONA DE TRANSIÇÃO (L_{tr}) [cd / m²]: Luminância média no pavimento em cada estágio da Zona de Transição. Neste trabalho adotaram-se L_{ti} para a luminância inicial, limítrofe com a Zona Limiar, e L_{tf} para a luminância final, limítrofe com a Zona Interior.

APÊNDICE A – ANÁLISE SIMPLIFICADA COMPARATIVA DE CUSTOS: DAV x SC

A seção 9.2 estimou uma economia no consumo mensal de energia, proporcionada pelo **Dispositivo para Adaptação Visual (DAV)** em relação ao **Sistema Convencional (SC)** da ordem de 49.104 kWh, se atendidas as recomendações internacionais na iluminação dos túneis do Rodoanel Mário Covas. Sendo a tarifa de energia US\$ 0.065/kWh⁶⁶, obtém-se a economia anual, apenas pela redução do consumo, conforme a equação (72):

$$49.104kWh / mês \times 12 \times US\$0.065 / kWh = US\$38,301.12 / ano \quad (72)$$

Em estudo semelhante, Suda (1993, p.17) chegou ao consumo anual de 295.650 kWh na Zona Limiar, resultando na economia de US\$19,217.25/ano para a mesma tarifa de energia, com a aplicação de um túnel falso na embocadura do túnel semelhante ao **DAV**. A principal diferença do resultado, em relação à equação (72) está na extensão da Zona Limiar, que Suda adota 60,00 m para a velocidade de 100 km/h, conforme a recomendação ABNT. Na avaliação econômica, além do consumo, Suda incluiu o custo de implantação, de manutenção e o custo para o País.

Fazendo um ajuste na Zona Limiar desse estudo, para adequá-lo às recomendações internacionais, tem-se o seguinte resultado (TAB.59):

TABELA 59 – Análise do Custo da Iluminação da Zona Limiar

	Comprimento da Zona Limiar (SUDA) 60,00m			Comprimento da Zona Limiar Ajustado 128,00m		
	Custo Fixo (US\$)	Custo Anual (US\$)	Custo 10 anos (US\$)	Custo Fixo (US\$)	Custo Anual (US\$)	Custo 10 anos (US\$)
Implantação	450,000.00			819,000.00		
Consumo		19,217.25	192,172.50		34,975.40	349,753.95
Manutenção		30,000.00	300,000.00		54,600.00	546,000.00
Geração, Transmissão e Distribuição	482,000.00			877,240.00		

FONTE – SUDA, 1993 p.17-8, adaptação nossa

O fator de correção F_c entre os valores ajustados (Zona Limiar = 128,00m) e os valores originais (Zona Limiar = 60,00m) é 1,82. Este fator não corresponde

⁶⁶ SUDA, 1993, p.17.

apenas à divisão dos comprimentos nas duas situações, mas também depende do nível de iluminação. Na primeira metade da Zona Limiar ajustada, o nível de iluminação é constante e, nesse trecho, o fator $Fc1$ pode ser determinado pela divisão das extensões. Já na segunda metade, o nível de iluminação é reduzido gradualmente em três estágios, até atingir 40% do nível inicial no término da zona, configurando um nível médio correspondente a 70% do valor da primeira metade. Portanto, o fator para a segunda metade da zona $Fc2$ é igual a $0,7 Fc1$, e o fator de correção para toda a extensão da Zona Limiar Fc é obtido pela equação (73).

$$\begin{aligned}
 Fc1 &= \frac{128 \div 2}{60} = \frac{64}{60} = 1,07 \\
 Fc2 &= 1,07 \times 0,70 = 0,75 \\
 Fc &= Fc1 + Fc2 = 1,82
 \end{aligned}
 \tag{73}$$

Conforme os resultados da TAB.59, o custo anual relacionado ao consumo (US\$34,975.40) aproxima-se do obtido para os túneis do Rodoanel (US\$38,301.12). O **DAV** proporcionaria uma economia de US\$819,000.00 na implantação do sistema artificial e, referente à manutenção e consumo, uma economia anual de US\$89,575.40.

Adotando o custo unitário Pini de edificações em São Paulo, R\$ 797,25/m² (US\$370.81/m²)⁶⁷, para galpão industrial médio, estima-se o custo do **DAV**. Multiplicando-se a largura da cobertura (19,50m) pela extensão (128,00 m) tem-se a área de 3.022,50 m² que, multiplicada pelo custo unitário Pini, resulta em US\$925,541.76; correspondente ao custo estimado de implantação do **DAV** para a Zona Limiar. Estimando um custo anual de manutenção de 3% do custo de implantação, tem-se US\$ 27,766.25; e a economia anual passaria a:

$$\text{US\$ } 89,575.40 - \text{US\$ } 27,766.25 = \text{US\$ } 61,809.15$$

⁶⁷ US\$ 1.00 = R\$ 2,15 (novembro 2006).

Subtraindo do custo de implantação do **DAV** o custo de implantação do sistema artificial, tem-se:

$$US\$ 925,541.76 - US\$ 819,000.00 = US\$ 106,541.76$$

Sem considerar o custo do capital envolvido, o retorno do investimento ocorreria em torno de 1,72 ano, segundo os parâmetros adotados por Suda (1993):

- **Implantação:** US\$ 3,000.00 / luminária;
- **Consumo:** US\$ 0.065 / kWh;
- **Manutenção:** US\$ 200.00 / luminária/ano
- **Geração:** Transmissão e Distribuição: US\$ 5,000.00 / kW

Por informação verbal em janeiro de 2007, Suda admitiu estes parâmetros como ainda válidos atualmente. O valor da tarifa de energia foi verificado junto à ELETROPAULO, estando ligeiramente acima do valor adotado por Suda (US\$0.073 / kWh)

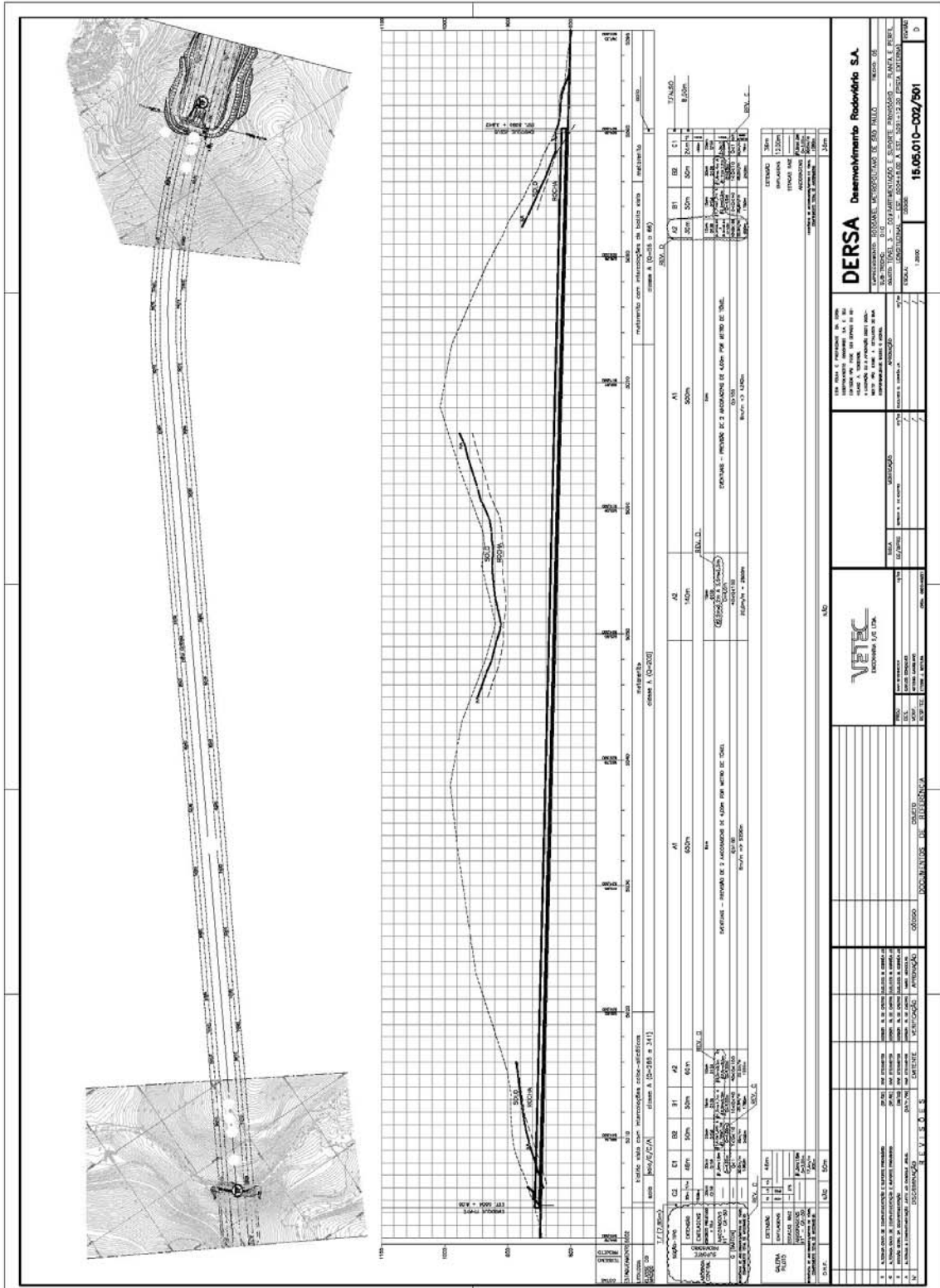
Alguns desses valores são difíceis de estimar e podem resultar em distorções. O custo para geração, transmissão e distribuição de energia, apresentado por Suda, considerou US\$ 5,000.00 / kW e as luminárias, incluindo lâmpadas e instalação elétrica para suprimento de energia, foram estimadas em US\$ 3,000.00 a unidade. Em outros estudos (CBIEE, 2003, p.134) o custo de geração, distribuição e transmissão do kW no Brasil, projetado para diversos cenários compostos de usinas hidrelétricas e termelétricas por uma década (2003 a 2012), esteve em torno de “R\$20.060 milhões por ano para atender um crescimento anual de 2.274 MW-médios ao longo do decênio contemplado”, o que equivale a US\$ 3,095.25 / kW.⁶⁸

Quanto às luminárias, é mais difícil encontrar referências confiáveis, mas, mesmo admitindo alguma variação nos valores indicados na TAB.59, o **DAV** mostrou ser uma alternativa viável. Além disso, o deslocamento do horário de pico em parte significativa do consumo, a economia na geração, transmissão e distribuição de energia são aspectos favoráveis, com implicações no custo para o País, no impacto ambiental e, conseqüentemente, no desenvolvimento sustentável.

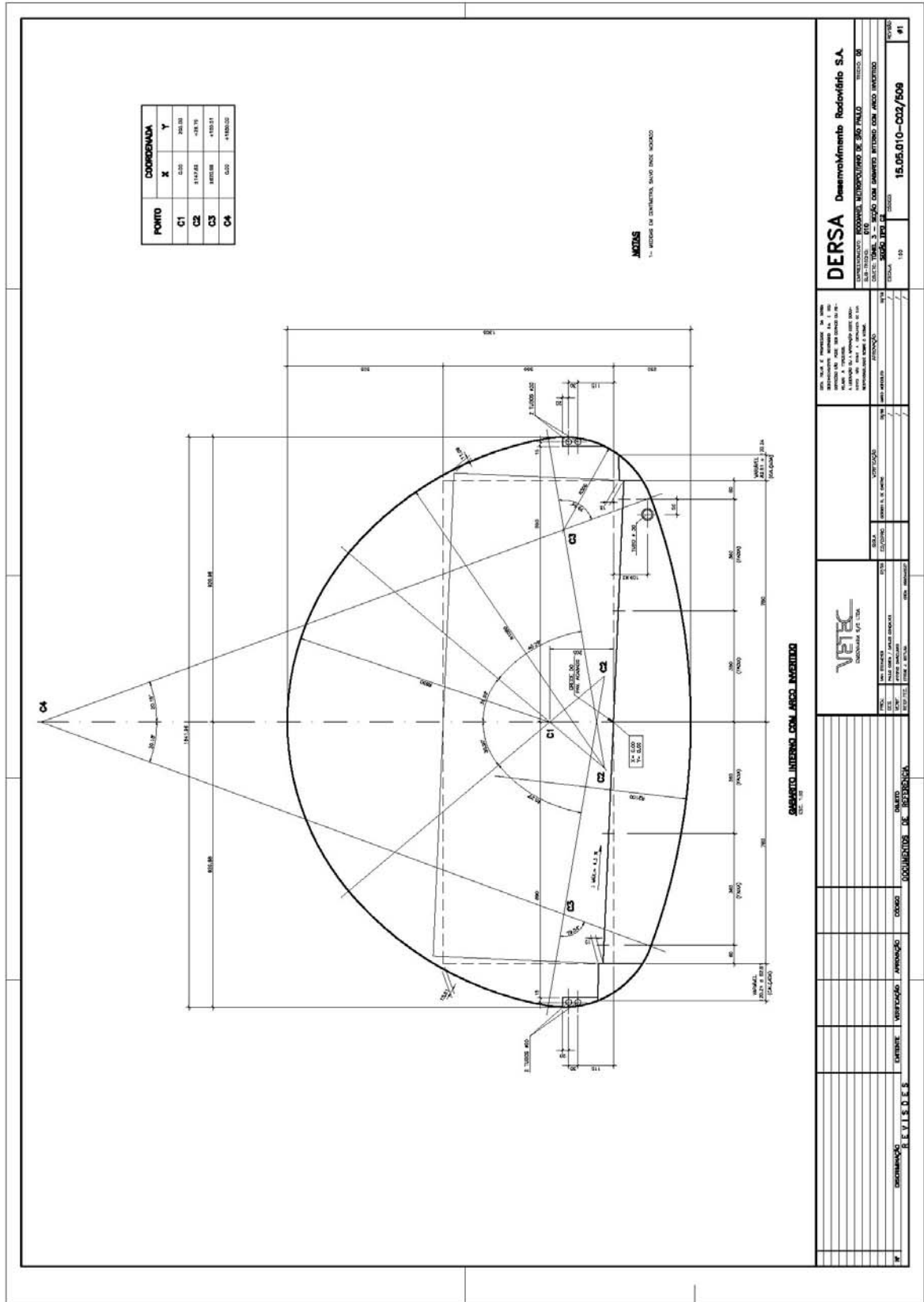
⁶⁸ US\$ 1.00 = R\$ 2,85 (novembro 2003).

ANEXO A – RODOANEL MÁRIO COVAS: DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA (DERSA)

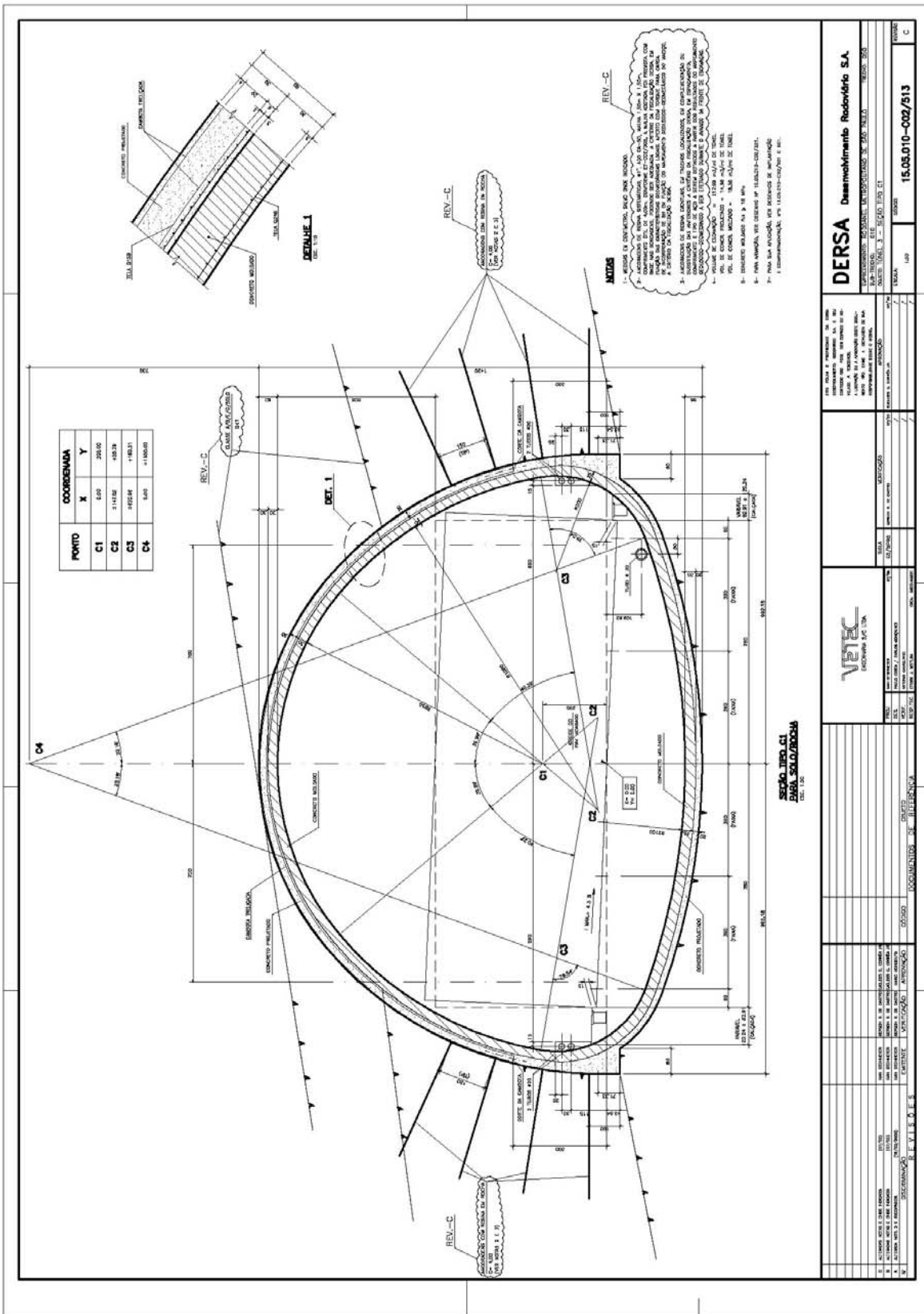
Túnel 1: Anhanguera (1.750m)



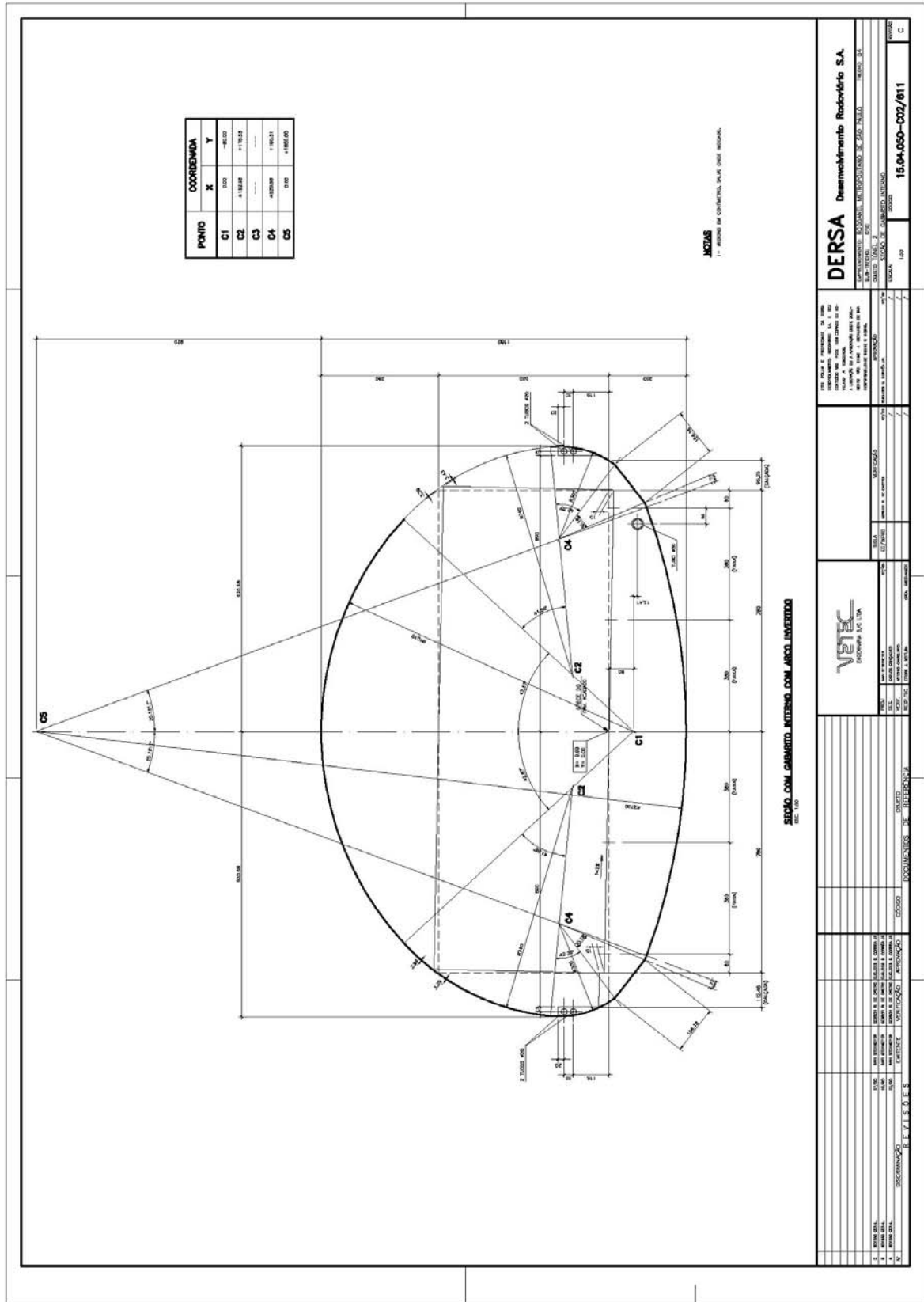
Túnel 1: Planta e Perfil



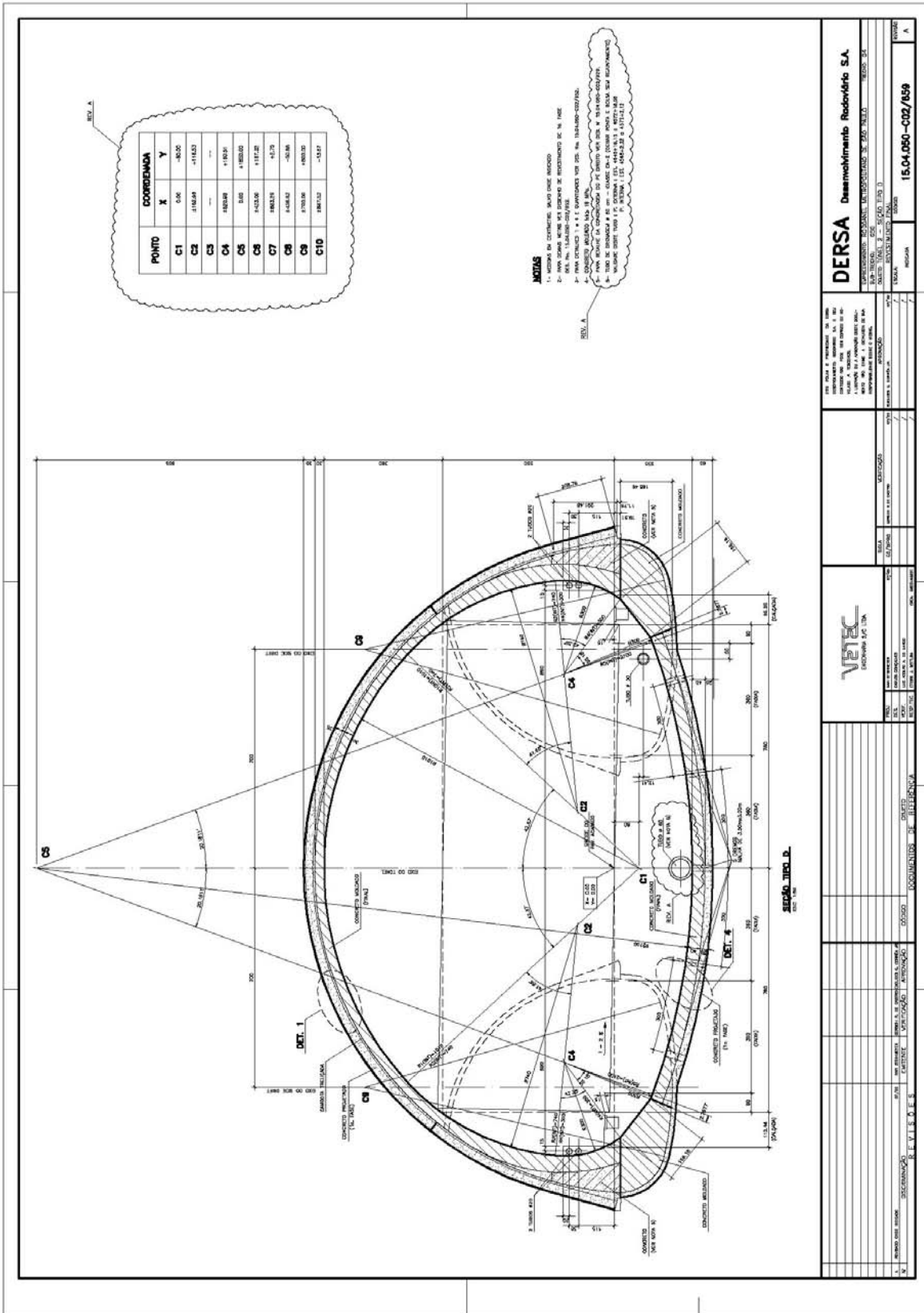
Túnel 1: Seção Transversal com Gabarito Interno



Túnel 1: Seção Transversal Tipo C1



Túnel 2: Seção Transversal com Gabarito Interno



Túnel 2: Seção Transversal Tipo D

DERSA Desenvolvimento Rodoviário S.A.

PROJETO: PROJETO DE ENCRUSTAMENTO DE M. FIBRA
LOCAL: TUNEL 2 - KM 110,000 - RJ
DATA: 15.04.2010

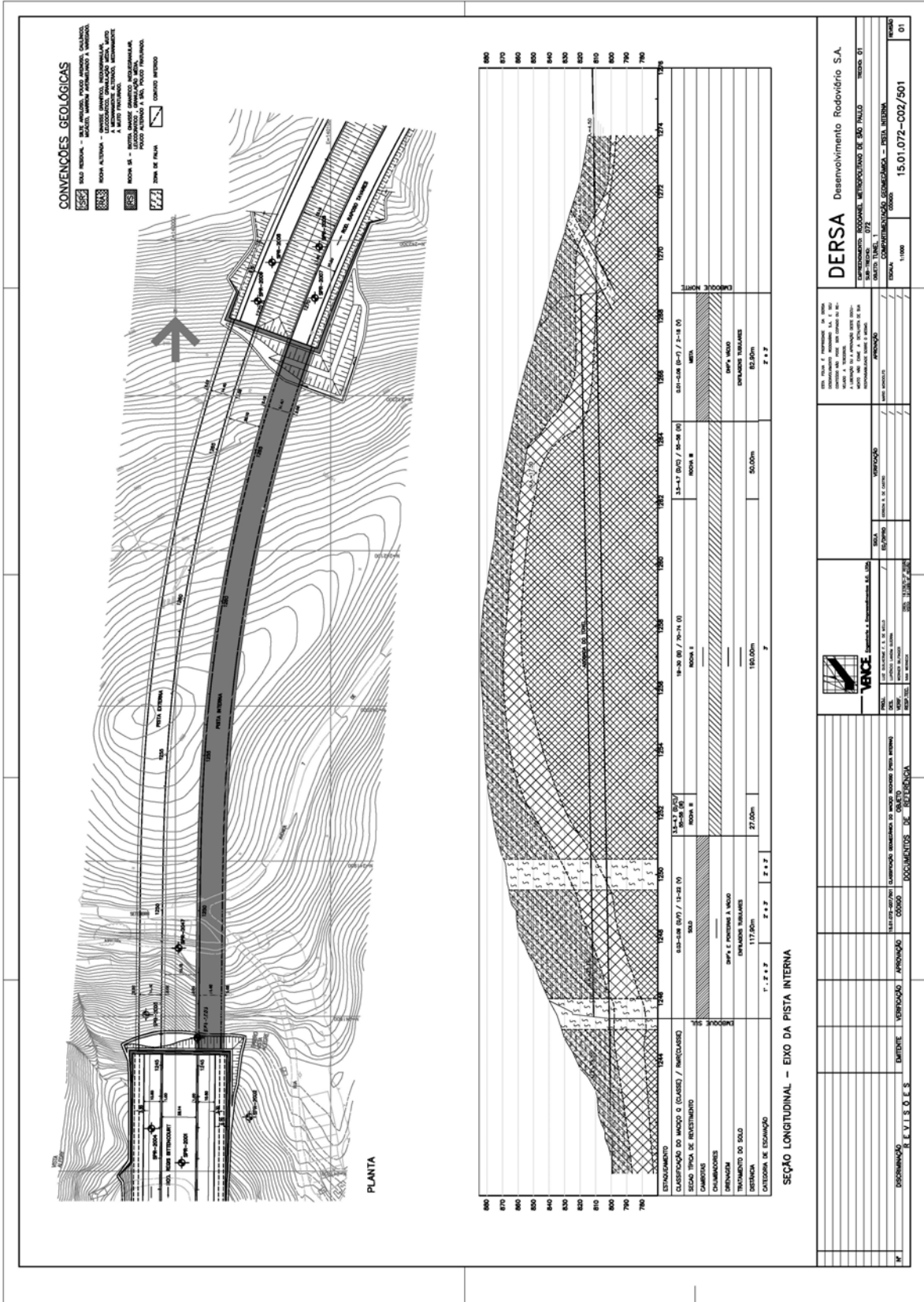
VETEC Engenharia S.C. Ltda.

PROJETO: PROJETO DE ENCRUSTAMENTO DE M. FIBRA
LOCAL: TUNEL 2 - KM 110,000 - RJ
DATA: 15.04.2010

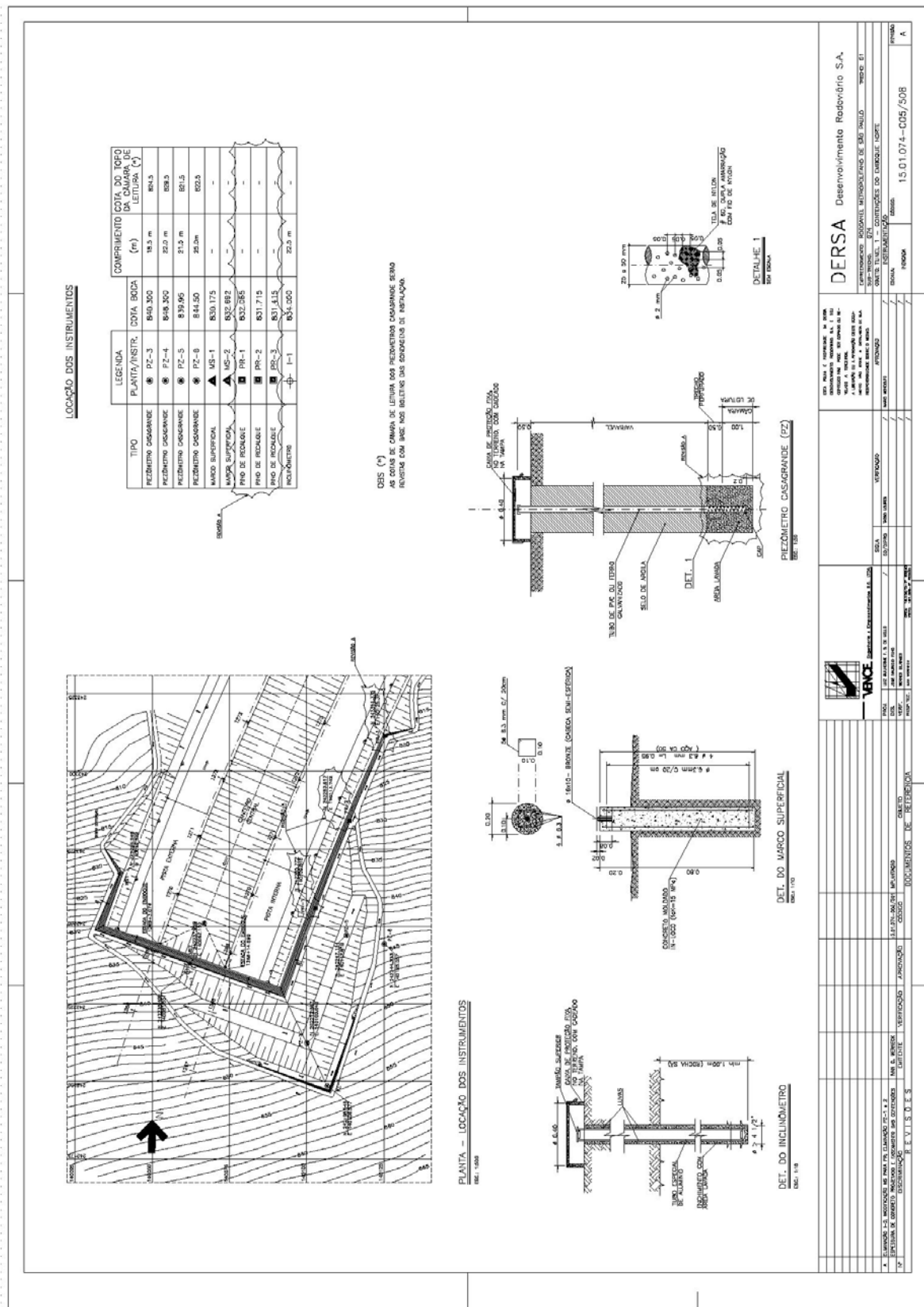
SEÇÃO TRANSVERSAL TIPO D

REV. A

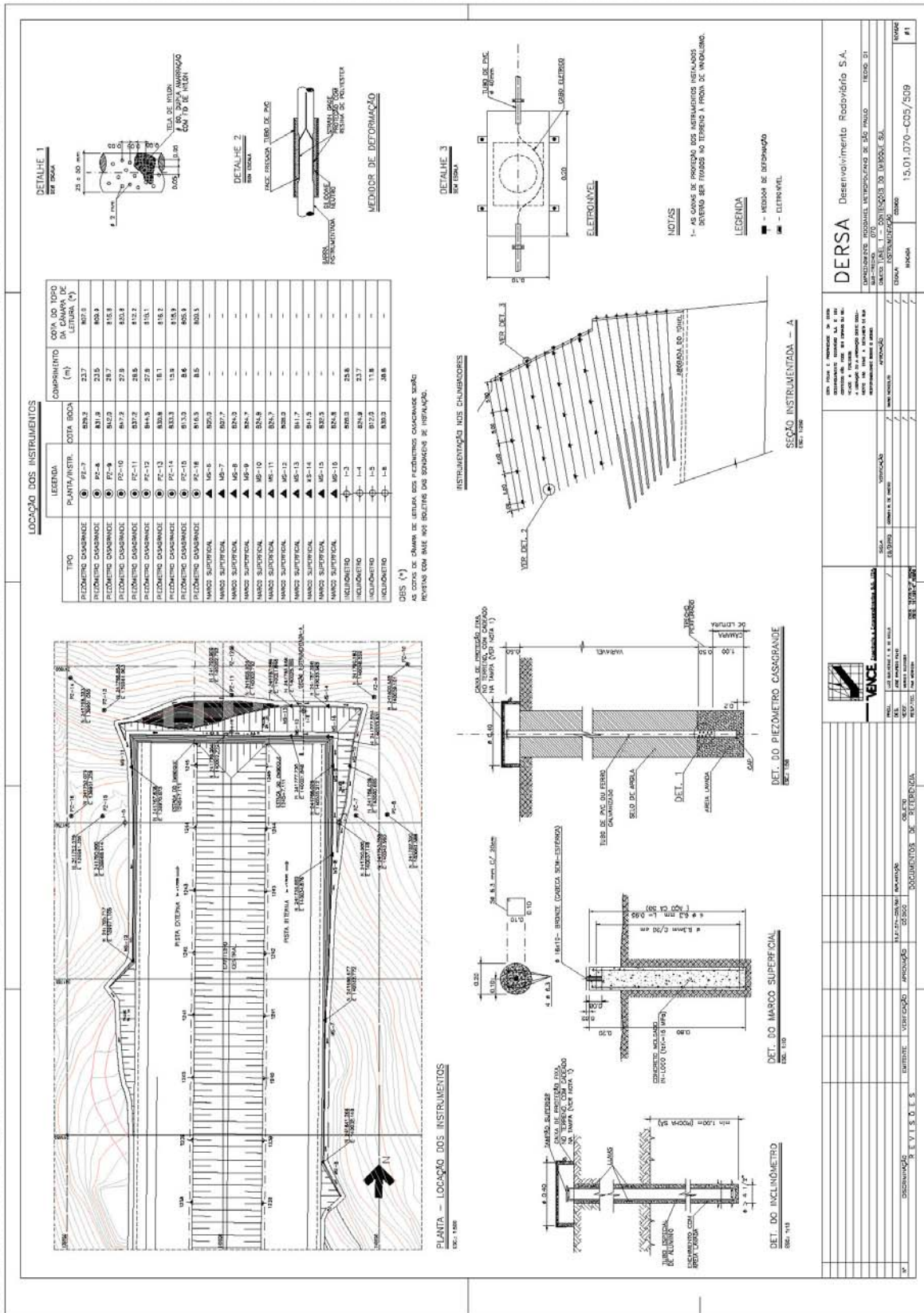
Túnel 3: Régis Bittencourt (450m)



Túnel 3: Planta e Perfil



TE-3 Emboque Gramado: Planta e Detalhes



DERSA Desenvolvimento Rodoviário S.A.
DEPARTAMENTO TÉCNICO DE PROJETOS DE TUNEL
DEPARTAMENTO DE PROJETOS DE TUNEL

PROJETO: TI-3 - EMBOQUE VISTA ALEGRE
TÍTULO: TI-3 - EMBOQUE VISTA ALEGRE
DATA: 15.01.070-C05/309

ARQUITETO: [nome] | ENG. CIVIL: [nome] | ENG. ELETRICISTA: [nome] | ENG. GEÓMETRA: [nome]

PROJ. ARQUITETÔNICO: [nome] | PROJ. ELÉTRICO: [nome] | PROJ. GEOMÉTRICO: [nome]

VERIFICADO: [nome] | APROVADO: [nome]

EMPRESA: [nome] | ENDEREÇO: [nome]

PROJETO: TI-3 - EMBOQUE VISTA ALEGRE

TÍTULO: TI-3 - EMBOQUE VISTA ALEGRE

DATA: 15.01.070-C05/309

ARQUITETO: [nome] | ENG. CIVIL: [nome] | ENG. ELETRICISTA: [nome] | ENG. GEÓMETRA: [nome]

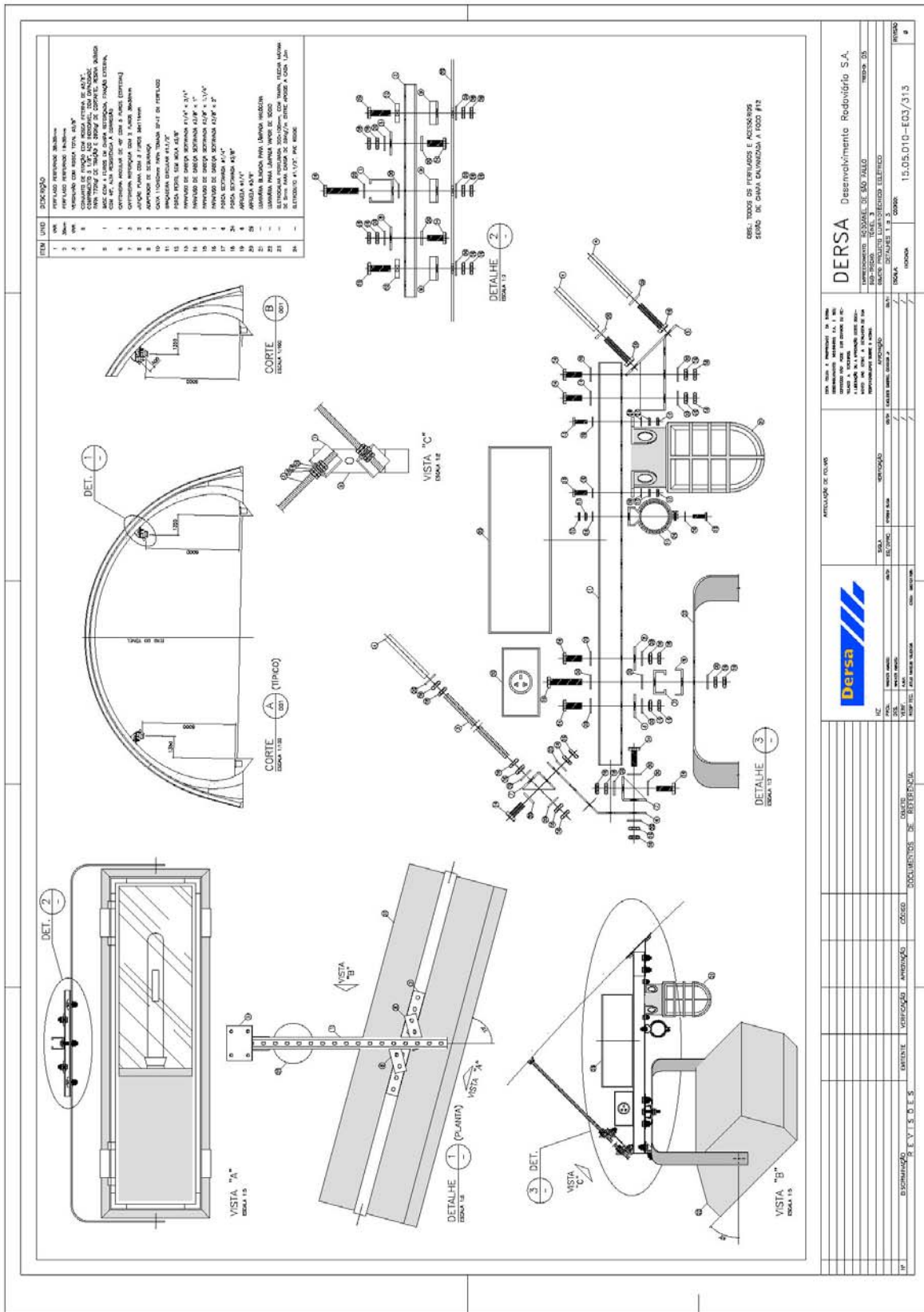
PROJ. ARQUITETÔNICO: [nome] | PROJ. ELÉTRICO: [nome] | PROJ. GEOMÉTRICO: [nome]

VERIFICADO: [nome] | APROVADO: [nome]

EMPRESA: [nome] | ENDEREÇO: [nome]

TI-3 Emboque Vista Alegre: Planta e Detalhes

Iluminação Artificial: Detalhes e Memorial de Cálculo



AUTORIZAÇÃO DE USO		AUTORIZAÇÃO DE PUNHA		AUTORIZAÇÃO DE PUNHA	
1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36

DERSA Desenvolvimento Rodoviário S.A.	
EMPRESA RESPONSÁVEL: DE SÃO PAULO	PROJETO: 05
DESCRIÇÃO: DETALHES DE ILUMINAÇÃO ELÉTRICA	
DATA: 15.05.2010	PROJETO: 15.05.2010-E-03/313
PROJETO: 15.05.2010-E-03/313	PROJETO: 15.05.2010-E-03/313



DERSA Desenvolvimento Rodoviário S.A.
DOCUMENTO TÉCNICO

CODIGO	REV.
MC-15.04.050-E03/301	A
EMISSAO	FOLHA
05/03/2001	1 de 14

EMITENTE

DERSA DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A.

EMPREENDIMENTO

Rodoanel de São Paulo

TRECHO

050

SUB-TRECHO

Túnel 2

OBJETO

Memorial de Cálculo - Iluminação

PROJETISTA	RESP. TÉCNICO	VERIFICAÇÃO	LIBERAÇÃO DERSA	APROVAÇÃO DERSA

DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

Desenhos:

15.04.050-E03/301 à 15.04.050-E03/309

DOCUMENTOS RESULTANTES

OBSERVAÇÕES

Rev. A: Alteração dos itens 3.3. e 3.4

REV.	RESP. TÉCNICO	VERIFICAÇÃO	LIBERAÇÃO	APROVAÇÃO
A				

ESTA FOLHA É PROPRIEDADE DA **DERSA** DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A. E SEU CONTEÚDO NÃO PODE SER COPIADO OU REVELADO A TERCEIROS.
A VERIFICAÇÃO E APROVAÇÃO DESTE DOCUMENTO NÃO EXIME A PROJETISTA DE SUA RESPONSABILIDADE SOBRE O MESMO.
PO -13 E



DERSA Desenvolvimento Rodoviário S.A.

DOCUMENTO TÉCNICO (CONTINUAÇÃO)

CÓDIGO MC-15.04.050-E03/001	REV. A
EMISSÃO 05/03/2001	FOLHA 2 DE 14
EMITENTE DERSA DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A.	

SUMÁRIO

1. OBJETIVO
2. CÁLCULO LUMINOTÉCNICO
3. CÁLCULO DOS CONDUTORES
4. TABELAS



DERSA Desenvolvimento Rodoviário S.A.

DOCUMENTO TÉCNICO (CONTINUAÇÃO)

CÓDIGO MC-15.04.050-E03/001	REV. A
EMISSÃO 05/03/2001	FOLHA 3 DE 14
EMITENTE DERSA DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A.	

1. OBJETIVO

Este documento tem por finalidade mostrar o resultado dos cálculos luminotécnicos e o dimensionamento dos condutores que alimentam o sistema de iluminação interna do túnel pertencente ao Rodoanel Metropolitano de São Paulo.

2. CÁLCULO LUMINOTÉCNICO

Considerando-se as características do túnel e os cálculos realizados através de computador, utilizando-se o método “ponto a ponto”, teremos as seguintes iluminâncias médias mínimas:

TABELA 1
ILUMINÂNCIAS MÉDIAS DA PISTA (ILUMINAÇÃO DIURNA)

Trecho		Comprimento (m)	Iluminância (lx)
Entrada	Zona 1	90	acomodação especial
	Zona 2	60	3.800
	Zona 3	30	1.200
	Zona 4	30	400
Zona Central		526	150

A iluminação noturna (Tabela 2) será a mesma da Zona Central durante o dia. O trecho de rodovia que se segue à entrada e saída do túnel será iluminado a níveis variando de 100 lux (próximo ao emboque) a 20 lux (último poste).

TABELA 2
ILUMINÂNCIAS MÉDIAS DA PISTA (ILUMINAÇÃO NOTURNA)

Trecho	Comprimento (m)	Iluminância (lx)
Túnel	736	150
Rodovia adjacente à saída	190	100 a 20

O índice de uniformidade adotado foi de 0,4.



DERSA Desenvolvimento Rodoviário S.A.

DOCUMENTO TÉCNICO (CONTINUAÇÃO)

CÓDIGO MC-15.04.050-E03/001		REV. A
EMIÇÃO 05/03/2001	FOLHA 4 DE 14	
EMITENTE DERSA DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A.		

3. CÁLCULO DOS CONDUTORES

3.1. Critérios de Cálculo

A seção nominal do condutor será no mínimo, a maior seção nominal calculada pelos critérios da máxima corrente admissível e da máxima queda de tensão admissível.

3.2. Parâmetros Adotados para os Cálculos

a. Tipo do Cabo

Cabo unipolar, cobre, isolamento em composto termoplástico e capa de PVC sem chumbo anti-chama, classe de isolamento 0,6/1 kV

b. Maneiras de Instalar

- Bandejas

c. Temperatura Ambiente

- 30°C

d. Limite de Queda de Tensão

- 5% (11 V)

	Instalações	Iluminação	Outros usos
A	Instalações alimentadas diretamente por um ramal de baixa tensão, a partir de uma rede de distribuição pública de baixa tensão.	4%	4%
B	Instalações alimentadas diretamente por subestação de transformação ou transformador, a partir de uma instalação de alta tensão.	7%	7%
C	Instalações que possuam fonte própria.	7%	7%

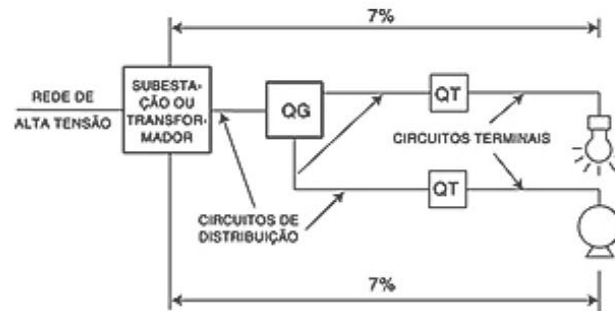
(*) De acordo com a NBR 5410



DERSA Desenvolvimento Rodoviário S.A.

DOCUMENTO TÉCNICO (CONTINUAÇÃO)

CÓDIGO MC-15.04.050-E03/001	REV. A
EMISSÃO 05/03/2001	FOLHA 5 DE 14
EMITENTE DERSA DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A.	



f. Cálculo da Corrente de Linha

$$- S = \frac{P}{V_N \times \cos \phi} \quad (\text{p/ circuito monofásico})$$

$$- S = \frac{P}{\sqrt{3} V_N \times \cos \phi} \quad (\text{p/ circuito trifásico})$$

Onde:

- I_L = Corrente total do circuito (A)
- P = Potência (W)
- V_N = Tensão nominal do circuito (V) - fase-fase ou fase-neutro
- $\cos \phi$ = Fator de potência do circuito
- F_a = Fator de agrupamento - Conforme Tabela 3
- F_t = Fator de temperatura - Conforme Tabela 4

g. Lâmpada

- Vapor de sódio de alta pressão de 400 W



DERSA Desenvolvimento Rodoviário S.A.

DOCUMENTO TÉCNICO (CONTINUAÇÃO)

CÓDIGO MC-15.04.050-E03/001	REV. A
EMISSÃO 05/03/2001	FOLHA 6 DE 14
EMITENTE DERSA DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A.	

h. Tabela de Queda

- Conforme Tabela 7

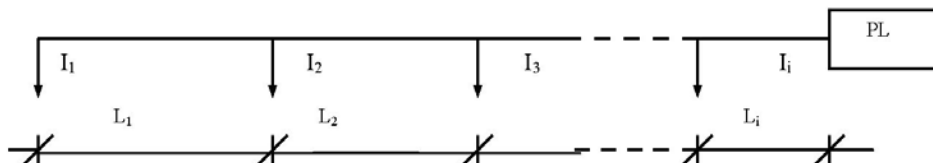
i. Tabela de Corrente

- Conforme Tabela 2

j.

Item I_L	Corrente (A)	Tensão na Carga (V)	Luminária						
			Lâmpada		Nº Lâmp. por Lum.	Perda (W)	Nº Reator por Lum.	Pot. Total p/ Ponto	Cos ϕ
			Pot. (W)	Tipo					
01	2,20	220	400	SON	1	40	1	440	0,92
02	4,40	220	400	SON	2	80	2	880	0,92

k. Cálculo da Queda de Tensão (Típico)




DERSA Desenvolvimento Rodoviário S.A.

DOCUMENTO TÉCNICO (CONTINUAÇÃO)

CÓDIGO MC-15.04.050-E03/001	REV. A
EMISSÃO 05/03/2001	FOLHA 7 DE 14
EMITENTE DERSA DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A.	

3.3. Planilha de A x Km

TABELA DE A x Km - TÚNEL 2 - EMBOQUE SUL														
CIRCUITO N°		L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆	I x L (A x Km)
1	1R,1S,1T	0,045	0,100					2,2	4,4					0,5
2	2R,2S,2T	0,140	0,140	0,130	0,130	0,120		2,2	4,4	6,6	8,8	11,0		4,2
3	3R,3S,3T	0,140	0,140	0,130	0,130	0,140		2,2	4,4	6,6	8,8	11,0		4,5
4	4R,4S,4T	0,140	0,140	0,130	0,130	0,120		2,2	4,4	6,6	8,8	11,0		4,2
5	5R,5S,5T	0,140	0,140	0,130	0,130	0,150		2,2	4,4	6,6	8,8	11,0		4,6
6	6R,6S,6T	0,140	0,140	0,130	0,130	0,170		2,2	4,4	6,6	8,8	11,0		4,8
7	7R,7S,7T	0,140	0,140	0,130	0,130	0,150		2,2	4,4	6,6	8,8	11,0		4,6
8	8R,8S,8T	0,060	0,020	0,020	0,010	0,030		2,2	6,6	11,0	15,4	19,8		1,2
9	9R,9S,9T	0,040	0,020	0,020	0,038			2,2	6,6	11,0	15,4			1,0
10	10R,10S,10T	0,045	0,025	0,020	0,040			2,2	6,6	11,0	15,4			1,1
11	11R,11S,11T	0,045	0,025	0,020	0,042			2,2	6,6	11,0	15,4			1,1
12	12R,12S,12T	0,060	0,020	0,020	0,010	0,050		2,2	6,6	11,0	15,4	19,8		1,6
13	13R,13S,13T	0,040	0,020	0,020	0,058			2,2	6,6	11,0	15,4			1,3
14	14R,14S,14T	0,045	0,025	0,020	0,060			2,2	6,6	11,0	15,4			1,4
15	15R,15S,15T	0,045	0,025	0,020	0,062			2,2	6,6	11,0	15,4			1,4
16	16S	0,600						5,5						3,3
17	17R,17S,17T	0,130	0,080	0,060				2,2	4,4	8,8				1,2
18	18R,18S,18T	0,130	0,080	0,120				2,2	4,4	8,8				1,7
19	19R,19S,19T	0,013	0,004	0,010	0,003	0,003	0,030	2,2	4,4	6,6	8,8	11,0	17,6	0,7
20	20R,20S,20T	0,013	0,004	0,010	0,003	0,003	0,050	2,2	4,4	6,6	8,8	11,0	17,6	1,1

TABELA DE A x Km - TÚNEL 2 - EMBOQUE NORTE														
CIRCUITO N°		L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆	I x L (A x Km)
1	1R,1S,1T	0,045	0,100					2,2	4,4					0,5
2	2R,2S,2T	0,140	0,140	0,130	0,130	0,130	0,040	2,2	4,4	6,6	8,8	11,0	13,2	4,9
3	3R,3S,3T	0,140	0,140	0,130	0,130	0,140		2,2	4,4	6,6	8,8	11,0		4,5
4	4R,4S,4T	0,140	0,140	0,130	0,130	0,150		2,2	4,4	6,6	8,8	11,0		4,6
5	5R,5S,5T	0,140	0,140	0,130	0,130	0,130	0,070	2,2	4,4	6,6	8,8	11,0	13,2	5,3
6	6R,6S,6T	0,140	0,140	0,130	0,130	0,170		2,2	4,4	6,6	8,8	11,0		4,8
7	7R,7S,7T	0,140	0,140	0,130	0,130	0,150		2,2	4,4	6,6	8,8	11,0		4,6
8	8R,8S,8T	0,060	0,020	0,020	0,010	0,030		2,2	6,6	11,0	15,4	19,8		1,2
9	9R,9S,9T	0,040	0,020	0,020	0,038			2,2	6,6	11,0	15,4			1,0
10	10R,10S,10T	0,045	0,025	0,020	0,040			2,2	6,6	11,0	15,4			1,1
11	11R,11S,11T	0,045	0,025	0,020	0,042			2,2	6,6	11,0	15,4			1,1
12	12R,12S,12T	0,060	0,020	0,020	0,010	0,050		2,2	6,6	11,0	15,4	19,8		1,6
13	13R,13S,13T	0,040	0,020	0,020	0,058			2,2	6,6	11,0	15,4			1,3
14	14R,14S,14T	0,045	0,025	0,020	0,060			2,2	6,6	11,0	15,4			1,4
15	15R,15S,15T	0,045	0,025	0,020	0,062			2,2	6,6	11,0	15,4			1,4
16	16S	0,600						5,5						3,3
17	17R,17S,17T	0,130	0,080	0,060				2,2	4,4	8,8				1,2
18	18R,18S,18T	0,130	0,080	0,120				2,2	4,4	8,8				1,7
19	19R,19S,19T	0,013	0,004	0,010	0,003	0,003	0,030	2,2	4,4	6,6	8,8	11,0	17,6	0,7
20	20R,20S,20T	0,013	0,004	0,010	0,003	0,003	0,050	2,2	4,4	6,6	8,8	11,0	17,6	1,1



DERSA Desenvolvimento Rodoviário S.A.

DOCUMENTO TÉCNICO (CONTINUAÇÃO)

CÓDIGO MC-15.04.050-E03/001	REV. A
EMIÇÃO 05/03/2001	FOLHA 8 DE 14
EMITENTE DERSA DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A.	

3.4. Planilhas de Dados

TABELA DE DADOS: TÚNEL 2 - EMBOQUE SUL																		
CIRCUITO	TENSÃO (V)	SISTEMA 1Ø ou 3Ø	PELO CRITÉRIO DE MÁXIMA QUEDA DE TENSÃO ADMISSÍVEL					PELO CRITÉRIO DE MÁXIMA CORRENTE ADMISSÍVEL					BITOLA DO CONDUTOR ESCOLHIDO (mm ²)			PROTEÇÃO		
			I x L (A x Km)	ΔV _{máx. Adm.} (%)		QUEDA TENSÃO V/A.Km	F.P.	BITOLA COND. (mm ²)	CORR. TOTAL (A)	Fa	Ft	BITOLA COND. (mm ²)	FASE	NEUTRO	TERRA	DISJ. (A)	FUS. DZ (A)	FUS. NH (A)
				V														
1R,1S,1T	220	1Ø	0,50	5	11	22,00	0,92	4	6,60	0,95	0,87	1,5	4	4	16	20		
2R,2S,2T	220	1Ø	4,20	5	11	2,62	0,92	25	11,00	0,95	0,87	1,5	25	25	16	20		
3R,3S,3T	220	1Ø	4,50	5	11	2,44	0,92	25	11,00	0,95	0,87	1,5	25	25	16	20		
4R,4S,4T	220	1Ø	4,20	5	11	2,62	0,92	25	11,00	0,95	0,87	1,5	25	25	16	20		
5R,5S,5T	220	1Ø	4,60	5	11	2,39	0,92	25	11,00	0,95	0,87	1,5	25	25	16	20		
6R,6S,6T	220	1Ø	4,80	5	11	2,29	0,92	25	11,00	0,95	0,87	1,5	25	25	16	20		
7R,7S,7T	220	1Ø	4,60	5	11	2,39	0,92	25	11,00	0,95	0,87	1,5	25	25	16	20		
8R,8S,8T	220	1Ø	1,20	5	11	9,17	0,92	6	19,80	0,95	0,87	4	6	6	16	40		
9R,9S,9T	220	1Ø	1,00	5	11	11,00	0,92	6	15,40	0,95	0,87	2,5	6	6	16	30		
10R,10S,10T	220	1Ø	1,10	5	11	10,00	0,92	6	15,40	0,95	0,87	2,5	6	6	16	30		
11R,11S,11T	220	1Ø	1,10	5	11	10,00	0,92	6	15,40	0,95	0,87	2,5	6	6	16	30		
12R,12S,12T	220	1Ø	1,60	5	11	6,88	0,92	10	19,80	0,95	0,87	2,5	10	10	16	40		
13R,13S,13T	220	1Ø	1,30	5	11	8,46	0,92	10	15,40	0,95	0,87	4	10	10	16	30		
14R,14S,14T	220	1Ø	1,40	5	11	7,86	0,92	10	15,40	0,95	0,87	2,5	10	10	16	30		
15R,15S,15T	220	1Ø	1,40	5	11	7,86	0,92	10	15,40	0,95	0,87	2,5	10	10	16	30		
16S	220	1Ø	3,30	5	11	3,33	0,92	16	5,45	0,95	0,87	2,5	16	16	16	20		
17R,17S,17T	220	1Ø	1,20	5	11	9,17	0,92	10	8,80	0,95	0,87	1,5	10	10	10	20		
18R,18S,18T	220	1Ø	1,70	5	11	6,47	0,92	10	8,80	0,95	0,87	1,5	10	10	10	20		
19R,19S,19T	220	1Ø	0,70	5	11	15,71	0,92	6	14,90	0,95	0,87	1,5	10	10	10	20		
20R,20S,20T	220	1Ø	1,10	5	11	10,00	0,92	6	14,90	0,95	0,87	1,5	10	10	10	20		

TABELA DE DADOS: TÚNEL 2 - EMBOQUE NORTE																		
CIRCUITO	TENSÃO (V)	SISTEMA 1Ø ou 3Ø	PELO CRITÉRIO DE MÁXIMA QUEDA DE TENSÃO ADMISSÍVEL					PELO CRITÉRIO DE MÁXIMA CORRENTE ADMISSÍVEL					BITOLA DO CONDUTOR ESCOLHIDO (mm ²)			PROTEÇÃO		
			I x L (A x Km)	ΔV _{máx. Adm.} (%)		QUEDA TENSÃO V/A.Km	F.P.	BITOLA COND. (mm ²)	CORR. TOTAL (A)	Fa	Ft	BITOLA COND. (mm ²)	FASE	NEUTRO	TERRA	DISJ. (A)	FUS. DZ (A)	FUS. NH (A)
				V														
1R,1S,1T	220	1Ø	0,50	5	11	22,00	0,92	4	6,60	0,95	0,87	1,5	4	4	16	20		
2R,2S,2T	220	1Ø	4,90	5	11	2,24	0,92	25	13,20	0,95	0,87	1,5	25	25	16	20		
3R,3S,3T	220	1Ø	4,50	5	11	2,44	0,92	25	11,00	0,95	0,87	1,5	25	25	16	20		
4R,4S,4T	220	1Ø	4,60	5	11	2,39	0,92	25	11,00	0,95	0,87	1,5	25	25	16	20		
5R,5S,5T	220	1Ø	5,30	5	11	2,08	0,92	25	13,20	0,95	0,87	1,5	25	25	16	20		
6R,6S,6T	220	1Ø	4,80	5	11	2,29	0,92	25	11,00	0,95	0,87	1,5	25	25	16	20		
7R,7S,7T	220	1Ø	4,60	5	11	2,39	0,92	25	11,00	0,95	0,87	1,5	25	25	16	20		
8R,8S,8T	220	1Ø	1,20	5	11	9,17	0,92	6	19,80	0,95	0,87	4	6	6	16	40		
9R,9S,9T	220	1Ø	1,00	5	11	11,00	0,92	6	15,40	0,95	0,87	2,5	6	6	16	30		
10R,10S,10T	220	1Ø	1,10	5	11	10,00	0,92	6	15,40	0,95	0,87	2,5	6	6	16	30		
11R,11S,11T	220	1Ø	1,10	5	11	10,00	0,92	6	15,40	0,95	0,87	2,5	6	6	16	30		
12R,12S,12T	220	1Ø	1,60	5	11	6,88	0,92	10	19,80	0,95	0,87	4	10	10	16	40		
13R,13S,13T	220	1Ø	1,30	5	11	8,46	0,92	10	15,40	0,95	0,87	2,5	10	10	16	30		
14R,14S,14T	220	1Ø	1,40	5	11	7,86	0,92	10	15,40	0,95	0,87	2,5	10	10	16	30		
15R,15S,15T	220	1Ø	1,40	5	11	7,86	0,92	10	15,40	0,95	0,87	2,5	10	10	16	30		
16S	220	1Ø	3,30	5	11	3,33	0,92	16	5,45	0,95	0,87	2,5	16	16	16	20		
17R,17S,17T	220	1Ø	1,20	5	11	9,17	0,92	10	8,80	0,95	0,87	1,5	10	10	10	20		
18R,18S,18T	220	1Ø	1,70	5	11	6,47	0,92	10	8,80	0,95	0,87	1,5	10	10	10	20		
19R,19S,19T	220	1Ø	0,70	5	11	15,71	0,92	6	14,90	0,95	0,87	1,5	10	10	10	20		
20R,20S,20T	220	1Ø	1,10	5	11	10,00	0,92	6	14,90	0,95	0,87	1,5	10	10	10	20		


DERSA Desenvolvimento Rodoviário S.A.

DOCUMENTO TÉCNICO (CONTINUAÇÃO)

CÓDIGO MC-15.04.050-E03/001	REV. A
EMISSÃO 05/03/2001	FOLHA 9 DE 14
EMITENTE DERSA DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A.	

4. TABELAS

4.1. TABELA 1 – Maneiras de Instalar

Maneiras de Instalar	PVC 750V	PVC 0,6 / 1kV	EPR 0,6 / 1kV
	BWF Antiflam	Unipolar (1condutor)	Unipolar (1condutor)
Eletroduto embutido em parede isolante	A	A	A
Embutimento direto em parede isolante	—	A	A
Eletroduto contido em canaleta fechada	A	A	A
Eletroduto aparente	B	B	B
Calha	B	B	B
Moldura	B	B	B
Eletroduto em canaleta aberta ou ventilada	B	B	B
Eletroduto embutido em alvenaria	B	B	B
Bloco alveolado	—	B	B
Fixação direta a parede ou teto	—	C	C
Embutimento direto em alvenaria	—	C	C
Canaleta aberta ou ventilada	—	C	C
Eletroduto enterrado no solo	—	D	D
Diretamente enterrado	—	D	D
Canaleta fechada	—	D	D
Ao ar livre (fixação direta)	—	—	—
Agrupados ao ar livre (fixação direta)	—	F	F
Espaçados ao ar livre (fixação direta)	—	G	G
Agrupados sobre isoladores	F	—	—
Espaçados sobre isoladores	G	—	—
Agrupados em linha aérea externa	F	—	—
Espaçados em linha aérea externa	G	—	—
Bandejas não perfuradas ou prateleiras	—	M	M
Bandejas perfuradas	—	N	N
Bandejas verticais perfuradas	—	P	P
Escadas para cabos ou suportes	—	Q	Q



DERSA Desenvolvimento Rodoviário S.A.

DOCUMENTO TÉCNICO (CONTINUAÇÃO)

CÓDIGO MC-15.04.050-E03/001	REV. A
EMISSÃO 05/03/2001	FOLHA 10 DE 14
EMITENTE DERSA DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A.	

4.2. TABELA 2 – Capacidades de Condução de Corrente, em Ampéres

- Temperatura no condutor: 70 °C;
- Temperatura ambiente: 30 °C para instalação não enterrada e 20 °C para instalação enterrada.

Seções nominais (mm ²)	Maneiras de instalar definidas na tabela 1						
	Cabos multipolares		Cabos unipolares ou condutores isolados				
	E	E	F	F	F	G	G
	Cabos bipolares	Cabos tripolares e tetrapolares	2 condutores isolados ou 2 cabos unipolares	Condutores isolados ou cabos unipolares em trifólio	3 cabos unipolares ou 3 condutores isolados	Contíguos	Espaçados horizontalmente
	1	2	3	4	5	6	7
1	17	14	17	13	14	19	16
1,5	22	18,5	23	19	19	26	22
2,5	30	25	31	26	26	35	30
4	40	34	42	35	36	47	41
6	51	43	53	45	46	60	52
10	70	60	71	60	62	81	70
16	94	80	95	81	83	108	94
25	119	101	131	110	114	146	130
35	131	117	164	144	171	147	146
50	181	153	196	167	174	219	197
70	232	196	251	216	225	281	254
95	282	238	304	264	275	341	311
120	328	276	352	307	320	396	362
150	379	319	406	356	371	456	419
185	434	364	463	407	426	521	480
240	513	430	546	482	504	615	569
300	594	497	629	556	582	709	659
400	715	597	754	677	707	852	795
500	826	689	868	784	819	982	920



DERSA Desenvolvimento Rodoviário S.A.

DOCUMENTO TÉCNICO (CONTINUAÇÃO)

CÓDIGO MC-15.04.050-E03/001	REV. A
EMISSÃO 05/03/2001	FOLHA 11 DE 14
EMITENTE DERSA DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A.	

4.3. TABELA 3 – Fatores de Correção para Agrupamento de mais de um Circuito com Cabo Unipolar. Aplicáveis aos Valores da Tabela 2

Tipo de linha	Esquema	Camadas de bandejas, escadas, prateleiras ou suportes	Número de circuitos trifásicos			Usar como multiplicador para:			
			1	2	3				
Bandejas não perfuradas ou prateleiras	M		Contíguos	1	0,95	0,9	0,85	Coluna 5 da tabela 2	
				2	0,92	0,85	0,8		
				3	0,9	0,8	0,75		
Bandejas perfuradas	N		Contíguos	1	0,95	0,9	0,85		
				2	0,95	0,85	0,8		
				3	0,9	0,85	0,8		
Bandejas verticais perfuradas	P		Contíguos	1	0,95	0,85	—		
Escadas para cabos ou suportes	J		Contíguos	1	1	0,95	0,95		
				2	0,95	0,9	0,9		
				3	0,95	0,9	0,85		
Bandejas não perfuradas ou prateleiras	M		Contíguos	1	1	0,95	0,95		Coluna 5 da tabela 2
				2	0,95	0,9	0,85		
				3	0,95	0,9	0,85		
Bandejas perfuradas	N		Contíguos	1	1	1	0,95		
				2	0,95	0,95	0,9		
				3	0,95	0,9	0,85		
Bandejas verticais perfuradas	P		Contíguos	1	1	0,9	0,9		
Escadas para cabos ou suportes	Q		Contíguos	1	1	1	1		
				2	0,95	0,95	0,95		
				3	0,95	0,95	0,9		



DERSA Desenvolvimento Rodoviário S.A.

DOCUMENTO TÉCNICO (CONTINUAÇÃO)

CÓDIGO MC-15.04.050-E03/001	REV. A
EMIÇÃO 05/03/2001	FOLHA 12 DE 14
EMITENTE DERSA DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A.	

4.4. TABELA 4 – Fatores de Correção para Temperaturas Ambientais diferentes de 30° C para Cabos Não-Enterrados e de 20° C (Temperatura do Solo) para Cabos Enterrados

Temperatura (°C)	Isolação			
	PVC	EPR ou XLPE	PVC	EPR ou XLPE
	Ambiente		Do solo	
10	1,22	1,15	1,1	1,07
15	1,17	1,12	1,05	1,04
20	1,12	1,08	1	1
25	1,06	1,04	0,95	0,96
30	1	1	0,89	0,93
35	0,94	0,96	0,84	0,89
40	0,87	0,91	0,77	0,85
45	0,79	0,87	0,71	0,8
50	0,71	0,82	0,63	0,76
55	0,61	0,76	0,55	0,71
60	0,5	0,71	0,45	0,65
65	—	0,65	—	0,6
70	—	0,58	—	0,53
75	—	0,5	—	0,46
80	—	0,41	—	0,38

(*) De acordo com a tabela 35 da NBR 5410

4.5. TABELA 5 – Seções Mínimas dos Condutores de Proteção

Seção dos condutores fase (mm ²)	Seção mínima do condutor de proteção (mm ²)
$S \leq 16$	S
$16 < S \leq 35$	16
$S > 35$	S/2



DERSA Desenvolvimento Rodoviário S.A.

DOCUMENTO TÉCNICO (CONTINUAÇÃO)

CÓDIGO MC-15.04.050-E03/001	REV. A
EMIÇÃO 05/03/2001	FOLHA 13 DE 14
EMITENTE DERSA DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A.	

4.6. TABELA 6 – Seções do Condutor Neutro

Seção dos condutores fase (mm ²)	Seção mínima do condutor neutro (mm ²)
$S \leq 25$	S
35	25
50	25
70	35
95	50
120	70
150	70
185	95
240	120
300	150
400	185



DERSA Desenvolvimento Rodoviário S.A.

DOCUMENTO TÉCNICO (CONTINUAÇÃO)

CODIGO MC-15.04.050-E03/001	REV. A
EMISSÃO 05/03/2001	FOLHA 14 DE 14
EMITENTE DERSA DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A.	

4.7. TABELA 7 – Queda de Tensão em V/A X Km

Seção Nominal (mm²)	Cabos Unipolares												Cabos e bipolares		Cabos tri tetrapolare			
	Circuito						Circuito						Circuito Trifásico		Circuito Monofásico		Circuito	
	S =		S =		S = 2D		S =		S =		S = 2D		C		C		C	
	FP =	FP =	FP =	FP =	FP =	FP =	FP =	FP =	FP =	FP =	FP =	FP =	FP =	FP =	FP =	FP =	FP =	FP =
	1,5	23,6	27,8	23,7	27,8	23,4	27,6	20,5	24	20,5	24,1	20,3	24	20,2	23,9	23,3	27,6	20,2
2,5	14,6	17,1	14,7	17,1	14,4	17	12,7	14,8	12,7	14,8	12,5	14,7	12,4	14,7	14,3	16,9	12,4	14,7
4	9,3	10,7	9,3	10,7	9,1	10,6	8	9,3	8,1	9,3	7,9	9,2	7,8	9,2	9	10,6	7,8	9,1
6	6,3	7,2	6,4	7,2	6,1	7,1	5,5	6,3	5,5	6,3	5,3	6,2	5,2	6,1	6	7,1	5,2	6,1
10	3,9	4,4	3,9	4,4	3,7	4,3	3,4	3,8	3,4	3,8	3,2	3,7	3,2	3,7	3,6	4,2	3,1	3,7
16	2,6	2,8	2,6	2,8	2,4	2,7	2,2	2,4	2,3	2,5	2,1	2,4	2	2,3	2,3	2,7	2	2,3
25	1,73	1,83	1,8	1,86	1,55	1,76	1,52	1,59	1,57	1,62	1,4	1,53	1,32	1,49	1,5	1,71	1,31	1,48
35	1,33	1,36	1,39	1,39	1,2	1,29	1,17	1,19	1,22	1,22	1,06	1,13	0,98	1,09	1,12	1,25	0,97	1,08
50	1,05	1,04	1,11	1,07	0,93	0,97	0,93	0,91	0,98	0,94	0,82	0,85	0,75	0,82	0,85	0,93	0,74	0,81
70	0,81	0,76	0,87	0,8	0,7	0,71	0,72	0,67	0,77	0,7	0,63	0,62	0,55	0,59	0,62	0,67	0,54	0,58
95	0,65	0,59	0,71	0,62	0,56	0,54	0,58	0,52	0,64	0,55	0,5	0,47	0,43	0,44	0,48	0,5	0,42	0,43
120	0,57	0,49	0,63	0,52	0,48	0,44	0,51	0,43	0,56	0,46	0,43	0,39	0,36	0,36	0,4	0,41	0,35	0,35
150	0,5	0,42	0,56	0,45	0,42	0,38	0,45	0,37	0,51	0,4	0,38	0,34	0,31	0,3	0,35	0,34	0,3	0,3
185	0,44	0,36	0,51	0,39	0,37	0,32	0,4	0,32	0,46	0,35	0,34	0,29	0,27	0,25	0,3	0,29	0,26	0,25
240	0,39	0,3	0,45	0,33	0,33	0,27	0,35	0,27	0,41	0,3	0,3	0,24	0,23	0,21	0,26	0,24	0,22	0,2
300	0,35	0,26	0,41	0,29	0,3	0,23	0,32	0,23	0,37	0,26	0,28	0,21	0,21	0,18	0,23	0,2	0,2	0,18
400	0,32	0,22	0,37	0,26	0,27	0,21	0,29	0,2	0,34	0,23	0,25	0,19	0,19	0,15	—	—	—	—
500	0,28	0,2	0,34	0,23	0,25	0,18	0,26	0,18	0,32	0,21	0,24	0,17	0,17	0,14	—	—	—	—
630	0,26	0,17	0,32	0,21	0,24	0,16	0,24	0,16	0,29	0,19	0,22	0,15	0,16	0,12	—	—	—	—
800	0,23	0,15	0,29	0,18	0,22	0,15	0,22	0,14	0,27	0,17	0,21	0,14	0,15	0,11	—	—	—	—
1000	0,21	0,14	0,27	0,17	0,21	0,14	0,2	0,13	0,25	0,16	0,2	0,13	0,14	0,1	—	—	—	—

NOTAS:

- Os valores da tabela admitem uma temperatura no condutor de 70 °C;
- Válido para instalação em eletroduto não-magnético e diretamente enterrado.
- Aplicável para instalação em bandeja.

ANEXO B – CONVERSÃO DE UNIDADES

Grandeza	Símbolo	Relações	Unidade	Nome	Conversões
Comprimento distância raio	C D R ou r		m	metro	1 ft = 0,305 m 1 m = 3,28 ft 1 milha = 1,609 x 10 ³ m
Área	S	$S = C^2$	m ²	metro quadrado	1 ft ² = 0,093 m ² 1 m ² = 10,76 ft ²
Ângulo Sólido	ω	$\omega = S/r^2$	sr	esferorradiano	
Intensidade Luminosa	I	$I = \Phi/\omega$	cd	candela	
Fluxo Luminoso	Φ	$\Phi = E S$	lm	lúmen	
Iluminância	E	$E = \Phi/S$	lx	lux	1 fc = 10,76 lx 1 lx = 0,093 fc 1 ph = 10.000 lx
Exitância	M	$M = \Phi/S$	lm/m ²	lúmen por metro quadrado	1 lm/ft ² = 10,76 lm/m ² 1 lm/m ² = 0,093 lm/ft ² 1 lm/cm ² = 10.000 lm/m ²
Luminância	L	$L = I/Sap$ $L = \rho E/\pi$	cd/m ²	candela por metro quadrado	1 cd/ft ² = 10,76 cd/m ² 1 cd/m ² = 0,093 cd/ft ² 1 cd/cm ² = 10.000 cd/m ²
Luminância sistema equivalente	Lse	$Lse = \rho E$	L ft-L	blondel Lambert foot-Lambert	1 cd/m ² = 3,14 blondel 1 cd/cm ² = 3,14 L 1 cd/ft ² = 3,14 ft-L
Refletância	ρ	$\rho = \Phi r/\Phi i$	%		
Transmitância	τ	$\tau = \Phi t/\Phi i$	%		

Observações:

foot	ft		
square foot	ft ²		
footcandle	fc	lm/ft ²	
lux	lx	lm/m ²	
phot	ph	lm/cm ²	
nit	nt	cd/m ²	
stilb	sb	cd/cm ²	
apostilb	asb	cd/π m ²	apostilb = blondel
Lambert	L	cd/π cm ²	
foot-Lambert	ft-L	cd/π ft ²	
milhas por hora		mph	
Fluxo Luminoso Incidente		Φi	
Fluxo Luminoso Refletido		Φr	
Fluxo Luminoso Transmitido		Φt	

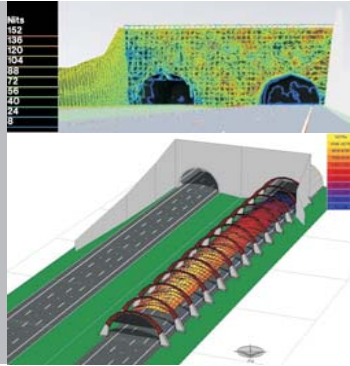
FONTE - IESNA, 2000; HOPKINSON, PETHERBRIDGE, LONGMORE, 1975

Concepção

Estratégias 1, 2, 3, 4 e 5

Sistema para Adaptação Visual (SAV)

Simulações



Cenário Existente

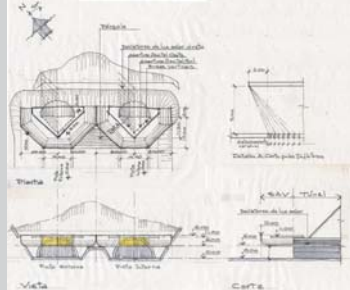
Diagnóstico

1. Elevada luminância na pista
2. Elevada luminância no entorno do portal
3. Orientação 20° NE
4. Efeito Buraco Negro

Lth	[cd/m ²]	308
Eth	[lx]	3.225
Consumo	[kWh/dia]	2.788
Consumo de Referência (CR)		100,00%



Cálculo e Projeto



Estratégia 1

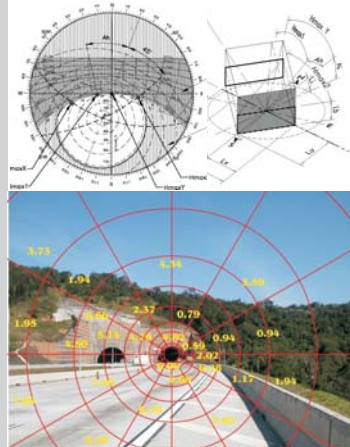
Descrição

- a. Tratamento Superficial
(Redução da refletância do pavimento de 30% para 15%)
(Restauro do paisagismo)

Lth	[cd/m ²]	228
Eth	[lx]	2.383
Consumo	[kWh/dia]	2.228
Porcentagem do Consumo CR		79,92%



Levantamentos



Estratégias 1 + 2

Descrição

- a. Tratamento Superficial
- b. Elementos de Controle da Luz
(Grade caixa-de-ovo no entorno do portal)

Lth	[cd/m ²]	177
Eth	[lx]	1.852
Consumo	[kWh/dia]	1.890
Porcentagem do Consumo CR		67,80%



Estratégias 1 + 2 + 3 + 4

Descrição

- a. Tratamento Superficial
- b. Elementos de Controle da Luz
- c. Desenho do Portal (brises horizontais)
- d. Túnel Falso (DAV)

Lth	[cd/m ²]	177
Eth	[lx]	1.852
Consumo	[kWh/dia]	982
Porcentagem do Consumo CR		35,23%



Estratégias 1 + 2 + 3 + 4 + 5

Descrição

- a. Tratamento Superficial
- b. Elementos de Controle da Luz
- c. Desenho do Portal
- d. Túnel Falso
- e. Módulos Fotovoltaicos

Lth	[cd/m ²]	177
Eth	[lx]	1.852
Consumo	[kWh/dia]	972
Sistema de iluminação autônomo		



Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)