



COPPE/UFRJ

OTIMIZAÇÃO DO CUSTO DE ELEMENTOS METÁLICOS E MISTOS AÇO-
CONCRETO SOB TEMPERATURA AMBIENTE E INCÊNDIO

João Câmara Neto

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Eduardo de Miranda Batista
Alexandre Landesmann

Rio de Janeiro
Dezembro de 2008

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

OTIMIZAÇÃO DO CUSTO DE ELEMENTOS METÁLICOS E MISTOS AÇO-
CONCRETO SOB TEMPERATURA AMBIENTE E INCÊNDIO

João Câmara Neto

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Prof. Eduardo de Miranda Batista, D.Sc.

Prof. Alexandre Landesmann, D.Sc.

Prof. Ricardo Hallal Fakury, D.Sc.

Prof. Ricardo Valeriano Alves, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2008

Câmara Neto, João

Otimização do Custo de Elementos Metálicos e Mistos
Aço-Concreto Sob Temperatura Ambiente e Incêndio /
João Câmara Neto. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2008.

XXIV, 128 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Eduardo de Miranda Batista

Alexandre Landesmann

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Civil, 2008.

Referencias Bibliográficas: p. 123-128.

1. Estruturas mistas. 2. Otimização. 3. Incêndio. I.
Batista, Eduardo de Miranda, et al. II. Universidade
Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de
Engenharia Civil. III. Título.

A Roberta e Joãozinho,
aos meus Pais.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Roberta, por todo o incentivo e companheirismo nesta nossa jornada longe de casa.

Aos meus pais, por toda a educação que me deram e por sempre acreditarem no meu trabalho.

Ao meu filho, por me dar forças para lutar por meus objetivos.

Ao orientador Alexandre Landesmann, que sempre esteve disposto a esclarecer minhas dúvidas, transmitir novos ensinamentos e incentivar esta pesquisa. Meus sinceros agradecimentos.

Ao orientador Eduardo de Miranda Batista, pela confiança e auxílio.

A todos os colegas da COPPE/UFRJ, especialmente: Juan, Aldo, Lúcio, Bruno, Hector, Diego, Aloísio, Felipe, Juliana, Luciene, Flávia, Tamara, Rosana, Vanessa, Jessick, Janaina, Daniel e Paulo.

A todos os professores do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, pelos ensinamentos e atenção durante o curso.

Aos meus sogros Ribeiro e Juliana, pela confiança, incentivo e apoio.

À minha segunda mãe Paula, à minha tia Deta, meus primos e amigos, por sempre estarem presente na minha vida.

Às pessoas que conheci no Rio de Janeiro e que foram importantes nesta minha trajetória: Cláudia, Gustavo, Mauro Jorge da Costa Santos, Paulo Braga, além de todos os meus colegas da Chemtech.

A Marcos Martinez Silvos, pela cessão do Algoritmo Genético básico utilizado neste trabalho.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

OTIMIZAÇÃO DO CUSTO DE ELEMENTOS METÁLICOS E MISTOS AÇO- CONCRETO SOB TEMPERATURA AMBIENTE E INCÊNDIO

João Câmara Neto

Dezembro/2008

Orientadores: Eduardo de Miranda Batista
Alexandre Landesmann

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho apresenta um modelo numérico-computacional para a otimização do custo de elementos (vigas e pilares) metálicos e mistos (aço-concreto) em temperatura ambiente e em situação de incêndio, tendo como variáveis de projeto: perfis metálicos, armaduras e materiais de proteção térmica disponíveis comercialmente. O modelo é baseado no método dos algoritmos genéticos. O dimensionamento é feito seguindo recomendações vigentes em normatizações nacionais e internacionais. Os resultados obtidos indicam que modelos numéricos de otimização podem ser facilmente incorporados à prática de dimensionamento de estruturas metálicas, levando-se em consideração a especificidade de cada região (material e mão-de-obra), permitindo-se uma avaliação mais precisa dos custos associados ao dimensionamento de seções à temperatura ambiente e em situação de incêndio.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

COST OPTIMIZATION OF STEEL AND COMPOSITE STEEL-CONCRETE
ELEMENTS IN AMBIENT TEMPERATURE AND FIRE SITUATIONS

João Câmara Neto

December/2008

Advisors: Eduardo de Miranda Batista
Alexandre Landesmann

Department: Civil Engineering

This work presents a numerical model developed to optimize the cost of steel and composite (steel-concrete) elements (beams and columns) in ambient temperature and fire situations. The design variables were the steel profile, the reinforcement bars and the fire protection material commercially available. The model, based on genetic algorithm methods, conforms to current standards in national and international codes. The results indicates that numerical models for optimization can be easily incorporated in the design project for steel structures, being able to take into account regional differences in the costs of material and labor, thus providing a more accurate estimate of costs associated with the design of sections submitted to ambient temperature and fire situations.

ÍNDICE

1. <i>INTRODUÇÃO</i>	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	6
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	7
2. <i>MÉTODO SIMPLIFICADO PARA RESISTÊNCIA DOS ELEMENTOS</i>	9
2.1 VIGAS MISTAS DE ALMA CHEIA.....	9
2.1.1 DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO: TEMPERATURA AMBIENTE	12
2.1.2 DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO: SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	16
2.1.2.1 Propriedades térmicas e mecânicas do aço e do concreto a altas temperaturas	16
2.1.2.2 Vigas mistas sem material de proteção	21
2.1.2.3 Vigas mistas com material de proteção.....	31
2.2 VIGAS MISTAS COM CONCRETO ENTRE AS MESAS	36
2.2.1 DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO: TEMPERATURA AMBIENTE	38
2.2.2 DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO: SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	41
2.3 PILARES	49
2.3.1. DIMENSIONAMENTO DE PILARES NÃO-MISTOS: TEMPERATURA AMBIENTE	49

2.3.1.	DIMENSIONAMENTO DE PILARES NÃO-MISTOS: SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	53
2.3.2.	PILARES MISTOS.....	56
2.3.3.	DIMENSIONAMENTO DE PILARES MISTOS: TEMPERATURA AMBIENTE	59
2.3.4.	DIMENSIONAMENTO DE PILARES MISTOS: SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	65
3.	<i>OTIMIZAÇÃO</i>	75
3.1	CONCEITOS BÁSICOS PARA A OTIMIZAÇÃO	76
3.2	ALGORITMOS GENÉTICOS (AGs).....	77
3.3	APLICAÇÃO DO AG NA OTIMIZAÇÃO DO CUSTO DE ELEMENTOS METÁLICOS E MISTOS.....	86
3.3.1	VIGAS	87
3.3.2	PILARES	90
3.3.3	ALGORITMO GENÉTICO UTILIZADO	92
4.	<i>APLICAÇÃO</i>	94
4.1	DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO	94
4.2	ESTIMATIVA DE CUSTOS.....	97
4.3	ESPAÇOS DE BUSCA.....	98
4.4	RESULTADOS	98

4.4.1	VIGAS	98
4.4.2	PILARES	106
4.5	O EDIFÍCIO IDEAL	116
5.	<i>CONSIDERAÇÕES FINAIS</i>	118
5.1	CONCLUSÕES	118
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	120
6.	<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Seção transversal de uma viga mista típica.	9
Figura 2.2 – Esquema de funcionamento de viga mista com interação completa.	10
Figura 2.3– Esquema de funcionamento de viga mista com interação parcial.	10
Figura 2.4 – Tensões normais na mesa comprimida de uma viga T.	12
Figura 2.5 – Superfície típica de falha por cisalhamento.	14
Figura 2.6 – Distribuição de tensões em vigas mistas de alma cheia sob momento fletor positivo – interação completa - ABNT NBR 8800 (2007).	16
Figura 2.7 – Calor específico do aço em função da temperatura - ABNT NBR 14323 (1999).	18
Figura 2.8 – Fatores de redução para a resistência ao escoamento e módulo de elasticidade do aço a altas temperaturas - ABNT NBR 14323 (1999).	19
Figura 2.9 – Fatores de redução para a resistência característica à compressão e módulo de elasticidade do concreto a altas temperaturas - ABNT NBR 14323 (1999).	21
Figura 2.10 – Divisão do componente de aço (perfil I) para a distribuição de temperatura.	22
Figura 2.11 – Curva de incêndio padrão - ISO-834 (1999).	24
Figura 2.12 – Exemplo de variação da temperatura média em lajes de concreto ao longo do tempo de incêndio.	26
Figura 2.13 – Distribuição de tensões em viga mista em situação de incêndio.	28

Figura 2.14 – Distribuição da temperatura no perfil metálico ao longo do tempo.	29
Figura 2.15 – Momento resistente <i>versus</i> TRRF, para a seção analisada.	30
Figura 2.16 – Posição da linha neutra plástica <i>versus</i> TRRF, para a seção analisada. ..	30
Figura 2.17 – Aplicação de argamassa projetada em viga metálica (DIAS, 2002).	31
Figura 2.18 – Aspecto final de viga metálica com proteção de argamassa projetada (DIAS, 2002).	32
Figura 2.19 – Distribuição da temperatura no perfil metálico ao longo do tempo.	34
Figura 2.20 – Momento resistente <i>versus</i> TRRF, para a viga analisada.	34
Figura 2.21 – Posição da linha neutra plástica <i>versus</i> TRRF, para a viga analisada.	35
Figura 2.22 – Métodos construtivos para a interação do concreto entre as mesas e o perfil metálico.	37
Figura 2.23 – Detalhes construtivos para as VMCCs, com estribo soldado na alma do perfil.	38
Figura 2.24 – Definição de largura b_c	39
Figura 2.25 – Distribuição de tensões em VMCC em temperatura ambiente.	40
Figura 2.26 – Parâmetros para o cálculo da VMCC em situação de incêndio.	43
Figura 2.27 – Distribuição de tensões em VMCC em situação de incêndio.	46
Figura 2.28 – Momento resistente <i>versus</i> TRRF, para a seção analisada.	47
Figura 2.29 – Posição da linha neutra plástica <i>versus</i> TRRF, para a seção analisada. ..	48

Figura 2.30 – Variação do momento resistente em temperatura ambiente com a armadura utilizada.....	49
Figura 2.31 – Curvas de dimensionamento à compressão - EUROCÓDIGO 3 p1.1 (2005).....	51
Figura 2.32 – Comprimentos de flambagem em situação de incêndio (SSEDTA, 2001).	55
Figura 2.33 – Força normal resistente <i>versus</i> comprimento do pilar, para diferentes TRRF.....	55
Figura 2.34 – Força normal resistente <i>versus</i> comprimento do pilar (apenas situação de incêndio).....	56
Figura 2.35 – Seções transversais típicas para os pilares mistos de aço e concreto (SSEDTA, 2001).....	57
Figura 2.36 – Pilar misto totalmente revestido (a) e parcialmente revestido (b) (CAMPOS, 2006).....	58
Figura 2.37 – Seção I ou H fletida em relação ao eixo x - ABNT NBR 8800 (2007)...	63
Figura 2.38 - Seção I ou H fletida em relação ao eixo y - ABNT NBR 8800 (2007)....	64
Figura 2.39 – Seção transversal reduzida para o cálculo em situação de incêndio - ABNT NBR 14323 (1999).....	67
Figura 2.40 - Força normal resistente <i>versus</i> comprimento do pilar misto.....	73
Figura 3.1 – Troca em um ponto.....	84
Figura 3.2 – Troca em mais de um ponto.....	84

Figura 3.3 – Mutação de um ponto.	85
Figura 3.4 – Variáveis de projeto para a VMAC e a VMCC.....	88
Figura 3.5 – Espaços livres e_h e e_v	88
Figura 3.6 – Variáveis de projeto para o PM e o PNM.....	92
Figura 3.7 – Fluxograma do AG utilizado (SILVOSO, 2003).....	93
Figura 4.1 – Planta baixa do pavimento tipo.	95
Figura 4.2 – Esquema estrutural do pavimento tipo.	95
Figura 4.3 – Elevação para os eixos 1,3,5,7 e 9.....	96
Figura 4.4 – Resultados das seções analisadas para diferentes TRRFs.	100
Figura 4.5 – Custo <i>versus</i> geração, considerando-se um número máximo de 5 gerações.	104
Figura 4.6 - Custo <i>versus</i> geração, considerando-se um número máximo de 10 gerações.....	104
Figura 4.7 - Custo <i>versus</i> geração, considerando-se um número máximo de 25 gerações.....	105
Figura 4.8 - Custo <i>versus</i> geração, considerando-se um número máximo de 50 gerações.....	105
Figura 4.9 - Custo <i>versus</i> geração, considerando-se um número máximo de 100 gerações.....	106
Figura 4.10 – Definição dos grupos para a otimização.....	107

Figura 4.11 – Comparação dos resultados para os pilares do grupo 1.....	110
Figura 4.12 – Comparação dos resultados para os pilares do grupo 2.....	111
Figura 4.13 - Comparação dos resultados para os pilares do grupo 3.....	113
Figura 4.14 - Comparação dos resultados para os pilares do grupo 4.....	114

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Fatores de redução da resistência ao escoamento ($k_{y,\theta}$) e do módulo de elasticidade do aço ($k_{E,\theta}$) - ABNT NBR 14323 (1999).	19
Tabela 2.2 – Fatores de redução da resistência característica à compressão e do módulo de elasticidade do concreto - ABNT NBR 14323 (1999).	20
Tabela 2.3 – Variação de temperatura na altura das lajes de concreto de densidade normal.	25
Tabela 2.4 – Resultados para o exemplo apresentado.....	29
Tabela 2.5 – Resultados para a seção analisada com material de proteção térmica.	34
Tabela 2.6 - Valores para o cálculo de $h_{c,fi}$ e b_{fi} - EUROCÓDIGO 4 p1.2 (2005).....	41
Tabela 2.7 - Roteiro para o cálculo da altura h_t , sendo $h_{lmax} = d - 2t_f$ - EUROCÓDIGO 4 p1.2 (2005).	42
Tabela 2.8 - Cálculo do fator de redução da resistência das armaduras EUROCÓDIGO 4 p1.2 (2005).	42
Tabela 2.9 - Cálculo do fator de redução k_a - EC 4 p1.2 (2004).	43
Tabela 2.10 – Resultados para o a seção analisada com concreto entre as mesas.	47
Tabela 2.11 – Curvas de dimensionamento à compressão para a instabilidade por flexão.....	51
Tabela 2.12 – Comparação entre os tipos mais usuais de pilares mistos.....	57
Tabela 2.13 – Temperatura inicial e coeficiente empírico k_t para a determinação da temperatura média nas mesas do perfil.	67

Tabela 2.14 – Valor de H_t para a determinação de $h_{w,fi}$. - ABNT NBR 14323 (1999)...	68
Tabela 2.15 – Espessura da camada externa a ser desprezada no cálculo.	69
Tabela 2.16 – Temperatura media para o concreto.	69
Tabela 2.17 – Fator de redução $k_{ys,\theta}$ para a resistência ao escoamento do aço das armaduras - ABNT NBR 14323 (1999).....	70
Tabela 2.18 - Fator de redução $k_{Es,\theta}$ para o módulo de elasticidade do aço das armaduras - ABNT NBR 14323 (1999).....	71
Tabela 2.19 – Coeficiente de redução $\varphi_{i,\theta}$	71
Tabela 3.1 – Algoritmo genético conceitual.	81
Tabela 3.2 – Formulação do problema de otimização da viga mista.	87
Tabela 3.3 – Formulação do problema de otimização das colunas.	91
Tabela 4.1 – Insumos utilizados na aplicação.	98
Tabela 4.2 – Valores possíveis para as variáveis de projeto.	98
Tabela 4.3 – Resumo da envoltória de solicitações de flexão.....	99
Tabela 4.4 – Resultados para a viga secundária (seção parcialmente concretada – VMCC).....	99
Tabela 4.5 - Resultados para a viga secundária (seção com/sem material de proteção – VMAC).	99
Tabela 4.6 – Resultados para a viga principal (seção parcialmente concretada – VMCC).....	100

Tabela 4.7 - Resultados para a viga principal (seção com/sem material de proteção – VMAC).	100
Tabela 4.8 – Lista com os 25 melhores resultados encontrados para a viga principal, para a seção VMCC e com TRRF = 60 minutos.....	102
Tabela 4.9 - Lista com os 25 melhores resultados encontrados para a viga principal, para a seção VMAC e com TRRF = 60 minutos.	103
Tabela 4.10 – Esforços normais solicitantes para os elementos comprimidos.	108
Tabela 4.11 – Resultados para o grupo 1 – PNM – Eixos A e D.....	109
Tabela 4.12 - Resultados para o grupo 1 – PM – Eixos A e D.	109
Tabela 4.13 – Resultados para o grupo 1 – PNM – Eixos B e C.	109
Tabela 4.14 - Resultados para o grupo 1 – PM – Eixos B e C.....	109
Tabela 4.15 – Resultados para o grupo 2 – PNM – Eixos A e D.....	110
Tabela 4.16 - Resultados para o grupo 2 – PM – Eixos A e D.	110
Tabela 4.17 - Resultados para o grupo 2 – PNM – Eixos B e C.....	111
Tabela 4.18 - Resultados para o grupo 2 – PM – Eixos B e C.....	111
Tabela 4.19 – Resultados para o grupo 3 – PNM – Eixos A e D.....	112
Tabela 4.20 - Resultados para o grupo 3 – PM – Eixos A e D.	112
Tabela 4.21 - Resultados para o grupo 3 – PNM – Eixos B e C.....	112
Tabela 4.22 - Resultados para o grupo 3 – PM – Eixos B e C.....	112

Tabela 4.23 - Resultados para o grupo 4 – PNM – Eixos A e D.	113
Tabela 4.24 - Resultados para o grupo 4 – PM – Eixos A e D.	113
Tabela 4.25 - Resultados para o grupo 4 – PNM – Eixos B e C.	114
Tabela 4.26 - Resultados para o grupo 4 – PM – Eixos B e C.	114
Tabela 4.27 - Resultados para as diagonais – dimensionadas como PNM.	114

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS

a	Espessura da região comprimida na laje de concreto
b_c	Largura do concreto na seção mista
b_{ef}	Largura efetiva para as vigas mistas
b_f	Largura da mesa do perfil
b_{fi}	Largura da mesa superior do perfil desconsiderada na viga mista com concreto em situação de incêndio
c_a	Calor específico do aço
d	Altura total do perfil, distância
e_x	Distância do eixo da armadura ao eixo x do perfil, nas colunas mistas
e_y	Distância do eixo da armadura ao eixo y do perfil, nas colunas mistas
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
f_y	Resistência ao escoamento do aço em temperatura ambiente
f_{ys}	Resistência ao escoamento da armadura em temperatura ambiente
$f_{y\theta}$	Resistência ao escoamento do aço a altas temperaturas
h	Altura da alma do perfil
h_c	Altura do concreto na seção mista
h_{cfi}	Altura desconsiderada da laje na viga mista com concreto em situação de incêndio
h_h	Altura superior da alma do perfil na viga mista com concreto em situação de incêndio
h_l	Altura inferior da alma do perfil na viga mista com concreto em situação de incêndio
h_n	Posição da linha neutra na coluna mista

$h_{net,d}$	Fluxo de calor por unidade de área
$h_{net,r}$	Parcela devida à radiação para o fluxo de calor
$h_{net,c}$	Parcela devida à convecção para o fluxo de calor
$k_{E,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade do aço a altas temperaturas
$k_{y,\theta}$	Fator de redução da resistência do escoamento do aço a altas temperaturas
k_r	Fator de redução da resistência das armaduras a altas temperaturas
l	Vão da viga considerado entre as linhas de centro dos apoios
t	Tempo
t_c	Espessura da laje de concreto
t_f	Espessura do flange do perfil
t_w	Espessura da alma do perfil
u	Posição equivalente da armadura
u_i	Distância entre a face superior da mesa do perfil e o eixo da armadura
u_{si}	Distância entre a face do concreto e o eixo da armadura

LETRAS ROMANAS MAIUSCULAS

A	Área do perfil de aço
A_c	Área de concreto
A_s	Área da armadura
C_{cd}	Força resistente de cálculo da espessura comprimida da laje de concreto
C_w	Constante de empenamento da seção transversal
E	Módulo de elasticidade do aço em temperatura ambiente
E_c	Módulo de elasticidade tangente do concreto em temperatura ambiente
E_{cs}	Módulo de elasticidade secante do concreto em temperatura ambiente
E_c	Módulo de elasticidade reduzido do concreto
E_s	Módulo de elasticidade do aço da armadura

E_{θ}	Módulo de elasticidade do aço a altas temperaturas
G	Módulo de elasticidade transversal do aço
I_a	Momento de inércia do perfil de aço
I_s	Momento de inércia da armadura
I_c	Momento de inércia da seção de concreto
Ins_a	Valor do insumo para o aço
Ins_c	Valor do insumo para o concreto
Ins_p	Valor do insumo para o material de proteção
Ins_s	Valor do insumo para o aço das armaduras
M_{Rd}	Momento resistente de cálculo
M_{Rdfi}	Momento resistente de cálculo em situação de incêndio
M_{Sd}	Momento solicitante de cálculo
M_{Sdfi}	Momento solicitante de cálculo em situação de incêndio
N_p	Tamanho da população inicial
N_{Rd}	Força axial resistente de cálculo
N_{Rdpl}	Força normal de plastificação da seção
N_{Rdfi}	Força axial resistente de cálculo em situação de incêndio
N_{Sd}	Força axial de compressão solicitante de cálculo
$N_{Sd,G}$	Força axial de compressão solicitante de cálculo para as ações permanentes e quase permanentes
N_t	Número de indivíduos participantes do torneio
P_c	Probabilidade de cruzamento
P_m	Probabilidade de mutação
Q	Fator de redução total associado à flambagem local
T_{ad}	Força resistente de cálculo na região tracionada do perfil de aço

T_{sd}	Força resistente de cálculo das armaduras
T_{sdfi}	Força resistente de cálculo das armaduras em situação de incêndio
Z	Módulo de resistência plástico
Z_a	Módulo de resistência plástico para o perfil de aço
Z_c	Módulo de resistência plástico para o concreto
Z_s	Módulo de resistência plástico para o aço da armadura

LETRAS GREGAS MINÚSCULAS

α	Coefficiente relacionado à curva de dimensionamento à compressão
α_θ	Coefficiente relacionado ao dimensionamento em situação de incêndio
α_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção
β	Fator de redução
β_θ	Fator de redução em situação de incêndio
β_{vm}	Coefficiente que leva em conta a capacidade de rotação necessária para a ligação
δ	Fator de contribuição do aço
ε	Deformação
ε_f	Emissividade do compartimento
ε_m	Emissividade do membro
φ_c	Coefficiente de fluência do concreto
γ_{al}	Coefficiente de ponderação da resistência do aço
γ_c	Coefficiente de ponderação da resistência do concreto
γ_s	Coefficiente de ponderação da resistência da armadura
γ_{mfia}	Coefficiente de ponderação da resistência do aço a altas temperaturas
γ_{mfis}	Coefficiente de ponderação da resistência do aço das armaduras a altas temperaturas
γ_{mfic}	Coefficiente de ponderação da resistência do concreto a altas temperaturas

λ_0	Índice de esbeltez reduzido
$\lambda_{0\theta}$	Índice de esbeltez reduzido em situação de incêndio
λ_{rel}	Índice de esbeltez relativo
μ	Excentricidade da carga na coluna mista
θ	Temperatura
θ_c	Temperatura na laje de concreto
θ_g	Temperatura do gás
θ_m	Temperatura no membro
θ_r	Temperatura no ambiente
ρ_a	Massa específica do aço
ρ_c	Massa específica do concreto
ρ_p	Massa específica do material de proteção
ρ_p	Massa específica do aço da armadura
σ_b	Tensão normal máxima no flange comprimido para vigas T
σ_f	Tensão normal no flange superior para vigas T
χ	Fator de redução associado à resistência à compressão
χ_{fi}	Fator de redução associado à resistência à compressão a altas temperaturas

LETRAS GREGAS MAIÚSCULAS

Δt	Incremento de tempo
Φ	Fator de configuração

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O uso de ferramentas para a otimização na área de estruturas está, geralmente, relacionado a encontrar soluções que sejam as mais econômicas dentro de um espaço de busca possível. Tais ferramentas tornam-se imprescindíveis à medida que os recursos naturais se tornam cada vez mais escassos. Além disso, com as facilidades computacionais existentes atualmente, o mercado da construção civil vem se tornando mais exigente, e os engenheiros estruturais são cobrados a apresentar soluções que apresentem o menor custo possível.

No Brasil, muitas vezes a escolha da solução estrutural com elementos metálicos é posta em segundo plano, quando comparada com estruturas convencionais de concreto armado. Um dos fatores é a necessidade de proteção contra incêndio que, seguindo uma tendência mundial, tem sido normatizada por órgãos como a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que emitiu as normas ABNT NBR 14432 (2001), ABNT NBR 14323 (1999) e ABNT NBR 15200 (2004), além de outras instituições, como o Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, que apresenta um conjunto de Instruções Técnicas (CBESP, 2005) para o projeto arquitetônico, estrutural e de instalações prediais. Devido a essas exigências, torna-se atrativo o uso de ferramentas de otimização para o projeto de estruturas metálicas. Tais ferramentas devem encontrar

soluções que, além de obedecerem às prescrições de normas técnicas, conduzam a soluções de custo mínimo e sejam competitivas com outras ferramentas de análise de sistemas estruturais.

O uso do concreto entre as mesas do perfil metálico foi originalmente desenvolvido como forma de proteger o perfil metálico das altas temperaturas provenientes do incêndio. Adicionalmente, observou-se neste tipo de construção uma interação entre os dois materiais (aço e concreto) que confere à seção elevada rigidez e resistência. Essa tipologia foi bastante difundida como forma de proteção contra incêndio até o fim dos anos 1970. Entretanto, a introdução no mercado de sistemas de proteção industrializados, como a argamassa projetada e as tintas intumescentes, gerou uma redução drástica no seu uso (PANNONI, 2004). Outro fato que gera a recusa a esse tipo de construção é a alegação de que tais sistemas aumentam consideravelmente o custo e o peso total da edificação. Com base nessas premissas, procura-se no presente trabalho avaliar o dimensionamento de elementos mistos com concreto entre as mesas, por meio de técnicas de otimização, uma vez que, tais configurações podem se mostrar vantajosas do ponto de vista econômico, para certas condições de Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo (TRRF).

As normatizações vigentes apresentam para as estruturas metálicas, tanto em temperatura ambiente quanto em situação de incêndio, três metodologias para dimensionamento de estruturas em situação de incêndio:

- Métodos tabulares: são, em geral, baseados em resultados de ensaios. O dimensionamento por tais métodos leva, normalmente, a proteção de maior custo. No entanto, são os métodos mais amplamente utilizados para a verificação da resistência estrutural nos projetos de edificações;

- Métodos simplificados: são métodos analíticos que se baseiam na verificação da estrutura mediante a análise individual de cada elemento componente da mesma. São adotadas hipóteses simplificadoras relativas ao aquecimento dos elementos estruturais e dos mecanismos associados ao colapso.
- Os métodos avançados (refinados): permitem resultados mais realistas e, conseqüentemente, mais econômicos. No entanto, exigem uma maior sofisticação da modelagem computacional e demandam considerável tempo para a geração dos modelos e o processamento dos resultados.

Este trabalho adotará métodos de dimensionamento simplificados propostos nas normatizações vigentes. As técnicas de otimização acopladas ao modelo permitirão que as soluções encontradas sejam mais competitivas, em termos de custos, se comparadas com as soluções provenientes dos métodos avançados e, além disso, de mais fácil aplicação.

As técnicas de otimização existentes atualmente nem sempre trabalham com valores discretos e inteiros, o que acaba levando a resultados incompatíveis com a realidade. No caso estudado, os perfis e as armaduras devem atender à disponibilidade comercial, e as dimensões previstas no projeto da seção, devem estar de acordo com valores práticos para a fabricação. Para contornar tais problemas, a técnica dos algoritmos genéticos (HOLLAND, 1975) se mostra um excelente caminho, pois trabalha com uma codificação, geralmente binária, para as variáveis de projeto.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Vários trabalhos presentes na bibliografia nacional e internacional abordam o tema de estruturas metálicas e mistas sob situação de incêndio. Além de trabalhos experimentais, raros no Brasil, destacam-se aplicações com o emprego de métodos

avançados, como MOUÇO (2008) que apresenta um modelo inelástico para análise de estruturas mistas de aço e concreto em situação de incêndio; REGOBELO (2007) que apresenta em seu trabalho análises com diferentes seções metálicas e mistas em situação de incêndio e compara os resultados com as prescrições dos métodos simplificados propostos pelas normatizações vigentes; LANDESMANN (2003) que apresentou um programa para análise de pórticos planos de aço em situação de incêndio baseado nos conceitos de análise avançada propostos por CHEN (1991) e nas prescrições do EUROCÓDIGO 3 p1.2 (2003) e do AISC/LRFD (1999) e ABREU e FAKURY (1998) que apresentam um programa baseado no método dos elementos finitos para a análise térmica de perfis de aço.

No campo das análises experimentais de seções com concreto entre as mesas, MERGULHÃO (1998) apresentou resultados para deslocamentos, deformações e tensões e mostrou os passos mais críticos do experimento.

No âmbito dos métodos simplificados, alguns trabalhos desenvolvidos recentemente no Brasil são citados a seguir: FERREIRA (2007) apresenta formulações analíticas para determinação da distribuição da temperatura em perfis metálicos parcialmente protegidos em situação de incêndio, GUIMARÃES (2007) elabora um estudo sobre o dimensionamento do revestimento contra o fogo em estruturas de aço, CAMPOS (2006) desenvolve um trabalho sobre os critérios de dimensionamento de pilares mistos de aço e concreto e compara as propostas de diferentes normas internacionais como o EUROCÓDIGO 4 p1.1 (2005) e o AISC/LRFD (2005).

Relacionado ao custo de estruturas metálicas e mistas, os trabalhos publicados focam mais na comparação de métodos e soluções construtivas. KRAVANJA e ILIH (2002) compararam o custo de vigas mistas com perfis soldados à treliças mistas

compostas por seções metálicas tubulares. Neste trabalho foram analisados diversos vãos e carregamentos, onde o dimensionamento foi desenvolvido a partir de prescrições do EUROCÓDIGO 4 (1999), tanto para o estado limite último quanto para o estado limite de serviço. Em KLANSEK e KRAVANJA (2005) diferentes sistemas de pisos mistos como vigas I mistas, treliças mistas com perfis U e treliças mistas com perfis formados a frio têm seus custos comparados. A estimativa para o custo leva em conta, além dos materiais básicos, o gasto com conectores, eletrodos para solda, anti-corrosivos, proteção ao fogo e formas. Neste mesmo trabalho algumas funções são apresentadas para a estimativa de custo desses materiais.

Seguindo o conceito de alternativas econômicas para as vigas mistas, inclui-se o trabalho de WANG (1997), que fez uma investigação sobre vigas mistas com proteção contra fogo apenas no flange inferior e em parte da alma. Tais tipologias são comparadas com vigas totalmente protegidas, nos quais se observa uma redução de até 50% no custo com material de proteção contra incêndio para o mesmo momento plástico resistente. Nesta linha de pesquisa, relacionada a alternativas para redução de custo com material de proteção térmica, destaca-se o trabalho de FAKURY e SPÍNDOLA (2002), que investigaram a resistência de pisos mistos com proteção apenas nas vigas principais, cuja formulação foi baseada em BAILEY e MOORE (2000).

A bibliografia sobre utilização de algoritmos genéticos em problemas relacionados ao projeto de estruturas é bastante extensa, podendo-se destacar: Otimização de estruturas com multi-objetivos via algoritmos genéticos de Pareto (CASTRO, 2001), Projeto ótimo de estruturas planas e espaciais com algoritmos genéticos (ERBATUR,

2000) e Projeto ótimo pórticos de aço não lineares com ligações semi-rígidas utilizando algoritmos genéticos (KAMESHKI, 2001).

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal a aplicação de uma metodologia numérico-computacional para a obtenção do menor custo de elementos metálicos e mistos (aço-concreto), que atenda às condições de carregamento do Estado Limite Último associadas à temperatura ambiente e incêndio, por meio dos métodos simplificados presentes nas normatizações vigentes.

O dimensionamento deverá levar a soluções que contemplem perfis metálicos e armaduras disponíveis comercialmente, além do atendimento a prescrições, como: espessuras usuais do material de proteção térmica e o posicionamento dos estribos, que deverão ter dimensões práticas para a execução. A solução obtida deverá ser a mais econômica dentro do espaço de busca criado.

Todas as rotinas para o dimensionamento e pós-processamento dos resultados foram programadas em linguagem FORTRAN. As rotinas para a otimização foram elaboradas a partir de um modelo básico de AG, previamente desenvolvido no Programa de Engenharia Civil da COPPE (CASTRO, 2001; SILVOSO,2003).

O usuário tem a opção de analisar uma seção (capacidade resistente) a partir da definição de suas características geométricas, dos materiais utilizados e do TRRF. No caso das vigas, será gerado um arquivo de saída com o momento fletor resistente, a posição da linha neutra e a evolução da temperatura nas partes constituintes do perfil metálico (apenas no caso da viga mista de alma cheia). No caso dos pilares, serão gerados arquivos de saída com os resultados da relação esforço normal resistente por esforço normal solicitante, no caso de compressão centrada, ou com os resultados das

equações de interação no caso de flexão composta. Ainda nos pilares, o usuário pode verificar a influência da esbeltez da seção na resistência à compressão centrada para cada TRRF, por meio dos gráficos de esforço normal resistente *versus* comprimento de flambagem.

A outra opção do usuário, que é o objetivo principal deste trabalho, consiste em otimizar a tipologia adotada (viga mista com concreto, viga mista de alma cheia, pilar misto e pilar não misto) a partir de valores de esforços solicitantes, características dos materiais, insumos e bibliotecas com os perfis, armaduras, espessuras do material de proteção térmica, e dimensões para o posicionamento dos estribos, todos pré-cadastradas pelo usuário. Serão gerados dois arquivos de saída, um com uma lista em que são ranqueados os melhores resultados obtidos no processo, e outro com a evolução dos melhores resultados ao longo da otimização.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 2 é apresentada uma introdução sobre o uso das vigas mistas de alma cheia, das vigas mistas com concreto, dos pilares não mistos e dos pilares mistos, seguidos com a respectiva metodologia para dimensionamento dos mesmos em temperatura ambiente e em situação de incêndio. A fim de ilustrar o funcionamento de tais seções, serão apresentados exemplos numéricos, ressaltando as características positivas e as limitações do método.

O item 2.1.2.1 apresentará a forma simplificada como são tratadas as características mecânicas e térmicas dos materiais de interesse às altas temperaturas.

No capítulo 3 serão apresentados os conceitos básicos de otimização e nos itens seguintes será mostrada a técnica de otimização utilizada e como a mesma é ligada à metodologia de dimensionamento da seção para otimização dos custos.

O capítulo 4 mostra uma aplicação do método proposto, em que se procura otimizar as vigas, pilares e diagonais de contraventamento, adotando os conceitos de elementos mistos (aço-concreto) e elementos com/sem material de proteção térmica. Neste capítulo, as diferentes tipologias adotadas serão comparadas e suas principais vantagens e limitações serão comentadas.

O capítulo 5 resume as principais conclusões obtidas neste trabalho e discute seus pontos positivos e negativos. Nesse mesmo capítulo serão sugeridos diversos tópicos para prosseguimento dessa pesquisa.

2

MÉTODO SIMPLIFICADO PARA RESISTÊNCIA DOS ELEMENTOS

2.1 VIGAS MISTAS DE ALMA CHEIA

As vigas mistas de alma cheia são formadas por uma laje de concreto armado conectada à mesa superior da viga metálica por conectores de cisalhamento, fazendo com que os dois componentes atuem juntos como uma única seção e aproveitando, com máxima eficiência, as características mecânicas dos dois materiais. Quando o componente de aço é um perfil I, caixão ou tubular retangular, a viga mista recebe a denominação de Viga Mista de Aço e Concreto de Alma Cheia (VMAC). Uma seção transversal de uma viga mista típica pode ser observada na Figura 2.1.

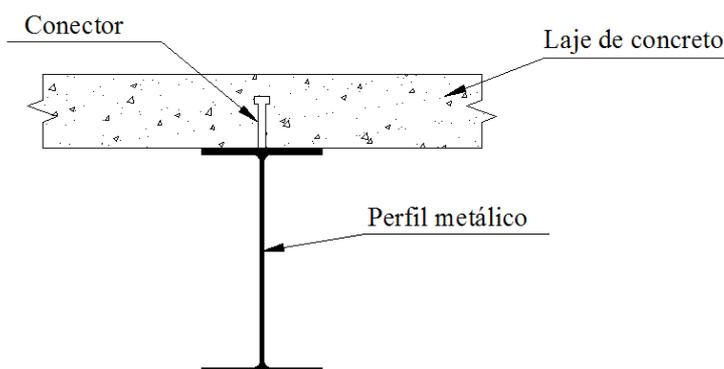


Figura 2.1 – Seção transversal de uma viga mista típica.

A ligação entre a laje e o perfil de aço pode ser de duas formas:

- Interação completa: nesse tipo de ligação, os conectores de cisalhamento são dimensionados de forma que não ocorra deslizamento relativo entre a laje e o perfil, e assim os dois componentes (laje de concreto e perfil) funcionam como uma só seção, com a flexão ocorrendo em torno do eixo que passa pela linha neutra da seção mista, conforme pode ser observado na Figura 2.2.
- Interação parcial: nesta configuração assume-se que ocorrerá um deslizamento parcial entre a laje e o perfil, acarretando o aparecimento de uma linha neutra para o perfil e outra para laje, conforme mostra a Figura 2.3.

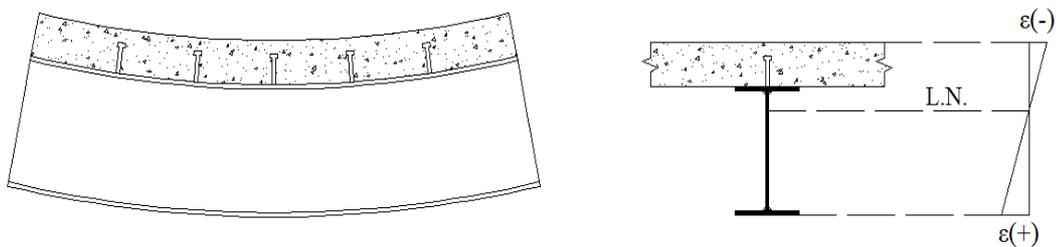


Figura 2.2 – Esquema de funcionamento de viga mista com interação completa.

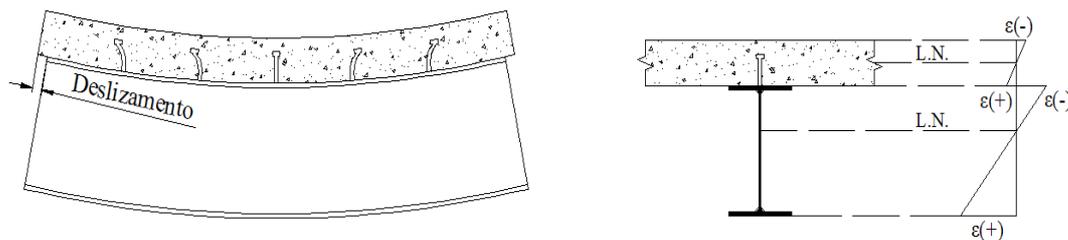


Figura 2.3– Esquema de funcionamento de viga mista com interação parcial.

Os métodos construtivos para as vigas mistas podem ser classificados em:

- Construção escorada: as vigas são projetadas para resistir aos esforços de projeto após a retirada do escoramento, quando o concreto da laje já atingiu sua

resistência esperada e a seção pode funcionar como uma só. Com esse tipo de projeto, reduz-se o custo do perfil metálico, uma vez que o mesmo será projetado para atuar unicamente como viga mista, com maior capacidade resistente; no entanto, há o custo adicional do escoramento.

- Construção não-escorada: nesse caso, as vigas metálicas não terão escoramento e devem ser dimensionadas para a situação anterior à cura do concreto da laje, funcionando assim como vigas metálicas simples. Posteriormente à cura do concreto, a seção passa a funcionar como viga mista, porém com uma deformação inicial que deve ser considerada no projeto.

A largura colaborante da laje, considerada nos cálculos dos momentos resistentes da viga mista, é denominada de largura efetiva (b_{ef}). Em uma viga T, as tensões de compressão na mesa superior vão reduzindo a partir da linha de centro da alma, em direção aos lados dos flanges (Figura 2.4). Esse fato se deve às deformações causadas pelo cisalhamento, efeito conhecido como *shear lag*. Conceitualmente, o valor da largura efetiva será aquele cujo produto pela tensão máxima no flange superior (σ_b) seja equivalente à área do diagrama real de tensões normais de compressão na mesa superior, como se pode observar na Figura 2.4.

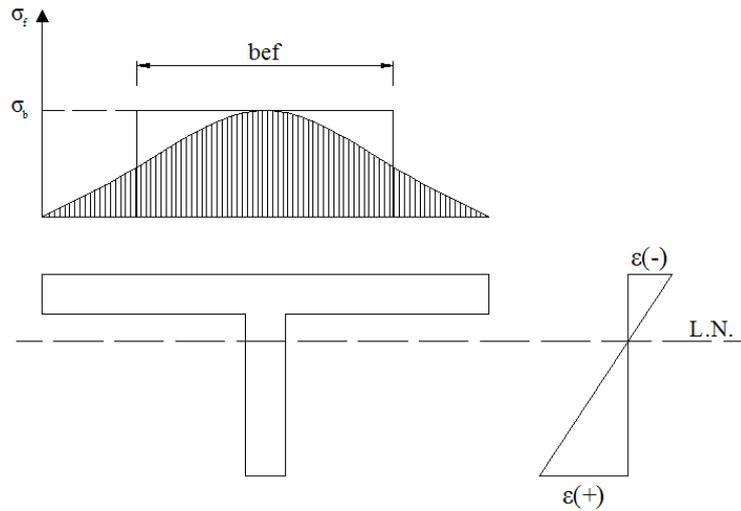


Figura 2.4 – Tensões normais na mesa comprimida de uma viga T.

Alguns fatores que influenciam a largura efetiva são: o tipo de carregamento, uma vez que nos pontos de cargas transversais concentradas as larguras efetivas são reduzidas, e a geometria do sistema. De forma a facilitar as análises e contornar tais fatores, as normas propõem alguns valores conservadores a serem adotados para a determinação da largura efetiva. Pela ABNT NBR 8800 (2007), para as vigas mistas biapoiadas, pode-se calcular a largura efetiva da mesa de concreto, de cada lado da linha de centro da viga, como:

- 1/8 do vão da viga mista, considerado entre as linhas de centro dos apoios;
- Metade da distância entre a linha de centro da viga analisada e a linha de centro da viga adjacente;
- Distância de centro da viga à borda de uma laje em balanço.

2.1.1 DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO: TEMPERATURA AMBIENTE

As seções analisadas neste trabalho serão consideradas com interação completa e com construção escorada, seguindo as recomendações previstas pela ABNT NBR 8800

(2007), e pelo EUROCÓDIGO 4 p1.1 (2005), que apresentam um método simplificado (analítico) para o cálculo do momento resistente dessas vigas mistas. Tal procedimento aplica-se a perfis metálicos que apresentem a relação entre a altura e a espessura da alma (h/t_w) inferior a $5,7\sqrt{E/f_y}$, sendo E o módulo de elasticidade do aço e f_y a resistência ao escoamento. O dimensionamento pode ser feito em regime plástico quando h/t_w for menor ou igual a $3,76\sqrt{E/f_y}$. Quando h/t_w for maior que $3,76\sqrt{E/f_y}$, o dimensionamento será em regime elástico.

Para a interação completa entre a laje e o perfil metálico na região de momento positivo, os conectores de cisalhamento deverão ter resistência de cálculo maior ou igual ao menor valor da resistência de cálculo do componente de aço à tração ou da laje de concreto à compressão. Caso isso não ocorra, a interação será considerada parcial.

Se a construção for escorada, o cimbramento previsto deve garantir que o componente de aço permaneça praticamente sem solicitação até a sua retirada, que só pode ser realizada após o concreto atingir 75% da resistência característica à compressão especificada.

As lajes de concreto devem ser armadas adequadamente para resistir a todas as solicitações de cálculo, considerando-a com o comportamento de placa, de acordo com as normas aplicáveis, e como parte integrante da viga mista. A fissuração da laje, causada por cisalhamento na região adjacente à viga de aço (Figura 2.5), paralelamente a essa, deve ser controlada por armadura adicional, transversal a viga, a não ser que se demonstre que as armaduras para outros fins são suficientes para essa finalidade.

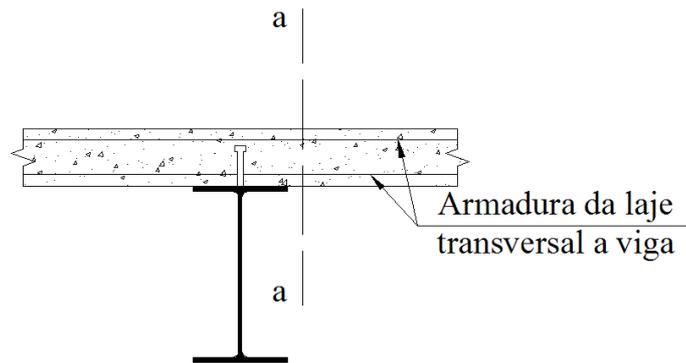


Figura 2.5 – Superfície típica de falha por cisalhamento.

O cálculo do momento resistente com interação completa em regime plástico deve considerar três possíveis situações para a posição da linha neutra plástica: a) na laje de concreto, b₁) na mesa superior do perfil e b₂) na alma da viga de aço, as quais serão mostradas a seguir. O efeito Rüsç é considerado por meio do coeficiente 0,85 multiplicado pela resistência característica do concreto. Não se considera no cálculo a resistência do concreto tracionado.

a) Linha neutra plástica na laje de concreto com interação completa:

$$M_{Rd} = \beta_{vm} T_{ad} \left(d_1 + h_F + t_c - \frac{a}{2} \right) \quad (2.1)$$

Sendo

$$C_{cd} = \frac{0,85 f_{ck} b_{ef} a}{\gamma_c} ; T_{ad} = \frac{(A f_y) a}{\gamma_{a1}} ; a = \frac{T_{ad}}{0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} b_{ef}} \leq t_c \quad (2.2)$$

em que: β_{vm} vale 1,00 para vigas biapoiadas ou contínuas; C_{cd} é a força resistente de cálculo da espessura comprimida da laje de concreto; T_{ad} é a força resistente de cálculo da região comprimida do perfil de aço; t_c é a espessura da laje de concreto; a é a espessura da região comprimida da laje de concreto; γ_c é o coeficiente de ponderação da resistência do concreto, tomado igual a 1,4; γ_{a1} é

o coeficiente de ponderação da resistência do aço, tomado igual a 1,1; f_{ck} é a resistência característica concreto à compressão; d_l é a distância do centro geométrico da seção da viga de aço até a face superior da mesma; $h_F = 0$ quando a face inferior da laje incide diretamente no perfil.

b) Linha neutra da seção plastificada na viga de aço:

$$M_{Rd} = \beta_{vm} \left[C_{ad}(d - y_t - y_c) + C_{cd} \left(\frac{t_c}{2} + h_f + d - y_t \right) \right] \quad (2.3)$$

Sendo

$$C_{cd} = \frac{0,85 f_{ck} b_{ef} t_c}{\gamma_c}; \quad C_{ad} = \frac{1}{2} \left[\frac{(A f_y)_a}{\gamma_{a1}} - C_{cd} \right]; \quad T_{ad} = C_{ad} + C_{cd} \quad (2.4)$$

Em que C_{ad} é a força resistente de cálculo da região comprimida do perfil de aço. A posição da linha neutra da seção plastificada, medida a partir do topo da viga de aço, pode ser determinada como a seguir está indicado:

b₁) Para $C_{ad} \leq \frac{(A f_y)_{tf}}{\gamma_{a1}}$ (linha neutra na mesa superior):

$$y_p = \frac{C_{ad}}{\frac{(A f_y)_{tf}}{\gamma_{a1}}} t_f \quad (2.5)$$

b₂) Para $C_{ad} \geq \frac{(A f_y)_{tf}}{\gamma_{a1}}$ (linha neutra na alma):

$$y_p = t_f + h \left[\frac{C_{ad} - \frac{(A f_y)_{tf}}{\gamma_{a1}}}{\frac{(A f_y)_w}{\gamma_{a1}}} \right] \quad (2.6)$$

em que: h_f , d , h , t_w são apresentados na Figura 2.6; y_c é a distância do centro geométrico da parte comprimida da seção da viga de aço até a face superior

dessa viga; y_t é a distância do centro geométrico da parte tracionada da seção da viga de aço até a face inferior dessa viga; y_p é a distância da linha neutra da seção plastificada até a face superior da viga de aço; t_f é a espessura da mesa superior da viga de aço; $(Af_y)_a$ é o produto da área da seção da viga de aço pela sua resistência ao escoamento; $(Af_y)_{tf}$ é o produto da área da mesa superior da viga de aço pela resistência ao escoamento dessa viga; $(Af_y)_w$ é o produto da área da alma da viga de aço pela sua resistência ao escoamento.

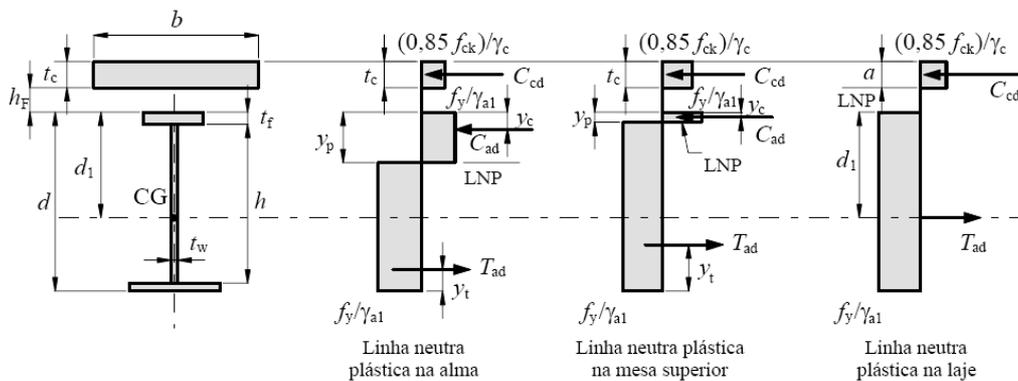


Figura 2.6 – Distribuição de tensões em vigas mistas de alma cheia sob momento fletor positivo – interação completa - ABNT NBR 8800 (2007).

2.1.2 DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO: SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

2.1.2.1 Propriedades térmicas e mecânicas do aço e do concreto a altas temperaturas

Este item apresentará algumas propriedades térmicas e mecânicas do aço e do concreto a altas temperaturas, as quais serão utilizadas nos próximos itens. Os procedimentos estão de acordo com a ABNT NBR 14323 (1999) que, por sua vez, adota os mesmos critérios do EUROCÓDIGO 4 p1.2 (2005).

A) Calor específico (c_a): o calor específico em joule por quilograma e por grau Celsius ($J/kg^\circ C$) do aço pode ser determinado por:

- para $20^\circ C \leq \theta_a < 600^\circ C$

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1}\theta_a - 1,69 \times 10^{-3}\theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6}\theta_a^3 \quad (2.7)$$

- para $600^\circ C \leq \theta_a < 735^\circ C$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad (2.8)$$

- para $735^\circ C \leq \theta_a < 900^\circ C$

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad (2.9)$$

- para $900^\circ C \leq \theta_a \leq 1200^\circ C$

$$c_a = 650 \quad (2.10)$$

Em que θ_a é a temperatura do aço, em grau Celsius.

De forma simplificada, o calor específico pode ser tomado independentemente da temperatura do aço, adotando-se o valor de $600 J/kg^\circ C$. A figura a seguir mostra a variação do calor específico com a temperatura, comparando-o com o valor simplificado.

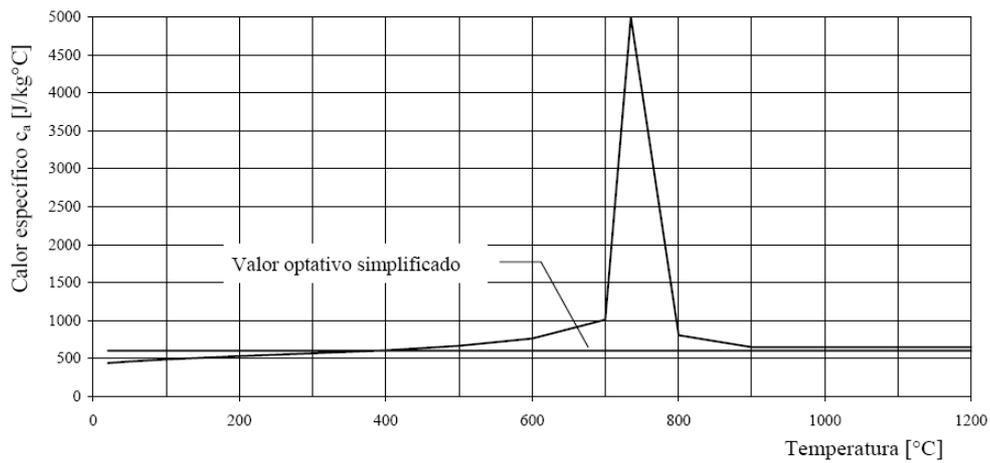


Figura 2.7 – Calor específico do aço em função da temperatura - ABNT NBR 14323 (1999).

B) Resistência ao escoamento ($f_{y,\theta}$) e módulo de elasticidade (E_θ): a resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade dos aços laminados a altas temperaturas podem ser calculados a partir dos fatores de redução, como mostram as equações 2.11 e 2.12.

$$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y} \quad (2.11)$$

$$k_{E,\theta} = \frac{E_\theta}{E} \quad (2.12)$$

Os fatores de redução são dados em função da temperatura e estão apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Fatores de redução da resistência ao escoamento ($k_{y,\theta}$) e do módulo de elasticidade do aço ($k_{E,\theta}$) - ABNT NBR 14323 (1999).

Temperatura do aço θ_a (°C)	Fator de redução para a resistência ao escoamento dos aços laminados ($k_{y,\theta}$)	Fator de redução para o módulo de elasticidade dos aços laminados ($k_{E,\theta}$)
20	1,000	1,0000
100	1,000	1,0000
200	1,000	0,9000
300	1,000	0,8000
400	1,000	0,7000
500	0,780	0,6000
600	0,470	0,3100
700	0,230	0,1300
800	0,110	0,0900
900	0,060	0,0675
1000	0,040	0,0450
1100	0,020	0,0225
1200	0,000	0,0000

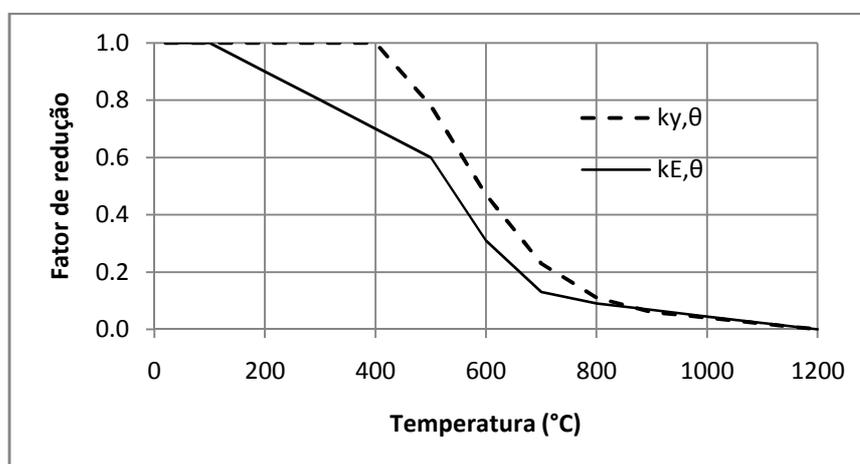


Figura 2.8 – Fatores de redução para a resistência ao escoamento e módulo de elasticidade do aço a altas temperaturas - ABNT NBR 14323 (1999).

C) Resistência característica à compressão ($f_{ck,\theta}$) e módulo de elasticidade ($E_{c\theta}$):

Para concretos com densidade normal, esses parâmetros são calculados a partir dos fatores de redução, da seguinte forma:

$$k_{c,\theta} = \frac{f_{ck,\theta}}{f_{ck}} \quad (2.13)$$

$$k_{E_{c,\theta}} = \frac{E_{c\theta}}{E_c} \quad (2.14)$$

Os fatores de redução, em função da temperatura, são dados na Tabela 2.2 e podem ser mais bem visualizados na Figura 2.9.

Tabela 2.2 – Fatores de redução da resistência característica à compressão e do módulo de elasticidade do concreto - ABNT NBR 14323 (1999).

Temperatura do concreto θ_c (°C)	Fator de redução para a resistência característica à compressão ($k_{c,\theta}$)	Fator de redução para o módulo de elasticidade do concreto ($k_{E_{c,\theta}}$)
20	1,000	1,000
100	1,000	0,940
200	0,950	0,820
300	0,850	0,700
400	0,750	0,580
500	0,600	0,460
600	0,450	0,340
700	0,300	0,220
800	0,150	0,100
900	0,080	0,000
1000	0,040	0,000
1100	0,010	0,000
1200	0,000	0,000

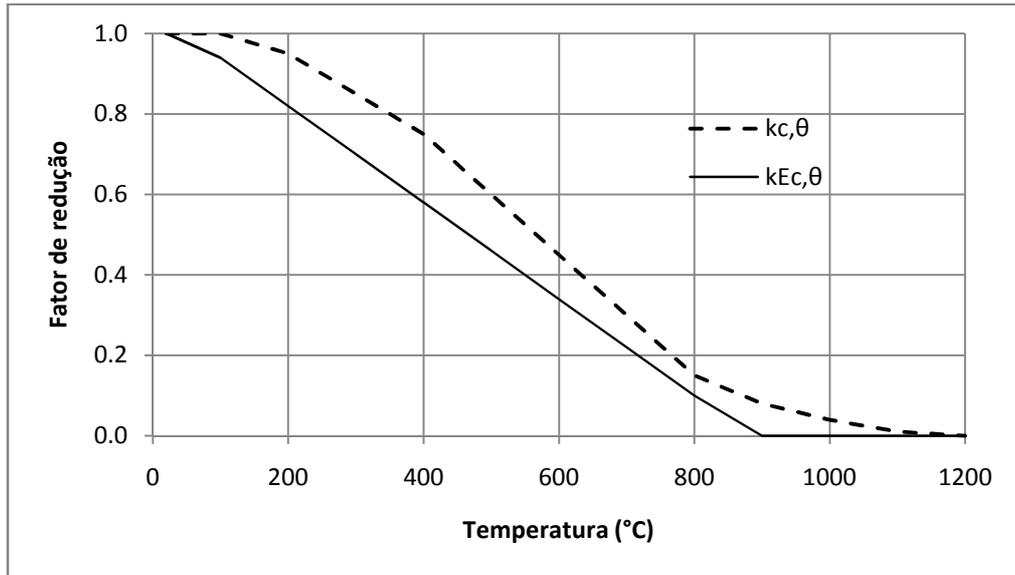


Figura 2.9 – Fatores de redução para a resistência característica à compressão e módulo de elasticidade do concreto a altas temperaturas - ABNT NBR 14323 (1999).

2.1.2.2 Vigas mistas sem material de proteção

Para análises em situação de incêndio, o EUROCÓDIGO 4 p1.2 (2005), assim como a ABNT NBR 14323 (1999), apresentam um método simplificado para o cálculo de vigas mistas em situação de incêndio. Esse método é válido desde que essas vigas possuam a relação h/t_w menor que $3,76\sqrt{E/f_y}$. A distribuição de temperatura no perfil deve ser tomada como não-uniforme, com a seção transversal dividida em três partes (mesa inferior, alma e mesa superior), como mostra a Figura 2.10, considerando-se que não haja troca de calor entre essas partes nem entre a mesa superior e a laje de concreto.

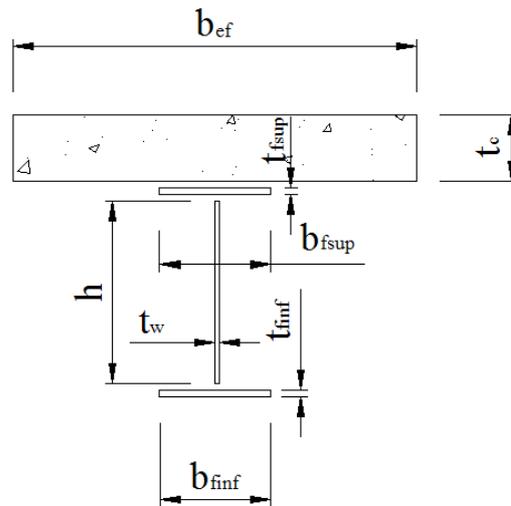


Figura 2.10 – Divisão do componente de aço (perfil I) para a distribuição de temperatura.

O acréscimo de temperatura $\Delta\theta_{a,t}$ aos membros da viga de aço no intervalo de tempo Δt (são recomendados valores menores que 5 segundos) é determinado como se mostrará a seguir.

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{1}{c_a \rho_a} \frac{A_m}{V} h_{net,d} \Delta t \quad (2.15)$$

em que: c_a é o calor específico do aço; ρ_a é a massa específica do aço, tomada como 7850 kg/m^3 ; $h_{net,d} = h_{net,r} + h_{net,c}$ é o fluxo de calor por unidade de área, dado por: uma parcela devido à radiação ($h_{net,r}$) e outra devido à convecção ($h_{net,c}$):

$$h_{net,r} = 5,67 \cdot 10^{-8} \Phi \varepsilon_{res} \left[(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right] \quad (2.16)$$

$$h_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \quad (2.17)$$

o qual: Φ é um fator de configuração, tomado como 1,0 na falta de dados; $\varepsilon_{res} = \varepsilon_f \varepsilon_m$ é a emissividade resultante, igual à emissividade do compartimento em incêndio *versus*

a emissividade da superfície do membro ($0,8 \times 0,625 = 0,5$ se não houver dados específicos) ; θ_r e θ_m correspondem à temperatura ambiente e à temperatura do membro, respectivamente; α_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção (tomado como $25 \text{ W/m}^2\text{°K}$ para a curva de incêndio padrão e $50 \text{ W/m}^2\text{°K}$ para a curva de incêndio de hidrocarbonetos); θ_g é a temperatura dos gases.

$\frac{A_m}{V}$ é o fator de massividade, definido como a área (por metro linear) exposta ao fogo

dividida pelo volume (por metro linear), para cada parte do perfil analisada. Vale:

- Para a mesa superior sobreposta por laje maciça: $\frac{A_m}{V} = \frac{b_f + 2t_f}{b_f t_f}$
- Para a mesa inferior: $\frac{A_m}{V} = \frac{2b_f + 2t_f}{b_f t_f}$
- Para a alma: $\frac{A_m}{V} = \frac{2h}{ht_w}$

Neste trabalho, utilizou-se a curva de incêndio padrão da ISO-834 (1999), utilizada para incêndios provenientes da queima de materiais celulósicos, incluída na ABNT NBR 14432 (2000), cuja evolução da temperatura no gás (θ_g) em °C, com o tempo t de incêndio em minutos, é dada a seguir:

$$\theta_g = 20 + 345 \log(8t + 1) \quad (2.18)$$

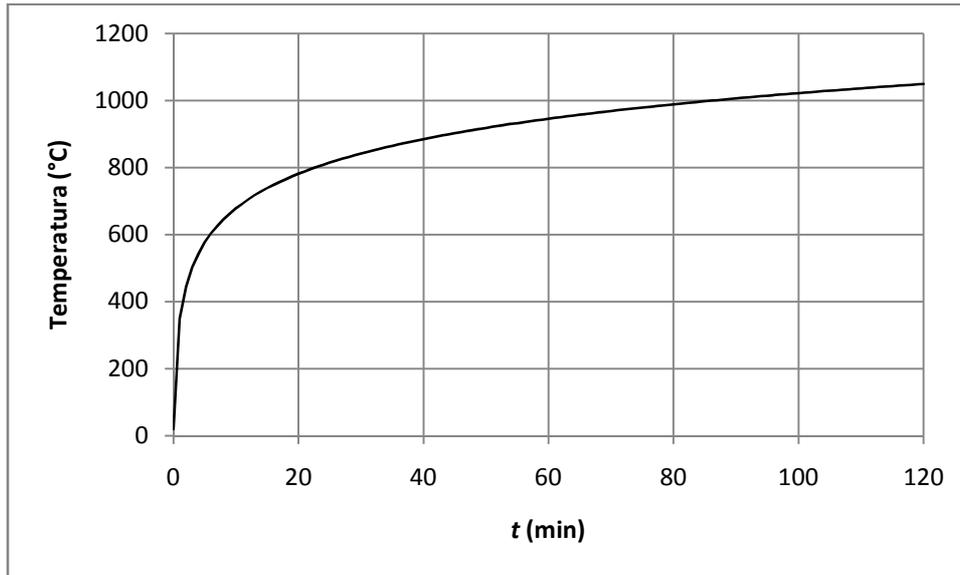


Figura 2.11 – Curva de incêndio padrão - ISO-834 (1999).

O EUROCÓDIGO 4 p1.2 (2005) utiliza na equação 2.15 um coeficiente para levar em conta o efeito de sombra (k_{shadow}). Esse coeficiente foi utilizado neste trabalho e é dado por:

$$k_{shadow} = 0,9 \frac{t_{f_{inf}} + t_{f_{sup}} + \left(\frac{1}{2}\right)b_{f_{inf}} + \sqrt{h^2 + \frac{1}{4}(b_{f_{inf}} - b_{f_{sup}})^2}}{h + b_{f_{inf}} + \frac{1}{2}b_{f_{inf}} + t_{f_{inf}} + t_{f_{sup}} - t_w} \quad (2.19)$$

em que: $t_{f_{inf}}$ e $t_{f_{sup}}$ e t_w são as espessuras da mesa inferior, da mesa superior e da alma do perfil, respectivamente; $b_{f_{inf}}$ e $b_{f_{sup}}$ são as larguras das mesas inferior e superior do perfil, respectivamente e h é a altura da alma do perfil.

Visando simplificar os cálculos, a norma ABNT NBR 14323 (1999) permite que a temperatura na alma seja considerada igual à temperatura na mesa inferior; no entanto, tal procedimento não foi adotado neste trabalho e todos os membros são analisados com as suas respectivas temperaturas.

A temperatura na laje de concreto é obtida dividindo-a em um máximo de 14 fatias e considerando a temperatura constante em toda a largura efetiva. A temperatura de

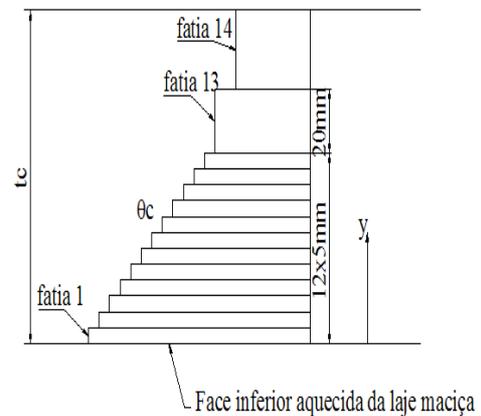
cada fatia é obtida de acordo com a Tabela 2.3. De forma simplificada, pode-se considerar a temperatura uniforme ao longo da altura da laje, da seguinte forma:

$$\theta_c = \frac{1}{h_{ef}} \sum_{i=1}^n \theta_{c,j} e_j \quad (2.20)$$

em que, h_{ef} é igual à espessura da laje de concreto para lajes maciças; $\theta_{c,j}$ e e_j são a temperatura e a espessura, para cada fatia, respectivamente.

Tabela 2.3 – Variação de temperatura na altura das lajes de concreto de densidade normal.

Fatia	y (mm)	Temperatura θ_c (°C) após um incêndio de duração, em minutos, de				
		30	60	90	120	180
1	≤ 5	535	705	754	-	-
2	5 a 10	470	642	738	754	-
3	10 a 15	415	581	681	754	-
4	15 a 20	350	525	627	697	-
5	20 a 25	300	469	571	642	738
6	25 a 30	250	421	519	591	689
7	30 a 35	210	374	473	542	635
8	35 a 40	180	327	428	493	590
9	40 a 45	160	289	387	454	549
10	45 a 50	140	250	345	415	508
11	50 a 55	125	200	294	369	469
12	55 a 60	110	175	271	342	430
13	60 a 80	80	140	220	270	330
14	> 80	60	100	160	210	260



A figura a seguir mostra um exemplo de variação da temperatura média ao longo do tempo para lajes de concreto com densidade normal e espessuras de 10 cm, 15 cm e 20 cm, seguindo o procedimento proposto pela ABNT NBR 14323 (1999).

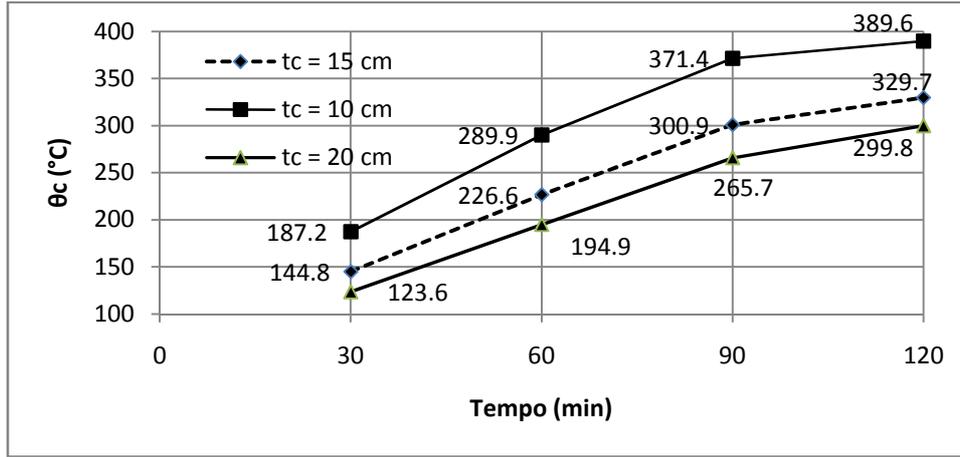


Figura 2.12 – Exemplo de variação da temperatura média em lajes de concreto ao longo do tempo de incêndio.

De posse da temperatura média na laje de concreto, calcula-se o fator de redução da resistência, conforme está mostrado em 2.1.2.1. Assim como no cálculo em temperatura ambiente, o concreto tracionado não é levado em consideração.

Obtidas as temperaturas em cada membro do perfil e da laje de concreto, o momento resistente positivo, com interação completa, pode ser calculado da seguinte forma:

- a) Linha neutra plástica na laje de concreto:

$$M_{Rdfi} = \beta_{vm} f_y [A_{finf} k_{y,\theta_{finf}} \left(\frac{t_{finf}}{2} + h + t_{fsup} + t_c - \frac{y_p}{2} \right) + A_w k_{y,\theta_w} \left(\frac{h}{2} + t_{fsup} + t_c - \frac{y_p}{2} \right) + A_{fsup} k_{y,\theta_{fsup}} \left(\frac{t_{fsup}}{2} + t_c - \frac{y_p}{2} \right)] \quad (2.21)$$

$$y_p = \frac{f_y (A_{finf} k_{y,\theta_{finf}} + A_w k_{y,\theta_w} + A_{fsup} k_{y,\theta_{fsup}})}{0.85 k_{c,\theta} f_{ck} b_{ef}} \leq t_c \quad (2.22)$$

b₁) Linha neutra plástica na mesa superior do perfil:

$$M_{Rdfi} = \beta_{vm} \{ 0,85 k_{c,\theta} f_{ck} b_{ef} t_c \left(y_p - \frac{t_c}{2} \right) + A_{finf} k_{y,\theta finf} f_y \left(\frac{t_{finf}}{2} + h + t_c + t_{fsup} - y_p \right) + A_w k_{y,\theta w} f_y \left[\frac{h}{2} + (t_c + t_{fsup} - y_p) \right] + (y_p - t_c) b_{fsup} k_{y,\theta fsup} f_y \left(\frac{y_p - t_c}{2} \right) + [t_{fsup} - (y_p - t_c)] b_{fsup} k_{y,\theta fsup} f_y \left[\frac{t_{fsup} - (y_p - t_c)}{2} \right] \} \quad (2.23)$$

$$y_p = \frac{f_y [A_{finf} k_{y,\theta finf} + A_w k_{y,\theta w} + (2t_c + t_{fsup}) b_{fsup} k_{y,\theta fsup}] - 0,85 k_{c,\theta} f_{ck} b_{ef} t_c}{2 b_{fsup} k_{y,\theta fsup} f_y} \leq t_c + t_{fsup}; y_p > t_c \quad (2.24)$$

b₂) Linha neutra plástica na alma do perfil:

$$M_{Rdfi} = \beta_{vm} \left[0,85 k_{c,\theta} f_{ck} b_{ef} t_c \left(y_p - \frac{t_c}{2} \right) + A_{finf} k_{y,\theta finf} f_y \left(\frac{t_{finf}}{2} + h - y_p + t_c + t_{fsup} \right) + A_{fsup} k_{y,\theta fsup} f_y \left(y_p - \frac{t_{fsup}}{2} \right) + (y_p - t_c - t_{fsup}) t_w k_{y,\theta w} f_y \frac{(y_p - t_c - t_{fsup})}{2} + (h - y_p + t_c + t_{fsup}) t_w k_{y,\theta w} f_y \frac{(h - y_p + t_c + t_{fsup})}{2} \right] \quad (2.25)$$

$$y_p = \frac{f_y [A_{finf} k_{y,\theta finf} - A_{fsup} k_{y,\theta fsup} + (h + 2t_c + 2t_{fsup}) t_w k_{y,\theta w}] - 0,85 k_{c,\theta} f_{ck} b_{ef} t_c}{2 t_w k_{y,\theta w} f_y} \leq t_c + t_{fsup} + h; y_p > t_c + t_{fsup} \quad (2.26)$$

em que: A_{finf} , A_{fsup} e A_w são a área da mesa superior, da mesa inferior e da alma, respectivamente; $k_{y,\theta finf}$, $k_{y,\theta fsup}$ e $k_{y,w}$ são os fatores de redução da resistência ao escoamento para a mesa inferior, superior e alma, respectivamente; y_p define a posição da linha neutra medida a partir do topo da laje de concreto. Os demais parâmetros foram definidos nas seções anteriores.

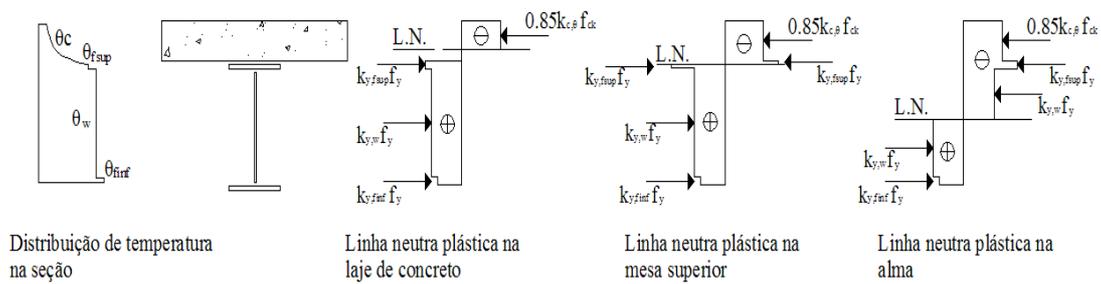


Figura 2.13 – Distribuição de tensões em viga mista em situação de incêndio.

Para ilustrar a metodologia ora descrita, apresenta-se, a seguir, um exemplo para determinação do momento fletor positivo resistente, para diferentes TRRF, de uma viga mista sem proteção contra incêndio, correspondente ao perfil: W360x57,8 (aço: ASTM A572 gr. 50, $f_y = 345$ MPa), com as seguintes características: $b_f = 172$ mm; $t_f = 13,1$ mm; $h = 331,8$ mm; $t_w = 7,9$ mm. A laje de concreto colaborante possui as seguintes características: $t_c = 120$ mm; $b_{ef} = 1000$ mm, $f_{ck} = 20$ MPa.

A figura a seguir mostra a distribuição da temperatura ao longo do tempo no perfil metálico, calculada pelo procedimento previamente apresentado, em que se pode observar que após 60 minutos, a temperatura nas três partes do perfil fica praticamente a mesma e a temperatura na alma segue bem próxima da temperatura na mesa inferior.

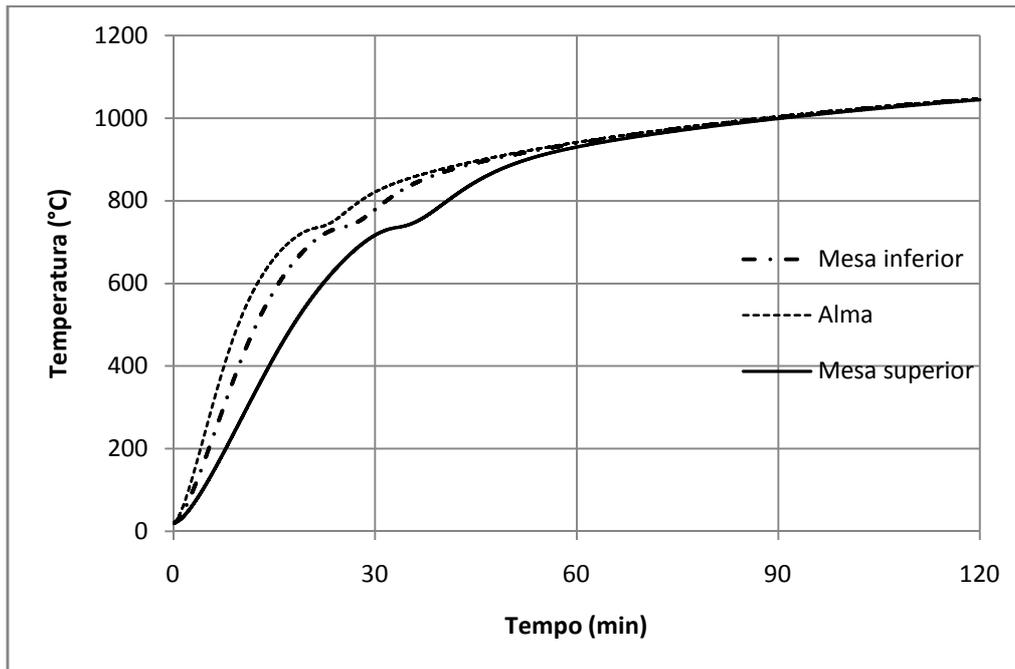


Figura 2.14 – Distribuição da temperatura no perfil metálico ao longo do tempo.

Os resultados dos momentos resistentes para cada TRRF, a relação M_{Rdfi} / M_{Rd} e a posição da linha neutra plástica podem ser vistos na Tabela 2.4 e nas Figuras 2.15 e 2.16.

Tabela 2.4 – Resultados para o exemplo apresentado.

TRRF (min)	M_{Rdfi} (kN.m)	M_{Rdfi}/M_{Rd} (%)	y_p (mm)
0	$M_{Rd} = 484,8$	-	127,2
30	88,3	18,2	20,9
60	37,4	7,7	8,4
90	29,2	6,0	7,1
120	23,0	4,7	5,8

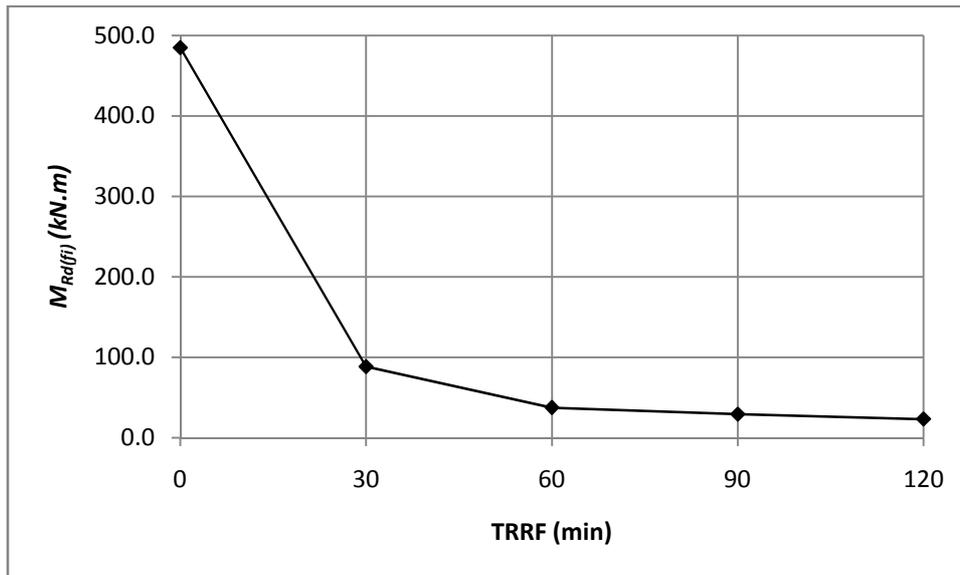


Figura 2.15 – Momento resistente *versus* TRRF, para a seção analisada.

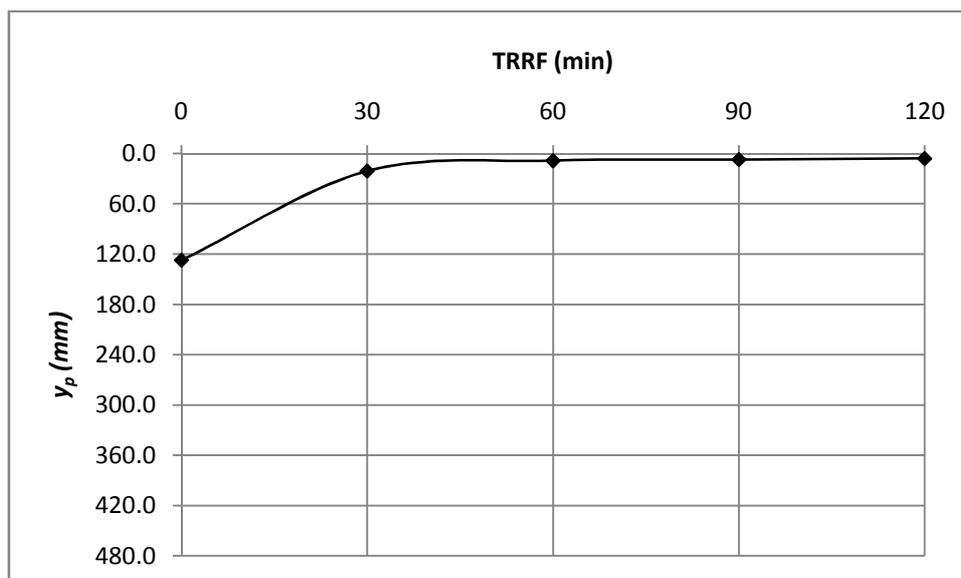


Figura 2.16 – Posição da linha neutra plástica *versus* TRRF, para a seção analisada.

Observa-se que a viga mista sem material de proteção apresenta uma grande redução da capacidade resistente ao momento fletor logo nos primeiros 30 minutos de incêndio. Após esse tempo a redução continua, mas não de forma tão acentuada. Tal fato se justifica pela acelerada elevação de temperatura no gás, provocada pela curva

proposta pela ISO-834 (1999). Devido à propagação de calor ser mais rápida na viga de aço do que na laje de concreto, o aço será degradado mais rapidamente, fazendo com que a linha neutra tenda para a laje de concreto.

2.1.2.3 Vigas mistas com material de proteção

Neste trabalho foram estudadas vigas mistas com material de proteção do tipo contorno. Os materiais utilizados apresentam bom isolamento térmico às altas temperaturas. Os mais comuns são argamassas à base de cimento, de fibras minerais, de vermiculita ou de gesso. A aplicação usual é feita por jateamento, devendo o material após sua secagem trabalhar monoliticamente com a estrutura, acompanhando seus movimentos, sem a ocorrência de fissuras ou desprendimento (PANNONI, 2004).



Figura 2.17 – Aplicação de argamassa projetada em viga metálica (DIAS, 2002).

Esse tipo de proteção contra incêndio apresenta como vantagens o bom isolamento térmico a temperaturas muito elevadas e o baixo peso que agrega à

estrutura; no entanto, tem algumas desvantagens como: o mau aspecto visual do acabamento final (Figura 2.18), a dificuldade em se obter no campo a espessura para qual a viga foi projetada, a sujeira que gera no local da obra e a necessidade de mão-de-obra especializada, o que agrega altos custos à solução.



Figura 2.18 – Aspecto final de viga metálica com proteção de argamassa projetada (DIAS, 2002).

O dimensionamento, segundo a ABNT NBR 14323 (1999) e o EUROCÓDIGO 4 p1.2 (2005), se desenvolvem de forma semelhante àquele previsto para a viga mista sem material de proteção térmica (item 2.1.2.2) diferindo apenas no cálculo da temperatura em cada elemento constituinte do perfil de aço (mesa inferior, mesa superior e alma). A Eq. 2.27 apresenta a evolução do campo de temperaturas para elementos protegidos:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p / d_p}{c_a \rho_a} \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1 + \phi/3} \right) (\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t}; \Delta\theta_{a,t} \geq 0 \quad (2.27)$$

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p \frac{A_p}{V} \quad (2.28)$$

em que:

ϕ é calor relativo armazenado no material de proteção; λ_p é a condutividade térmica do material de proteção térmica; d_p é a espessura do material de proteção térmica; c_p e ρ_p são o calor específico e a densidade do material de proteção térmica; A_p/V é o fator de massividade do elemento protegido, sendo igual a A_m/V , definido na seção anterior; $\Delta\theta_{g,t}$ é a variação da temperatura dos gases para cada incremento de tempo. As demais variáveis foram definidas na seção anterior.

O aprimoramento do desempenho estrutural de elementos protegidos pode ser avaliado a seguir, em que se analisa novamente a seção mista tratada pelas Figuras 2.15 e 2.16 com a presença de material de proteção tipo contorno, com 2 cm de espessura (d_p) e com as seguintes propriedades térmicas: $\lambda_p = 0,174$ W/mK; $c_p = 2400$ J/kgK; $\rho_p = 264$ kg/m³.

A distribuição de temperatura no perfil ao longo do tempo é mostrada na Figura 2.19 e os resultados para os momentos fletores resistentes e posição da linha neutra para cada TRRF são mostrados na Tabela 2.5 e nas Figuras 2.20 e 2.21.

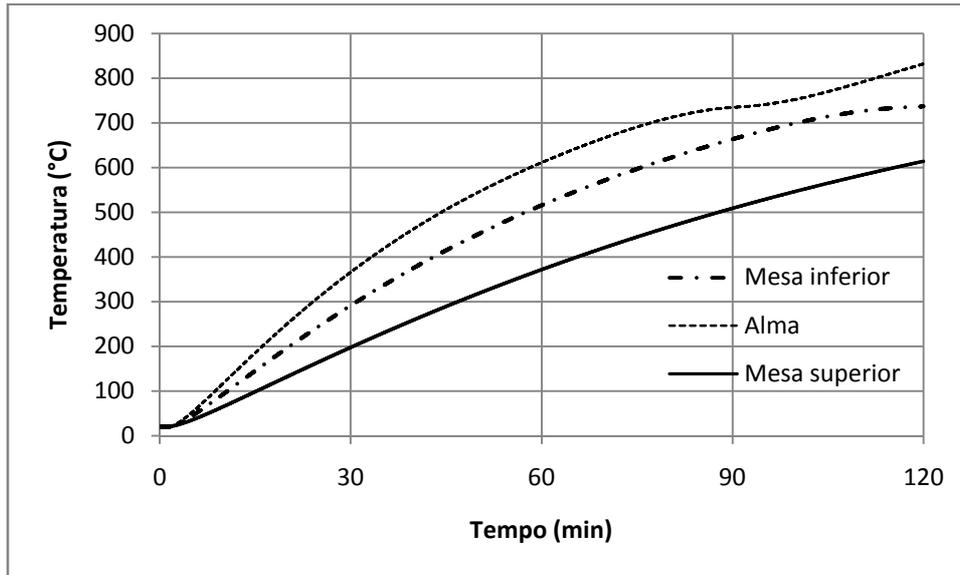


Figura 2.19 – Distribuição da temperatura no perfil metálico ao longo do tempo.

Tabela 2.5 – Resultados para a seção analisada com material de proteção térmica.

TRRF (min)	M_{Rdfi} (kN.m)	M_{Rdfi}/M_{Rd} (%)	y_p (mm)
0	$M_{Rd} = 484,8$	-	127,2
30	557,3	115,0	124,1
60	385,5	79,5	114,0
90	199,7	41,2	70,4
120	118,7	24,5	40,5

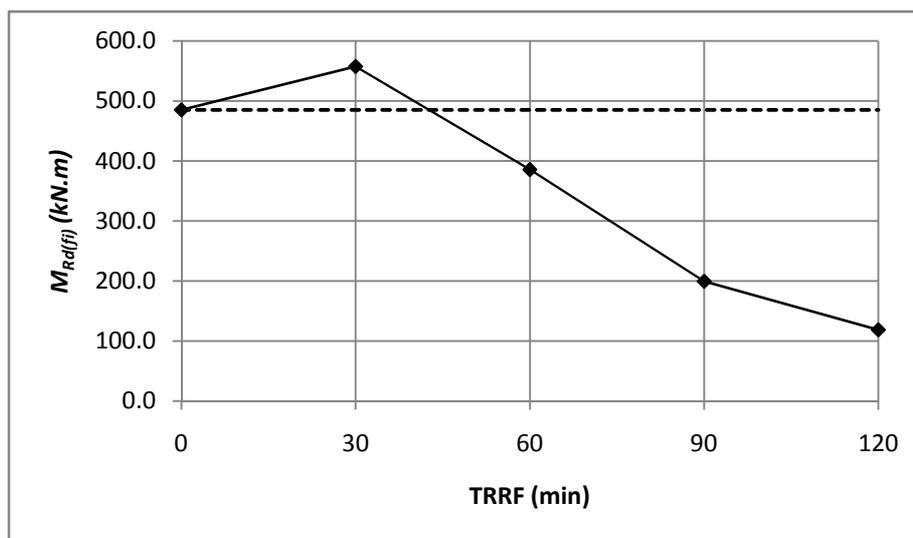


Figura 2.20 – Momento resistente *versus* TRRF, para a viga analisada.

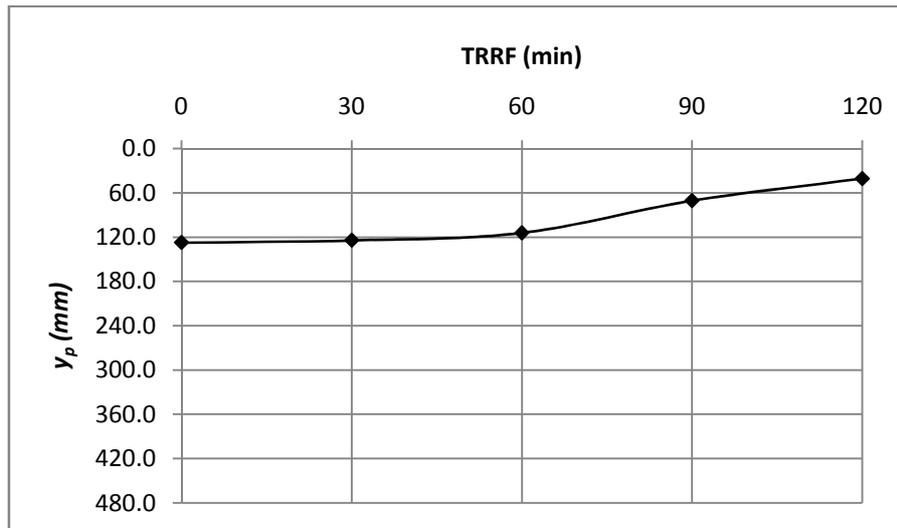


Figura 2.21 – Posição da linha neutra plástica *versus* TRRF, para a viga analisada.

Nesse exemplo, observa-se que a queda no momento resistente se apresenta bem menos acentuada. Para TRRF = 30 minutos, o momento resistente apresentou um valor maior do que aquele em temperatura ambiente. Esse fato se deve aos fatores de segurança para a redução das resistências do aço e do concreto apresentarem valores menores do que em temperatura ambiente ($\gamma_{cfi} = 1,0$, $\gamma_{alfi} = 1,0$, enquanto que $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_{al} = 1,1$). Adicionalmente para esse material de proteção térmica, com as propriedades apresentadas, todos os elementos do perfil de aço resultaram com temperatura inferior a 400°C, temperatura a partir da qual o fator de redução da resistência do aço (k_y) é inferior a 1,0. No entanto, não se devem tomar valores para os momentos resistentes em situação de incêndio superior ao valor encontrado para temperatura ambiente. Nota-se também que a altura da linha neutra se reduz mais suavemente para TRRF até 60 minutos. A partir daí, reduz-se mais bruscamente, mas não tanto quanto na situação sem proteção térmica.

2.2 VIGAS MISTAS COM CONCRETO ENTRE AS MESAS

O sistema de vigas mistas com concreto armado entre as mesas (VMCC) foi desenvolvido na Universidade de Darmstadt, Alemanha, nas décadas de 1970 e 80 (MERGULHÃO, 1998). A presença do concreto armado, além de proteger o perfil contra o incêndio aumenta a capacidade resistente em temperatura ambiente, podendo acarretar reduções de consumo de aço estrutural. A interação do concreto entre as mesas e o perfil metálico pode ser garantida por conectores de cisalhamento, estribos soldados na alma do perfil ou por barras que atravessam furos no perfil e se ligam ao estribo, como pode ser observado na Figura 2.22. As principais vantagens desse sistema estrutural são:

- Redução da velocidade de propagação do calor no perfil, em situação de incêndio;
- Pré-fabricação sem a necessidade do uso de formas, uma vez que a concretagem é realizada em dois estágios, com um lado de cada vez;
- As mesmas ligações comumente usadas em estruturas de aço podem ser aplicadas a este tipo de construção;
- Elevada capacidade de carga devido à presença do concreto armado;
- O concreto entre as mesas protege o risco de flambagem local da alma e da mesa inferior, no caso de vigas semi-contínuas.

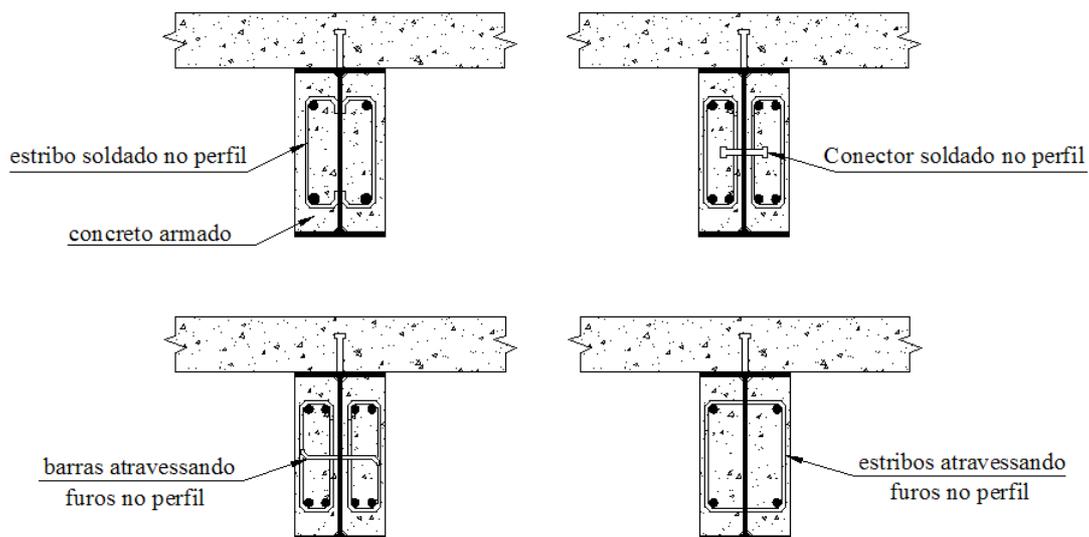


Figura 2.22 – Métodos construtivos para a interação do concreto entre as mesas e o perfil metálico.

Neste trabalho será analisada apenas a seção com o estribo soldado na alma do perfil. O EUROCÓDIGO 4 p1.2 (2005) estabelece algumas premissas para esse tipo de construção, dentre as quais:

- O estribo deve ter um diâmetro mínimo de 6,0 mm;
- Nos cantos dos estribos deve haver barras longitudinais (Φ_l) com um diâmetro mínimo de 8,0 mm;
- O espaçamento dos estribos deve ser menor ou igual a 250 mm;
- Devem ser utilizados cordões de solda de filete, entre o estribo e o perfil, com uma garganta mínima de $0,5\Phi_s$, em que Φ_s é o diâmetro do estribo, e comprimento maior ou igual a $4\Phi_s$;
- O cobrimento do concreto não deve exceder a 35 mm na horizontal, nem a 50 mm na vertical;

No presente estudo, o raio de dobramento do estribo foi considerado como $3 \phi_s$, seguindo as recomendações da ABNT NBR 6118 (2003). A Figura 2.23 apresenta os detalhes construtivos para as VMCCs utilizadas.

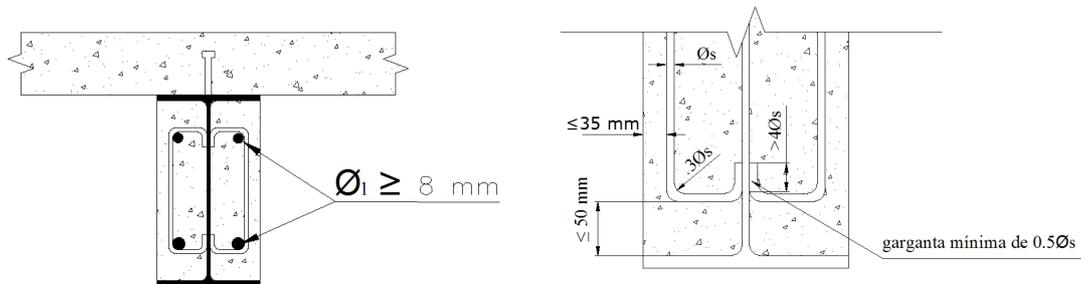


Figura 2.23 – Detalhes construtivos para as VMCCs, com estribo soldado na alma do perfil.

2.2.1 DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO: TEMPERATURA AMBIENTE

A VMCC, tanto em temperatura ambiente quanto em incêndio, não é tratada nas normas brasileiras ABNT NBR 8800 (2007) e ABNT NBR 14323 (1999). O método simplificado para o dimensionamento, a seguir apresentado, está de acordo com o EUROCÓDIGO 4 p1.2 (2005) .

O dimensionamento deve ser feito considerando-se o regime plástico e a seção deve atender as seguintes condições:

- $h/t_w \leq 124\sqrt{235/f_y}$, com f_y em MPa;
- A relação b_c/b_f deve estar dentro dos seguintes limites: $0,8 \leq b_c/b_f \leq 1,0$, com b_c mostrado na figura a seguir e, neste trabalho, tomado sempre como b_f .

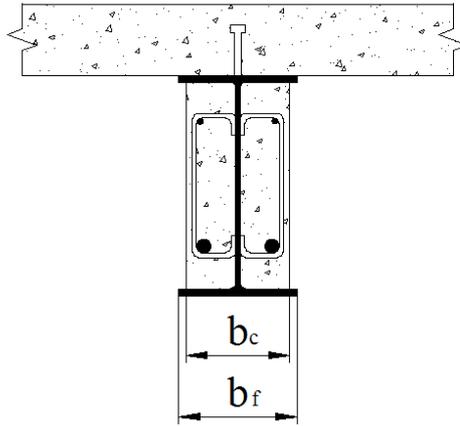


Figura 2.24 – Definição de largura b_c .

O concreto entre as mesas sob tração deve ser desprezado, assim como as armaduras comprimidas no concreto. A seguir são apresentadas as equações para o cálculo do momento resistente, para a interação completa do concreto (da laje e entre as mesas) e o perfil.

a) Linha neutra na laje de concreto:

$$M_{Rd} = T_{ad} \left(\frac{d}{2} + t_c - y_p \right) + T_{sd} (d_s - y_p) \quad (2.29)$$

$$y_p = \frac{T_{ad} + T_{sd}}{0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} b_{ef}} \leq t_c \quad (2.30)$$

b₁) Linha neutra na mesa superior do perfil:

$$M_{Rd} = T_{sd} (d_s - y_p) + 0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} b_{ef} t_c \left(y_p - \frac{t_c}{2} \right) + A_{finf} \frac{f_y}{\gamma_{a1}} \left(\frac{t_{finf}}{2} + h + t_{fsup} + t_c - y_p \right) + A_w \frac{f_y}{\gamma_{a1}} \left(\frac{h}{2} + t_{fsup} + t_c - y_p \right) + b_{fsup} \frac{f_y}{\gamma_{a1}} \frac{(t_{fsup} + t_c - y_p)^2}{2} + b_{fsup} \frac{f_y}{\gamma_{a1}} \frac{(y_p - t_c)^2}{2} \quad (2.31)$$

$$y_p = \frac{\frac{f_y}{\gamma_{a1}}(A_{f_{inf}}+A_w+A_{f_{sup}}+2t_c)+T_{sd}-0,85\frac{f_{ck}}{\gamma_c}b_{ef}t_c}{2b_{f_{sup}}\frac{f_y}{\gamma_{a1}}}; t_c < y_p \leq t_c + t_{f_{sup}} \quad (2.32)$$

b₁) Linha neutra na alma do perfil:

$$M_{Rd} = T_{sd}(d_s - y_p) + 0,85\frac{f_{ck}}{\gamma_c}b_{ef}t_c\left(y_p - \frac{t_c}{2}\right) + 0,85\frac{f_{ck}}{\gamma_c}(b_c - t_w)\frac{(y_p - t_c - t_{f_{sup}})^2}{2} + A_{f_{inf}}\frac{f_y}{\gamma_{a1}}\left(\frac{t_{f_{inf}}}{2} + h + t_{f_{sup}} + t_c - y_p\right) + A_{f_{sup}}\frac{f_y}{\gamma_{a1}}\left(y_p - t_c - \frac{t_{f_{sup}}}{2}\right) + t_w\frac{f_y}{\gamma_{a1}}\frac{(y_p - t_c - \frac{t_{f_{sup}}}{2})^2}{2} + t_w\frac{f_y}{\gamma_{a1}}\frac{(h - y_p + t_c + \frac{t_{f_{sup}}}{2})^2}{2} \quad (2.33)$$

$$y_p =$$

$$\frac{\frac{f_y}{\gamma_{a1}}[A_{f_{inf}} - A_{f_{sup}} + t_w(h + 2t_c + 2t_{f_{sup}})] + T_{sd} - 0,85\frac{f_{ck}}{\gamma_c}[b_{ef}t_c + (b_c - t_w)(t_c + t_{f_{sup}})]}{2t_w\frac{f_y}{\gamma_{a1}} + 0,85\frac{f_{ck}}{\gamma_c}(b_c - t_w)}; y_p > t_c + t_{f_{sup}} \quad (2.34)$$

$$t_{f_{sup}}$$

em que:

$T_{sd} = A_s f_{ys} / \gamma_s$, é o esforço máximo de tração nas armaduras, em que A_s é a soma das áreas da seção transversal das armaduras, f_{ys} é a tensão de escoamento do aço das armaduras e $\gamma_s = 1,15$ é o coeficiente de minoração da resistência do aço; d_s é a distância do topo da laje de concreto ao centro de gravidade das armaduras. Os demais termos são os mesmos já mostrados nos itens anteriores.

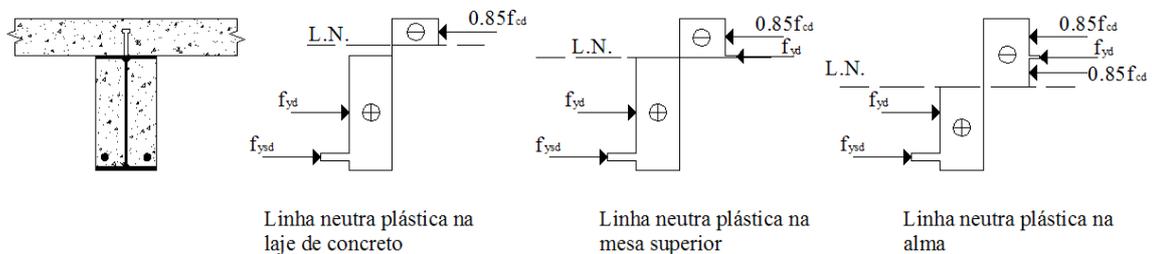


Figura 2.25 – Distribuição de tensões em VMCC em temperatura ambiente.

2.2.2 DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO: SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Para o cálculo da VMCC em situação de incêndio, o EUROCÓDIGO 4 p1.2 (2005) fornece algumas regras para diferentes TRRFs, apresentadas a seguir, para cada parte da seção mista:

- Laje de concreto: só a parte comprimida que não é influenciada diretamente pela temperatura é levada em consideração. O valor da resistência à compressão do concreto é tomado como $f_{ck,20^{\circ}C} / \gamma_{M,fi,c}$ ($\gamma_{M,fi,c} = 1,0$). A largura efetiva é a mesma utilizada para a temperatura ambiente. A redução da espessura da laje ($h_{c,fi}$) varia com o TRRF conforme a Tabela 2.6.
- Mesa superior do perfil: Considerada com sua resistência total, assumindo-se que os cantos, onde a transferência de calor é direta, não sejam levados em consideração. A largura desprezada dos cantos (b_{fi}) varia de acordo com o TRRF e está mostrada na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Valores para o cálculo de $h_{c,fi}$ e b_{fi} - EUROCÓDIGO 4 p1.2 (2005).

	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (min)				
	30	60	90	120	180
$h_{c,fi}$ (mm)	10	20	30	40	55
b_{fi} (mm)	$(t_f/2) + (b_f - b_c)/2$	$(t_f/2) + 10 + (b_f - b_c)/2$	$(t_f/2) + 30 + (b_f - b_c)/2$	$(t_f/2) + 40 + (b_f - b_c)/2$	$(t_f/2) + 60 + (b_f - b_c)/2$

- Alma do perfil: A alma é dividida em duas partes. A parte superior (h_h), é considerada como permanecendo a 20°C, ou seja, é considerada com a resistência total. Na parte inferior (h_l) assume-se que a temperatura varia linearmente de 20°C, na parte superior, até a temperatura da mesa inferior. A altura h_l varia de acordo com o TRRF, conforme a Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Roteiro para o cálculo da altura h_l , sendo $h_{lmax} = d - 2t_f$ - EUROCÓDIGO 4 p1.2 (2005).

		$h_l = a_1 / b_c + a_2 t_w / (b_c d)$		
	TRRF(min)	$a_1 (mm^2)$	$a_2 (mm^2)$	$h_{lmin} (mm)$
$d/b_c \leq 1$	30	3600	0	20
	60	9500	20000	30
	90	14000	160000	40
	120	23000	180000	45
	180	35000	400000	55
$d/b_c \geq 2$	30	3600	0	20
	60	9500	0	30
	90	14000	75000	40
	120	23000	110000	45
	180	35000	250000	55
$1 < d/b_c < 2$	30	$h_l = 3600 / b_c$		20
	60	$h_l = 9500 / b_c + 20000 (t_w / b_c d)(2 - d/b_c)$		30
	90	$h_l = 14000 / b_c + 75000 (t_w / b_c d) + 85000 (t_w / b_c d)(2 - d/b_c)$		40
	120	$h_l = 23000 / b_c + 110000 (t_w / b_c d) + 70000 (t_w / b_c d)(2 - d/b_c)$		45
	180	$h_l = 35000 / b_c + 250000 (t_w / b_c d) + 150000 (t_w / b_c d)(2 - d/b_c)$		55

- Armaduras: a temperatura nas armaduras depende da distância em relação à mesa inferior (u_i) e ao cobrimento de concreto (u_s). A partir de tais distâncias, calcula-se a posição equivalente u conforme a Equação (2.35). O fator de redução da resistência para as armaduras k_r é dado em função do TRRF e da posição u , calculado como mostra a Tabela 2.8, que é dada por:

$$u = 1 / \left[(1/u_i) + (1/u_{si}) + (1/(b_c - t_w - u_{si})) \right] \quad (2.35)$$

Tabela 2.8 - Cálculo do fator de redução da resistência das armaduras EUROCÓDIGO 4 p1.2 (2005).

$k_r = (ua_3 + a_4)a_5 / \sqrt{A_m / V}$				$k_{r,min}$	$k_{r,max}$
TRRF	a_3	a_4	a_5	0,1	1,0
30	0,062	0,16	0,126		
60	0,034	-0,04	0,101		
90	0,026	-0,154	0,090		
120	0,026	-0,284	0,082		
180	0,024	-0,562	0,076		

Na Tabela 2.8, temos:

$$A_m = 2h + b_c \text{ (em mm)} \quad (2.36)$$

$$V = hb_c \text{ (em mm}^2\text{)} \quad (2.37)$$

- Concreto entre as mesas: o concreto entre as mesas não é incluído no cálculo do momento positivo.
- Mesa inferior: a mesa inferior não tem a sua seção reduzida, mas a resistência ao escoamento é reduzida pelo fator k_a apresentado na Tabela 2.9, sendo $a_0 = 0.018t_f + 0.7$.

Tabela 2.9 - Cálculo do fator de redução k_a - EC 4 p1.2 (2004).

TRRF	Fator de redução k_a	$k_{a \min}$	$k_{a \max}$
30	$[(1,12) - (84 / b_c) + (d / 22b_c)]a_0$	0,5	0,8
60	$[(0,21) - (26 / b_c) + (d / 24b_c)]a_0$	0,12	0,4
90	$[(0,12) - (17 / b_c) + (d / 38b_c)]a_0$	0,06	0,12
120	$[(0,10) - (15 / b_c) + (d / 40b_c)]a_0$	0,05	0,10
180	$[(0,03) - (3 / b_c) + (d / 50b_c)]a_0$	0,03	0,06

A Figura 2.26 mostra os parâmetros utilizados no cálculo da VMCC em incêndio, apresentando as áreas que são desconsideradas e as que têm as resistências ao escoamento reduzidas.

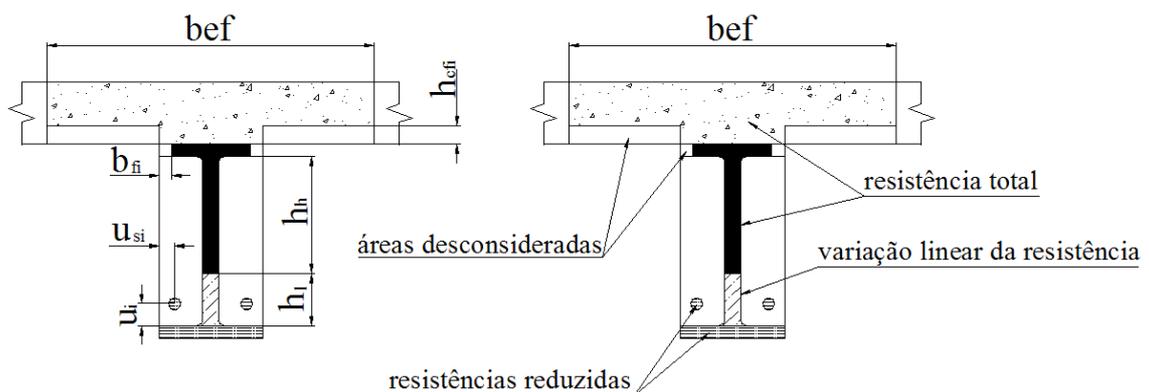


Figura 2.26 – Parâmetros para o cálculo da VMCC em situação de incêndio.

De posse das propriedades resultantes para a VMCC, o momento positivo resistente para a situação de incêndio é calculado em regime plástico da seguinte forma:

a₁) Linha neutra na laje de concreto, acima da altura h_{cfi} :

$$\begin{aligned}
 M_{Rdfi} = & N_{f1} \left(\frac{t_{fsup}}{2} + t_c - y_p \right) + N_{wh} \left(\frac{h-h_l}{2} + t_{fsup} + t_c - y_p \right) + \\
 & N_{wlc} \left(d - t_{finf} - \frac{h_l}{2} + t_c - y_p \right) + N_{wll} \left(d - t_{finf} - \frac{2h_l}{3} + t_c - y_p \right) + \\
 & N_{f2} \left(d - \frac{t_{finf}}{2} + t_c - y_p \right) + T_{sdfi} (d_s - y_p) + \frac{f_{ck}}{\gamma_{mfic}} b_{ef} \frac{y_p^2}{2}
 \end{aligned} \quad (2.38)$$

$$y_p = \frac{N_{f1} + N_{f2} + N_{wh} + N_{wlc} + N_{wll} + T_{sdfi}}{\frac{f_{ck} b_{ef}}{\gamma_{mfic}}} \leq t_c - h_{cfi} \quad (2.39)$$

a₂) Linha neutra na laje de concreto, dentro da altura h_{cfi} :

$$\begin{aligned}
 M_{Rdfi} = & N_{f1} \left(\frac{t_{fsup}}{2} + t_c - y_p \right) + N_{wh} \left(\frac{h-h_l}{2} + t_{fsup} + t_c - y_p \right) + \\
 & N_{wlc} \left(d - t_{finf} - \frac{h_l}{2} + t_c - y_p \right) + N_{wll} \left(d - t_{finf} - \frac{2h_l}{3} + t_c - y_p \right) + \\
 & N_{f2} \left(d - \frac{t_{finf}}{2} + t_c - y_p \right) + T_{sdfi} (d_s - y_p) + \frac{f_{ck}}{\gamma_{mfic}} b_{ef} (t_c - h_{cfi}) \left(y_p - \frac{t_c}{2} + \right. \\
 & \left. \frac{h_{cfi}}{2} \right) + \frac{f_{ck}}{\gamma_{mfic}} b_{fsup} \frac{(y_p - t_c + h_{cfi})^2}{2}
 \end{aligned} \quad (2.40)$$

$$y_p =$$

$$\frac{N_{f1} + N_{f2} + N_{wh} + N_{wlc} + N_{wll} + T_{sdfi} - \frac{f_{ck} b_{ef}}{\gamma_{mfic}} (t_c - h_{cfi}) + \frac{f_{ck} b_{fsup}}{\gamma_{mfic}} (t_c - h_{cfi})}{\frac{f_{ck} b_{fsup}}{\gamma_{mfic}}}; t_c - h_{cfi} < \quad (2.41)$$

$$y_p \leq t_c$$

b₁) Linha neutra na mesa superior do perfil:

$$\begin{aligned}
 M_{Rdfi} = & N_{wh} \left(\frac{h-h_l}{2} + t_{fsup} + t_c - y_p \right) + N_{wlc} \left(d - t_{finf} - \frac{h_l}{2} + t_c - \right. \\
 & \left. y_p \right) + N_{wll} \left(d - t_{finf} - \frac{2h_l}{3} + t_c - y_p \right) + N_{f2} \left(d - \frac{t_{finf}}{2} + t_c - y_p \right) + \\
 & T_{sdfi} (d_s - y_p) + \frac{f_{ck}}{\gamma_{mfic}} b_{ef} (t_c - h_{cfi}) \left(y_p - \frac{t_c}{2} + \frac{h_{cfi}}{2} \right) + \frac{f_{ck}}{\gamma_{mfic}} b_{fsup} h_{cfi} \left(\frac{h_{cfi}}{2} + \right. \\
 & \left. y_p - t_c \right) + \frac{f_y}{\gamma_{mfia}} (b_{fsup} - 2b_{fi}) \frac{(y_p - t_c)^2}{2} + \frac{f_y}{\gamma_{mfia}} (b_{fsup} - 2b_{fi}) \frac{(t_{fsup} + t_c - y_p)^2}{2}
 \end{aligned} \quad (2.42)$$

$$y_p = \frac{N_{f2} + N_{wh} + N_{wlc} + N_{wll} + T_{sdfi} - \frac{f_{ck}}{\gamma_{mfic}} b_{ef} (t_c - h_{cfi}) - \frac{f_{ck}}{\gamma_{mfic}} b_{fsup} h_{cfi} + \frac{f_y}{\gamma_{mfia}} (b_{fsup} - 2b_{fi}) (t_{fsup} + 2t_c)}{2 \frac{f_y}{\gamma_{mfia}} (b_{fsup} - 2b_{fi})} \quad (2.43)$$

$$y_p \leq t_c + t_{fsup}$$

b₂) Linha neutra na alma do perfil:

$$\begin{aligned}
 M_{Rdfi} = & N_{wlc} \left(d - t_{finf} - \frac{h_l}{2} + t_c - y_p \right) + N_{wll} \left(d - t_{finf} - \frac{2h_l}{3} + t_c - \right. \\
 & \left. y_p \right) + N_{f2} \left(d - \frac{t_{finf}}{2} + t_c - y_p \right) + T_{sdfi} (d_s - y_p) + \frac{f_{ck}}{\gamma_{mfic}} b_{ef} (t_c - h_{cfi}) \left(y_p - \right. \\
 & \left. \frac{t_c}{2} + \frac{h_{cfi}}{2} \right) + \frac{f_{ck}}{\gamma_{mfic}} b_{fsup} h_{cfi} \left(\frac{h_{cfi}}{2} + y_p - t_c \right) + N_{f1} \left(y_p - t_c - \frac{t_{fsup}}{2} \right) + \\
 & \frac{f_y}{\gamma_{mfia}} t_w \frac{(y_p - t_c - t_{fsup})^2}{2}
 \end{aligned} \quad (2.44)$$

$$y_p =$$

$$\frac{N_{f2} + N_{wlc} + N_{wll} + T_{sdfi} - \frac{f_{ck}}{\gamma_{mfic}} b_{ef} (t_c - h_{cfi}) - \frac{f_{ck}}{\gamma_{mfic}} b_{fsup} h_{cfi} - N_{f1} + \frac{f_y}{\gamma_{mfia}} t_w (2t_c + 2t_{fsup} + h + h_l)}{2 \frac{f_y}{\gamma_{mfia}} t_w}; t_c \quad (2.45)$$

$$t_{fsup} < y_p \leq t_c + t_{fsup} + h_h$$

em que:

$N_{f1} = f_y (b_{fsup} - 2b_{fi}) t_{fsup} / \gamma_{mfia}$ é a força resultante na mesa superior do perfil; $N_{f2} = k_{af} b_{finf} t_{finf} / \gamma_{mfia}$ é a força resultante na mesa inferior do perfil; $N_{wh} = f_y (h - h_l) t_w / \gamma_{mfia}$ é

a força resultante na parte superior da alma; $N_{wlc} = k_a f_y h_l t_w / \gamma_{mfia}$ é a parcela constante da força resultante para a parte inferior da alma do perfil; $N_{wll} = (f_y - k_a f_y) h / (2t_w / \gamma_{mfia})$ é a parcela com variação linear da resistência ao escoamento da força resultante para a parte inferior da alma; $T_{sdfi} = A_s k_r f_{ys} / \gamma_{mfis}$ é a força resultante nas armaduras;

γ_{mfia} , γ_{mfis} e γ_{mfic} são os coeficientes de ponderação da resistência do aço, das armaduras e do concreto, respectivamente, e tomados igual a 1,0. As outras variáveis foram mostradas nos itens anteriores.

A Figura 2.27 mostra a distribuição de tensões na VMCC para as várias posições da linha neutra.

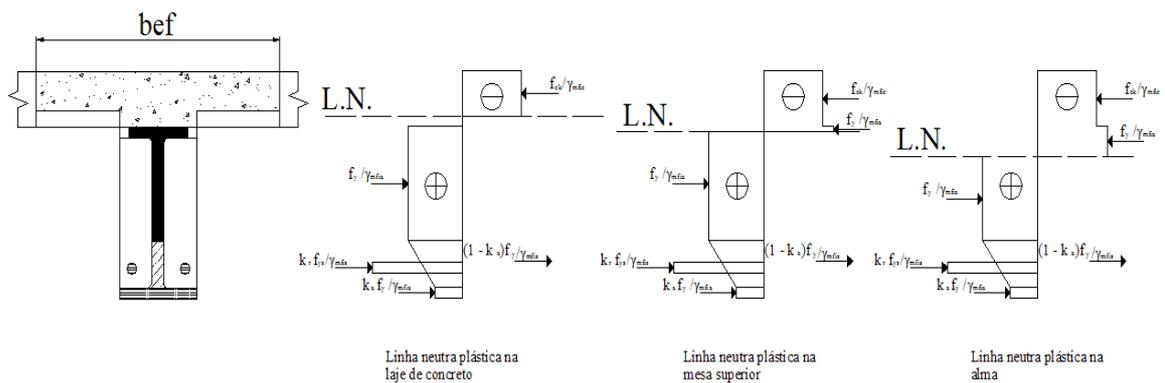


Figura 2.27 – Distribuição de tensões em VMCC em situação de incêndio.

A VMAC anteriormente analisada, será agora estudada com concreto entre as mesas (VMCC), $b_c = b_{inf}$, e com a armadura com as seguintes características:

- 2 barras de 10 mm - CA-50 ($f_{ys} = 500$ MPa);
- Estribo de 6,0 mm;
- Cobrimento do estribo na horizontal e vertical de 30 mm;

Os resultados para os momentos fletores resistentes e posição da linha neutra para cada TRRF são mostrados na Tabela 2.10 e nas Figuras 2.28 e 2.29.

Tabela 2.10 – Resultados para o a seção analisada com concreto entre as mesas.

TRRF (min)	M_{Rdfi} (kN.m)	M_{Rd}/M_{Rdfi} (%)	y_p (mm)
0	$M_{Rd} = 504,1$	-	127,8
30	516,2	102,4	115,9
60	321,5	63,8	80,5
90	271,7	53,9	66,1
120	236,8	47,0	57,3

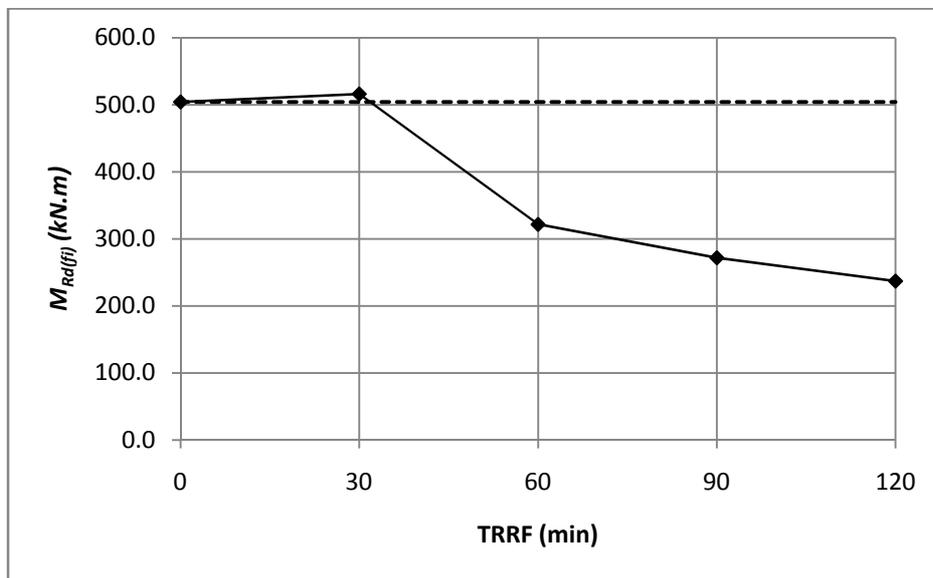


Figura 2.28 – Momento resistente *versus* TRRF, para a seção analisada.

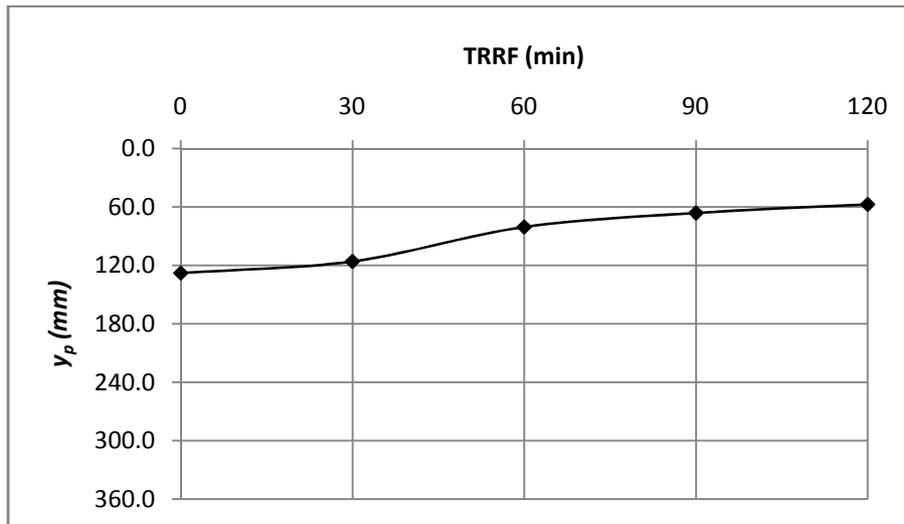


Figura 2.29 – Posição da linha neutra plástica *versus* TRRF, para a seção analisada.

Observa-se um aumento do momento resistente em temperatura ambiente, quando comparada a viga mista sem concreto entre as mesas, de aproximadamente 4% (484,8 kN.m para 504,1 kN.m) que se deve à participação da armadura. Os momentos resistentes em situação de incêndio com valores superiores àqueles em temperatura ambiente devem assumir o valor para esta última situação. A redução do momento resistente em situação de incêndio também se dá de forma mais suave do que para a viga de aço, de forma análoga à viga mista com material de proteção térmica. A influência das armaduras no momento resistente pode ser mais bem visualizada na Figura 2.30 a seguir, na qual se obteve para o exemplo anterior o momento resistente em temperatura ambiente variando o diâmetro da armadura longitudinal.

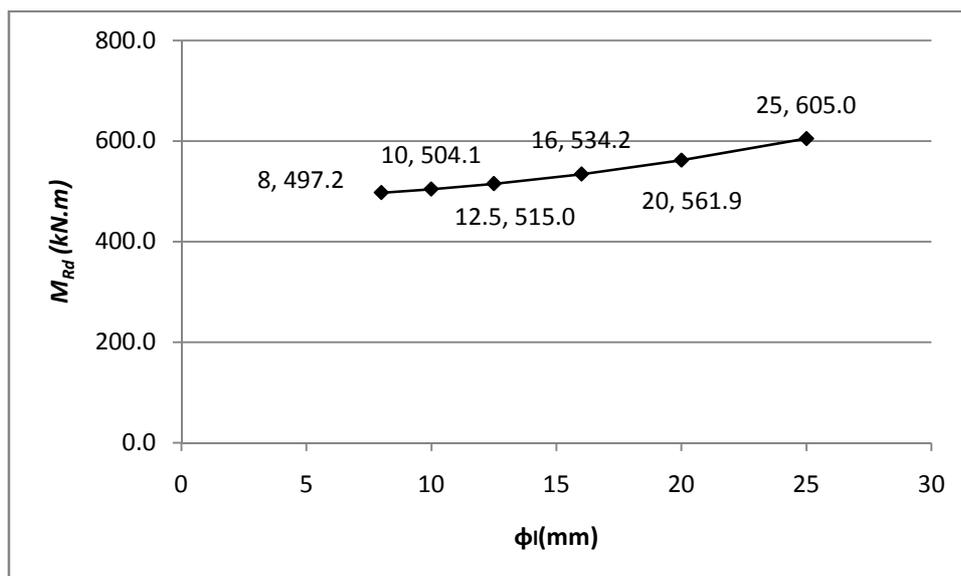


Figura 2.30 – Variação do momento resistente em temperatura ambiente com a armadura utilizada.

2.3 PILARES

A seguir serão apresentadas as metodologias para dimensionamento de pilares metálicos não-mistos (PNM) e pilares mistos (PM) em temperatura ambiente e em situação de incêndio. Serão seguidos os modelos propostos pelas ABNT NBR 8800 (2007) e ABNT NBR 14323 (1999) que, por sua vez, seguem as recomendações dos EUROCÓDIGO 3 p1.1 (2005), EUROCÓDIGO 4 p1.1 e p1.2 (2005) e do AISC/LRFD (2005). Os pilares serão analisados para as situações de compressão centrada e de flexão composta (reta e oblíqua). As seções analisadas serão perfis I e H laminados, classe 1 ou 2 (compactos e semi-compactos).

2.3.1. DIMENSIONAMENTO DE PILARES NÃO-MISTOS: TEMPERATURA AMBIENTE

O dimensionamento de pilares submetidas apenas à compressão centrada deve obedecer à seguinte condição:

$$N_{Sd} \leq N_{Rd} \quad (2.46)$$

em que: N_{Sd} é a força axial de compressão solicitante de cálculo; N_{Rd} é a força axial resistente de cálculo.

A força axial resistente de cálculo está associada aos estados limites últimos de instabilidade por flexão, por torção e de flambagem local, EUROCÓDIGO 3 p1.1 (2005), devendo ser determinada por:

$$N_{Rd} = \frac{\chi Q A f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2.47)$$

em que:

Q é o fator de redução associado à flambagem local, que para perfis laminados pode ser tomado igual a 1.0 no caso de as seguintes relações serem cumpridas:

- $h/t_w \leq 1,49(E/f_y)$ – verificação da alma;
- $(b_f/2)/t_f \leq 0,56(E/f_y)$ – verificação das mesas.

χ é o fator de redução associado à resistência a compressão, sendo calculado pela expressão seguinte:

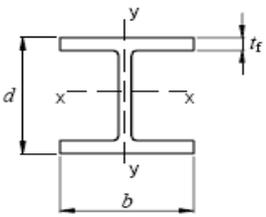
$$\chi = \frac{1}{\beta + \sqrt{\beta^2 - \lambda_0^2}} \leq 1,0 \quad (2.48)$$

com:

$$\beta = 0,5(1 + \alpha(\lambda_0 - 0.2) + \lambda_0^2) \quad (2.49)$$

O coeficiente α é relacionado à curva de dimensionamento, mostrada na Figura 2.31, e nos casos de flambagem por flexão é igual a 0,21, 0,34, 0,49 e 0,76 para as curvas a, b, c e d de dimensionamento à compressão. Nos casos de flambagem por torção esse coeficiente deve ser tomado como igual ao da curva relacionada à flambagem por flexão em relação ao eixo de menor inércia. A tabela a seguir mostra qual curva deve ser utilizada no dimensionamento, no caso de perfis I e H laminados.

Tabela 2.11 – Curvas de dimensionamento à compressão para a instabilidade por flexão.

Seção transversal	Limites		Instabilidade em relação ao eixo	Curva
Seções I e H laminadas 	d/b > 1.2	t _f ≤ 40 mm	x - x	a
		40 < t _f ≤ 100 mm	x - x	b
			y - y	c
		d/b > 1.2	t _f ≤ 100 mm	x - x
	t _f > 100 mm		qualquer	d

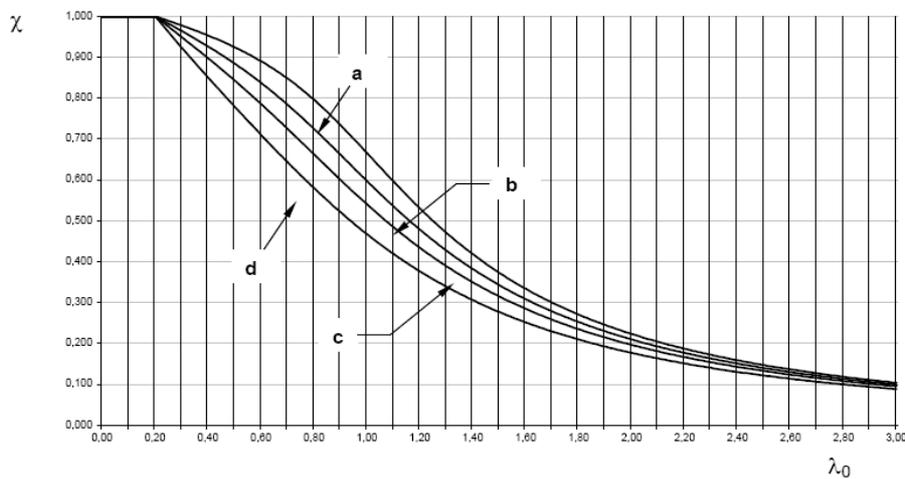


Figura 2.31 – Curvas de dimensionamento à compressão - EUROCÓDIGO 3 p1.1 (2005).

O índice de esbeltez reduzido (λ_0) é calculado pela expressão:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QAf_y}{N_e}} \quad (2.50)$$

sendo N_e a força axial de flambagem elástica por flexão, dada para os dois eixos principais e para o caso de torção, por:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{K_x L_x^2}; N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{K_y L_y^2}; N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} + GI_t \right] \quad (2.51)$$

em que:

I_x , I_y e I_t são os momentos de inércia em relação aos eixos x e y e inércia à torção uniforme, respectivamente;

r_0 é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento;

C_w é a constante de empenamento;

G é o módulo de elasticidade transversal do aço;

L_x , L_y e L_z são os comprimentos destravados para flexão das colunas em relação aos eixos x e y e o comprimento de flambagem por torção, respectivamente;

K_x , K_y e K_z são os coeficientes de flambagem, em relação aos eixos x, y e z, respectivamente.

A ABNT NBR 8800 (2007) ainda restringe, para os elementos comprimidos, que a maior relação entre o comprimento destravado e o raio de giração (L/r) seja inferior a 200.

No caso de flexão composta (reta ou oblíqua), a verificação deve ser feita por meio das equações de interação (AISC/LRFD, 2005):

- Para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0.2$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{Sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \leq 1,0 \quad (2.52)$$

- Para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0.2$

$$\frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \left(\frac{M_{Sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \leq 1,0 \quad (2.53)$$

em que:

$M_{Sd,x}$ e $M_{Sd,y}$ são os momentos fletores solicitantes de cálculo em relação aos eixos x e y da seção transversal, respectivamente; $M_{Rd,x}$ e $M_{Rd,y}$ são os momentos fletores

resistentes de cálculo em relação aos eixos x e y da seção transversal, respectivamente, e para as seções compactas e semi-compactas são dados por:

$$M_{Rdx} = \frac{Z_x f_y}{\gamma_{a1}} \text{ e } M_{Rdy} = \frac{Z_y f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2.54)$$

sendo Z_x e Z_y os módulos plásticos da seção transversal, em relação aos eixos x e y, respectivamente.

2.3.1. DIMENSIONAMENTO DE PILARES NÃO-MISTOS: SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Este trabalho adota o método de dimensionamento da ABNT NBR 14323 (1999) para pilares não-mistos, com ou sem proteção térmica. A força normal resistente de cálculo, para seções compactas e semi-compactas é calculada com a seguinte expressão:

$$N_{Rdfi} = \chi_{fi} k_{y\theta} A f_y \quad (2.55)$$

$k_{y\theta}$ é o fator de redução da resistência ao escoamento do aço a altas temperaturas, sendo a temperatura calculada de acordo com a Equação (2.15) para os casos de pilares sem material de proteção térmica, e com a Equação (2.27) para os casos de pilares com material de proteção térmica. Para ambos os casos, o fator de massividade passa a ser o perímetro do perfil dividido por sua área.

O fator de redução associado à resistência à compressão a altas temperaturas, χ_{fi} , é calculado pela equação:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\beta_{\theta} + \sqrt{\beta_{\theta}^2 - \lambda_{0,\theta}^2}} \leq 1,0 \quad (2.56)$$

em que:

$$\beta_{\theta} = 0.5(1 + \alpha_{\theta}\lambda_{0,\theta} + \lambda_{0,\theta}^2) \quad (2.57)$$

em que o índice de esbeltez reduzido em situação de incêndio ($\lambda_{0,\theta}$) é dado por:

$$\lambda_{0,\theta} = \lambda_0 \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (2.58)$$

e

$$\alpha_{\theta} = 0.022 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2.59)$$

No caso de o pilar ser submetido a momentos fletores, as equações de interação devem ser verificadas:

○ Para $\frac{N_{Sdfi}}{N_{Rdfi}} \geq 0.2$

$$\frac{N_{Sdfi}}{N_{Rdfi}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{Sdfi,x}}{M_{Rdfi,x}} + \frac{M_{Sdfi,y}}{M_{Rdfi,y}} \right) \leq 1,0 \quad (2.60)$$

○ Para $\frac{N_{Sdfi}}{N_{Rdfi}} < 0.2$

$$\frac{N_{Sdfi}}{2N_{Rdfi}} + \left(\frac{M_{Sdfi,x}}{M_{Rdfi,x}} + \frac{M_{Sdfi,y}}{M_{Rdfi,y}} \right) \leq 1,0 \quad (2.61)$$

No caso das seções compactas e semicompactas, os momentos resistentes podem ser calculados por:

$$M_{Rdx} = \frac{Z_x k_{y,\theta} f_y}{\gamma_{a1}} \text{ e } M_{Rdy} = \frac{Z_y k_{y,\theta} f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2.62)$$

Para a definição do comprimento de flambagem dos pilares em edifícios de múltiplos pisos, pode-se admitir que os pilares nos pavimentos abaixo e acima do compartimento em incêndio restrinjam, perfeitamente, a rotação do pilar no compartimento em incêndio, como se pode observar na figura a seguir.

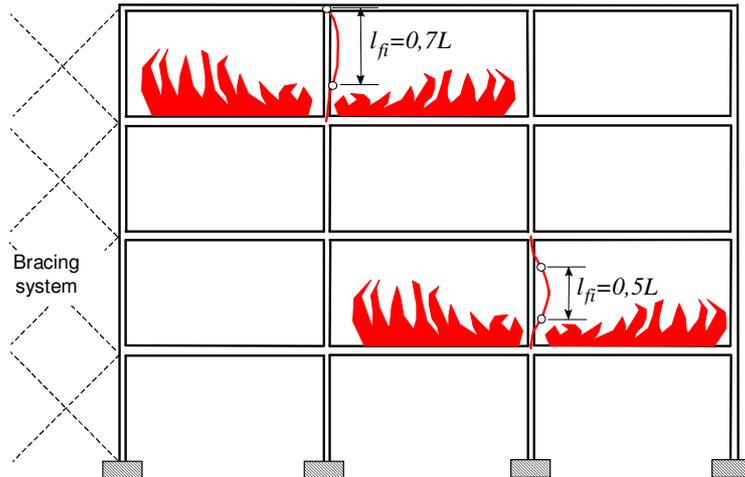


Figura 2.32 – Comprimentos de flambagem em situação de incêndio (SSEDTA, 2001).

Será apresentada a seguir, na Figura 2.33, a avaliação da capacidade resistente de um perfil H (W360x122, aço: ASTM A572 gr. 50). A força normal resistente de cálculo é mostrada em função do comprimento de flambagem da coluna (adotando $L_x = L_y$), e com TRRF variando de 0 a 120 minutos.

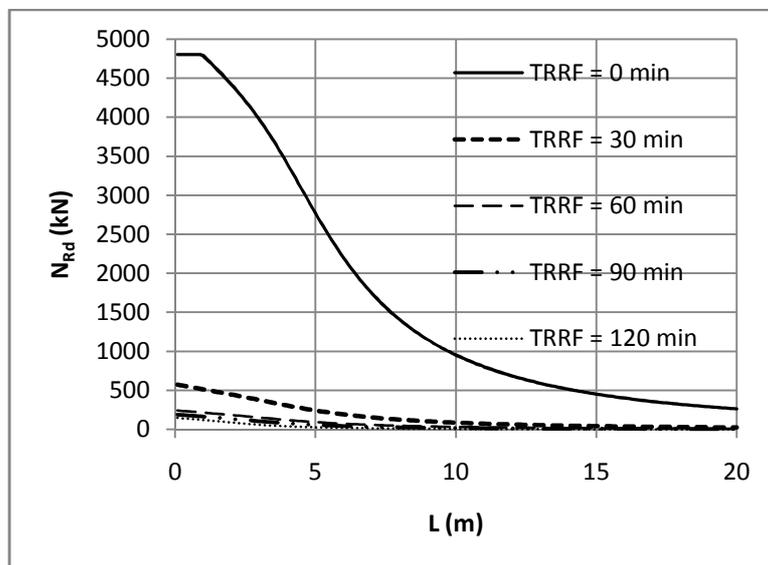


Figura 2.33 – Força normal resistente *versus* comprimento do pilar, para diferentes TRRF.

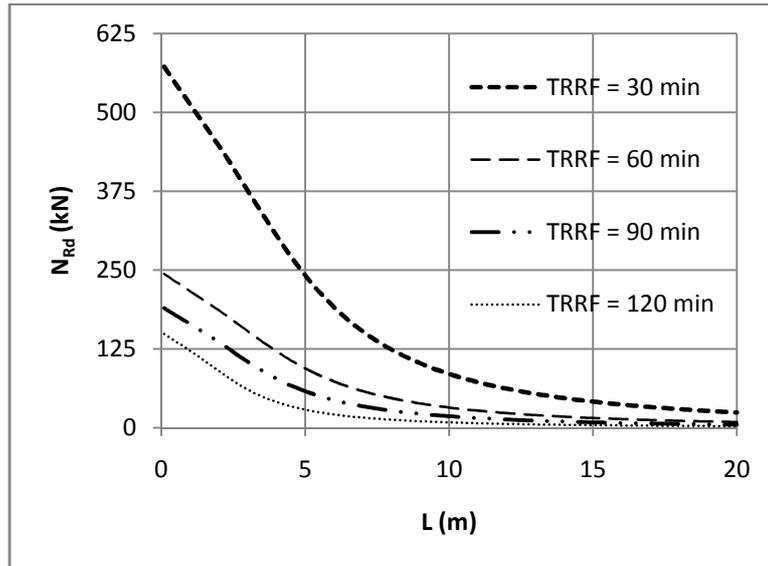


Figura 2.34 – Força normal resistente *versus* comprimento do pilar (apenas situação de incêndio).

Analisando os gráficos, fica evidente a necessidade de proteção das colunas devido à grande redução da capacidade resistente em situação de incêndio e por se tratar de um elemento cuja falha pode gerar o colapso estrutural global.

2.3.2. PILARES MISTOS

Os pilares mistos foram inicialmente projetados com a função de aumentar a resistência à corrosão e ao incêndio. A evolução da construção civil, com edificações cada vez maiores, levou a ao desenvolvimento de metodologias de cálculo com o aço e o concreto trabalhando em conjunto, tirando proveito das características específicas de cada material: o aço contribuindo com sua elevada resistência e leveza e o concreto com sua grande rigidez e inércia (CAMPOS, 2006).

Os tipos mais comuns de pilares mistos são: pilares mistos revestidos com concreto (Figura 2.35 – a, b e c) e pilares tubulares preenchidos com concreto (Figura 2.35 – d, e e f).

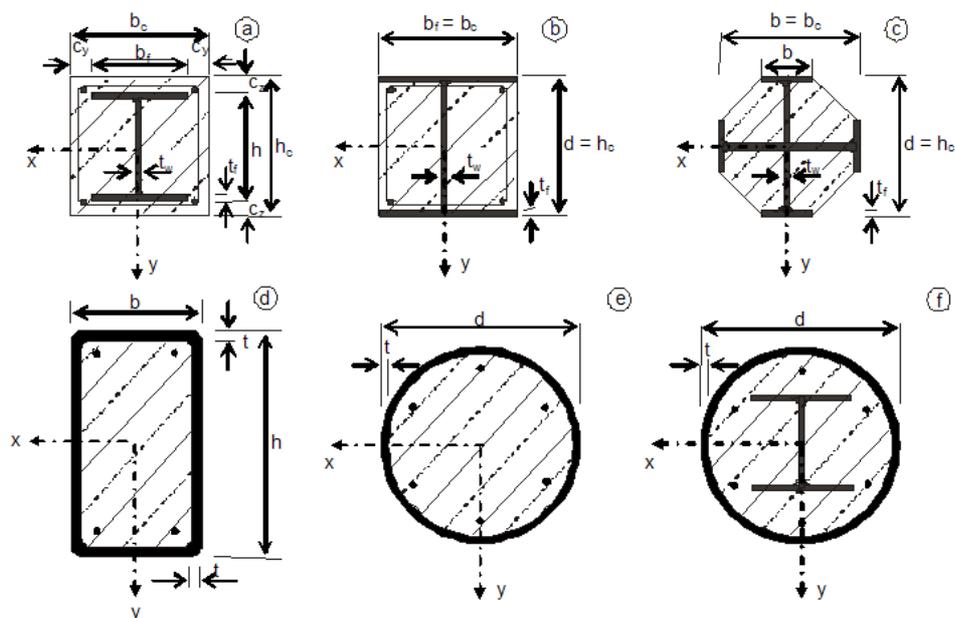


Figura 2.35 – Seções transversais típicas para os pilares mistos de aço e concreto (SSEDTA, 2001).

Neste trabalho, serão analisados os pilares mistos parcialmente revestidos com concreto (Figura 2.32-b). Uma comparação entre os dois tipos mais usuais (Figura 2.35 a e b) é apresentada na tabela a seguir.

Tabela 2.12 – Comparação entre os tipos mais usuais de pilares mistos.

Totalmente revestido com concreto	Parcialmente revestido com concreto
Necessidade do uso de formas	Não necessita de formas
Concretagem após a montagem do perfil de aço	Concretado horizontalmente antes da montagem do perfil de aço
Perfil de aço totalmente revestido	Perfil de aço parcialmente revestido
A resistência total do pilar misto se dá somente após a cura do concreto que envolve o perfil	Após a montagem já pode contar com a resistência máxima do pilar misto
Elevada resistência ao incêndio	Moderada resistência ao incêndio
Menor consumo de armadura	Maior consumo de armadura devido a menor resistência ao incêndio



(a)



(b)

Figura 2.36 – Pilar misto totalmente revestido (a) e parcialmente revestido (b) (CAMPOS, 2006).

Independentemente do tipo de pilar misto pode-se citar como vantagens globais desse tipo de construção, as seguintes:

- Maior rigidez quando sujeitos a carregamentos laterais se comparados com pilares não- mistos;
- Seções transversais menores se comparadas com pilares de concreto;
- Fixadas as dimensões externas, podem-se obter pilares que resistam a diferentes esforços, variando o perfil de aço utilizado. Isso faz com que as distâncias entre os pilares sejam mantidas constantes, o que facilita o projeto arquitetônico;
- Maior resistência ao incêndio quando comparado com um pilar de aço sem material de proteção térmica;
- Pré-fabricação sem o uso de formas, no caso do pilar parcialmente revestido.

As principais limitações e desvantagens são:

- Dificuldade nas ligações viga-coluna no local da construção, o que aumenta o custo total da construção;

- A concretagem do pilar metálico aumenta em uma etapa construtiva para a obra se comparada com a utilização de pilares de aço (QUEIROZ e CHAVES, 2000).

2.3.3. DIMENSIONAMENTO DE PILARES MISTOS:

TEMPERATURA AMBIENTE

O método simplificado (analítico) para o dimensionamento do pilar misto em temperatura ambiente é apresentado neste item. O procedimento segue as recomendações do EUROCÓDIGO 4 p1.2 (2005). Como hipóteses básicas, o método simplificado considera:

- Há interação completa entre o aço e o concreto;
- As imperfeições iniciais são consistentes com aquelas adotadas para a determinação da resistência de barras de aço submetidas à compressão axial;
- A flambagem local para a força axial e o momento fletor não pode ser um estado limite último predominante.

As limitações de aplicabilidade do método são:

- Os pilares mistos devem ter dupla simetria e seção transversal constante;
- O concreto deve possuir densidade normal;
- O fator de contribuição do aço, definido como $\delta = \frac{f_y A}{\gamma_{a1} N_{Rd,pl}}$, deve estar compreendido entre os valores 0,2 e 0,9. Se δ for igual ou inferior a 0,2, esse pilar deve ser considerado com um pilar de concreto armado e ser dimensionado de acordo com o correspondente código. No caso de δ ser superior a 0,9 o pilar deve ser dimensionado como pilar de aço;

- O índice de esbeltez relativa λ_0 (que será mostrado posteriormente) deve possuir valor inferior a 2,0;
- A área da seção transversal da armadura deve estar compreendida entre 0,3% a 4% da área de concreto. Valores superiores a 4% podem ser adotados, mas devem ser desconsiderados no cálculo. A ABNT NBR 14323 (1999) estabelece os limites de taxa de armadura entre 1% a 6%; portanto, neste trabalho serão procuradas soluções que atendam às duas normas, ou seja, as taxas de armadura estarão compreendidas entre 1% a 4% da área de concreto, a parcela superior a 4% será desprezada no cálculo em temperatura ambiente;
- A relação entre altura e largura deve estar entre 0,2 e 5,0;
- É estabelecido que a resistência de todos os materiais seja atingida sem que ocorra flambagem local dos elementos componentes do perfil de aço da seção transversal. Para que a flambagem não ocorra, a relação $b_f/t_f \leq \sqrt{E/f_y}$ deve ser atendida.

Nos pilares mistos submetidos à compressão axial e sujeitos à instabilidade por flexão, a força axial resistente é calculada por:

$$N_{Rd} = \chi N_{Rdpl} \quad (2.63)$$

em que N_{Rdpl} é a força normal de plastificação da seção, calculada da seguinte forma:

$$N_{Rdpl} = \frac{f_y A}{\gamma_{a1}} + \frac{0,85 f_{ck} A_c}{\gamma_c} + \frac{f_{ys} A_s}{\gamma_s} \quad (2.64)$$

O fator de redução χ é calculado pela mesma equação mostrada para colunas não mistas (Equação (2.48), no entanto, devem ser feitas as seguintes adaptações:

- Nas seções parcialmente revestidas com concreto, em que a flambagem ocorra em relação ao eixo x, utiliza-se a curva b ($\alpha = 0,34$), e nas seções parcialmente

revestidas com concreto, com instabilidade em relação ao eixo y, utiliza-se a curva c ($\alpha = 0,49$).

- O índice de esbeltez reduzido λ_0 é substituído pelo índice de esbeltez relativo λ_{rel} , sendo esse dado por:

$$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{N_{R,pl}}{N_e}} \quad (2.65)$$

em que $N_{R,pl}$ é o valor de $N_{Rd,pl}$ quando os coeficientes de ponderação da resistência γ_{a1} , γ_s e γ_c são tomados igual a 1,00. N_e é a força axial de flambagem elástica dada por:

$$N_e = \frac{\pi^2 (EI)_e}{(KL)^2} \quad (2.66)$$

Onde $(EI)_e$ é a rigidez efetiva à flexão da seção transversal mista, que é calculada pela expressão:

$$(EI)_e = EI_a + 0,7E_{cr}I_c + E_sI_s \quad (2.67)$$

Os termos ainda não citados dessa expressão são: I_a , I_c , I_s são o momento de inércia do perfil metálico, do concreto não fissurado e das armaduras, respectivamente; E_s é o módulo de elasticidade das armaduras, e E_{cr} é o módulo de elasticidade reduzido do concreto, sendo calculado da seguinte forma:

$$E_{cr} = \frac{E_c}{1 + \varphi_c \left(\frac{N_{Sd,G}}{N_{Sd}} \right)} \quad (2.68)$$

em que: $E_c = 5600f_{ck}^{1/2}$ é o módulo de elasticidade tangente do concreto; φ_c é o coeficiente de fluência do concreto que pode ser tomado, de forma simplificada, como 2,5; $N_{Sd,G}/N_{Sd}$ é a relação entre a força axial solicitante de cálculo para as ações

permanentes e quase permanentes pela força axial solicitante de cálculo, podendo de forma simplificada ser tomada igual a 0,6.

Para as colunas mistas submetidas à flexo-compressão, a ABNT NBR 8800 (2007) apresenta dois modelos simplificados, denominados modelo de cálculo I e II. Este trabalho adota o modelo I, mais simplificado, e que será mostrado a seguir.

No modelo de cálculo I, a verificação dos efeitos combinados de força axial e de momentos fletores é feita de acordo com as Equações 2.52 e 2.53, sendo feitas as seguintes considerações:

- N_{Rd} é calculado como está mostrado na Equação 2.63;
- M_{Rd} , o momento resistente, é dado por $M_{Rd,pl}$, momento resistente de plastificação, em relação ao eixo x ou ao eixo y ($M_{Rd,pl,x}$ e $M_{Rd,pl,y}$, respectivamente) que pode ser calculado por:

$$M_{Rd,pl} = \frac{f_y}{\gamma_{a1}} (Z_a - Z_{an}) + 0,5 \frac{0,85 f_{ck}}{\gamma_c} (Z_c - Z_{cn}) + \frac{f_{ys}}{\gamma_s} (Z_s - Z_{sn}) \quad (2.69)$$

em que: Z_a é módulo de resistência plástica da seção do perfil; $Z_s = \sum_{i=1}^n |A_{si} e_i|$ é o módulo de resistência plástico da seção da armadura do concreto, em que e_i é a distância do eixo da barra da armadura de área A_{si} ao eixo de simetria de interesse;

$$Z_c = \frac{b_c h_c^2}{4} - Z_a - Z_s \text{ e } Z_c = \frac{h_c b_c^2}{4} - Z_a - Z_s$$

é o módulo de resistência plástico da seção de concreto, considerado não fissurado, para a flexão nos eixos x e y, respectivamente; Z_{an} , Z_{cn} e Z_{sn} são módulos de resistência plásticos que serão definidos a seguir, para as situações de flexão em relação aos eixos x e y.

- Flexão em relação ao eixo x:

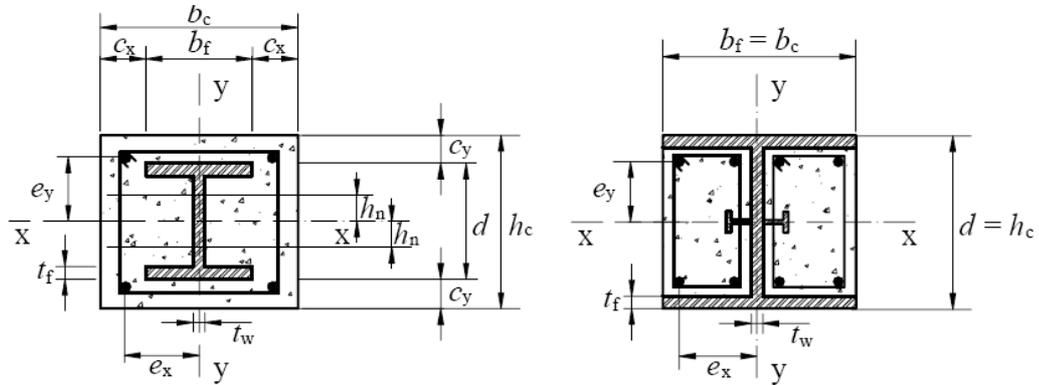


Figura 2.37 – Seção I ou H fletida em relação ao eixo x - ABNT NBR 8800 (2007).

Para o caso da linha neutra plástica estar na alma do perfil de aço ($h_n \leq d/2 - t_f$):

$$h_n = \frac{A_c \frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c} - A_{sn} \left(2 \frac{f_{ys}}{\gamma_s} - \frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c} \right)}{2b_c \frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c} + 2t_w \left(2 \frac{f_y}{\gamma_{a1}} - \frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c} \right)} \quad (2.70)$$

$$Z_{an} = t_w h_n^2 \quad (2.71)$$

$$Z_{sn} = \sum_{i=1}^n |A_{sni} e_{yi}| \quad (2.72)$$

$$Z_{cn} = b_c h_n^2 - Z_{an} - Z_{sn} \quad (2.73)$$

em que: A_{sn} é a soma das áreas das barras da armadura na região de altura $2h_n$ (Figura 2.37);

A_{sni} é a área de cada barra da armadura na região de altura $2h_n$; e_{yi} é a distância do eixo da barra da armadura ao eixo x.

Para a linha neutra plástica na mesa do perfil de aço ($d/2 - t_f \leq h_n \leq d/2$):

$$h_n = \frac{A_c \frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c} - A_{sn} \left(2 \frac{f_{ys}}{\gamma_s} - \frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c} \right) + (b_f - t_w)(d - 2t_f) \left(2 \frac{f_y}{\gamma_{a1}} - \frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c} \right)}{2b_c \frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c} + 2b_f \left(2 \frac{f_y}{\gamma_{a1}} - \frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c} \right)} \quad (2.74)$$

$$Z_{an} = b_f h_n^2 - \frac{(b_f - t_w)(d - 2t_f)^2}{4} \quad (2.75)$$

Z_{sn} e Z_{cn} são calculados conforme as Equações 2.72 e 2.73.

- Flexão em relação ao eixo y:

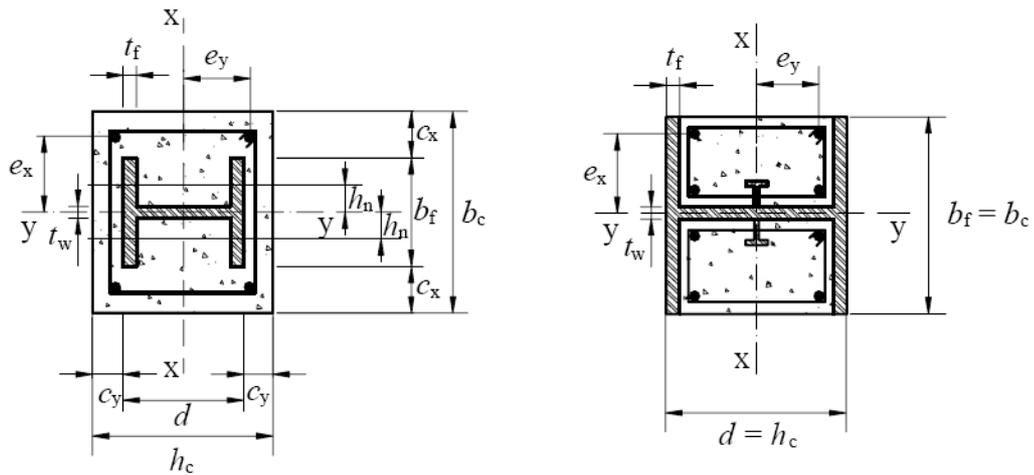


Figura 2.38 - Seção I ou H fletida em relação ao eixo y - ABNT NBR 8800 (2007).

Para o caso da linha neutra plástica estar na alma do perfil de aço ($h_n \leq t_w/2$):

$$h_n = \frac{A_c \frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c} - A_{sn} \left(2 \frac{f_{ys}}{\gamma_s} - \frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c} \right)}{2h_c \frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c} + 2d \left(2 \frac{f_y}{\gamma_{a1}} - \frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c} \right)} \quad (2.76)$$

$$Z_{an} = d h_n^2 \quad (2.77)$$

$$Z_{sn} = \sum_{i=1}^n |A_{sni} e_{xi}| \quad (2.78)$$

$$Z_{cn} = h_c h_n^2 - Z_{an} - Z_{sn} \quad (2.79)$$

Sendo e_{xi} a distância do eixo da barra da armadura ao eixo y e os demais parâmetros já definidos anteriormente.

Para o caso da linha neutra plástica estar na mesa do perfil de aço ($t_w/2 < h_n < b_f/2$):

$$h_n = \frac{A_c \frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c} - A_{sn} \left(2 \frac{f_{ys}}{\gamma_s} - \frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c} \right) + t_w(2t_f - d) \left(2 \frac{f_y}{\gamma_{a1}} - \frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c} \right)}{2h_c \frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c} + 4t_f \left(2 \frac{f_y}{\gamma_{a1}} - \frac{0,85f_{ck}}{\gamma_c} \right)} \quad (2.80)$$

$$Z_{an} = 2t_f h_n^2 + \frac{(d - 2t_f)t_w^2}{4} \quad (2.81)$$

Z_{sn} e Z_{cn} são calculados conforme as Equações 2.78 e 2.79.

2.3.4. DIMENSIONAMENTO DE PILARES MISTOS: SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

O método analítico (simplificado) para o dimensionamento de pilares mistos parcialmente concretados em situação de incêndio adotado pela ABNT NBR 14323 (1999) é o mesmo proposto pelo EUROCÓDIGO 4 p1.2 (2005). A metodologia é válida desde que sejam cumpridas as seguintes premissas:

- Altura da seção transversal $d_c = d$ variando de 230 mm a 1100 mm;
- Largura da seção transversal $b_c = b_f$ variando de 230 mm a 500 mm;
- Porcentagem de armadura variando de 1% a 6%;
- Para TRRF igual ou superior a 90 minutos, as dimensões b_c e d_c devem ser maiores ou iguais a 300 mm;
- O comprimento de flambagem em situação de incêndio deve ser inferior ou igual a $13,5 b_c$, mas nunca maior que $10 b_c$ quando:
 - TRRF for inferior a 90 minutos, com $230 \text{ mm} \leq b_c \leq 300 \text{ mm}$ ou $d_c/b_c > 3$;

- TRRF igual ou superior a 90 minutos, com $d/b_c > 3$.

A força normal resistente de cálculo é calculada pela seguinte expressão:

$$N_{Rd,fi} = \chi_{fi} N_{fi,pl,Rd} \quad (2.82)$$

em que χ_{fi} é o fator de redução associado à curva de resistência à compressão c da EUROCÓDIGO 3 p1.1 (2005), e calculado com o índice de esbeltez reduzido $\lambda_{0,\theta}$, mostrado a seguir:

$$\lambda_{0,\theta} = \sqrt{\frac{N_{fi,pl,Rd}}{N_{fi,cr}}} \quad (2.83)$$

$N_{fi,pl,Rd}$ é a força normal de plastificação de cálculo em situação de incêndio e $N_{fi,cr}$ é a carga de flambagem de Euler, para esse caso também denominada carga elástica crítica em situação de incêndio. A força normal de plastificação de cálculo em situação de incêndio é dada por:

$$N_{fi,pl,Rd} = N_{fi,pl,Rd,f} + N_{fi,pl,Rd,w} + N_{fi,pl,Rd,c} + N_{fi,pl,Rd,s} \quad (2.84)$$

em que: $N_{fi,pl,Rd,f}$, $N_{fi,pl,Rd,w}$, $N_{fi,pl,Rd,c}$, $N_{fi,pl,Rd,s}$ são a força normal de plastificação para as duas mesas do perfil, para a alma, para o concreto e para as armaduras, respectivamente. O procedimento para o cálculo desses quatro componentes será mostrado a seguir, e são obtidos para a seção reduzida mostrada na Figura 2.39.

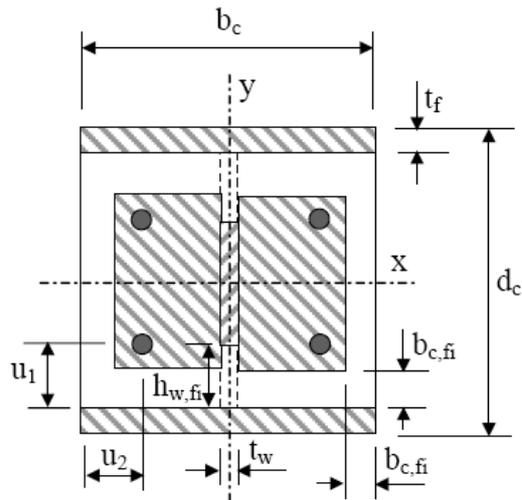


Figura 2.39 – Seção transversal reduzida para o cálculo em situação de incêndio - ABNT NBR 14323 (1999).

- Mesa do perfil de aço: A temperatura média nas mesas do perfil de aço ($\theta_{f,t}$) é obtida com a expressão:

$$\theta_{f,t} = \theta_{o,t} + k_t \left(\frac{u}{A} \right) \quad (2.85)$$

em que:

t é o tempo requerido de resistência ao fogo, em minutos;

$u = 2(d + b_f)$, em metro;

$V = db_f$, em metro quadrado;

$\theta_{o,t}$ é a temperatura inicial em grau Celsius dada na Tabela 2.13;

k_t é um coeficiente empírico dado na Tabela 2.13.

Tabela 2.13 – Temperatura inicial e coeficiente empírico k_t para a determinação da temperatura média nas mesas do perfil.

Tempo requerido de resistência ao fogo (minuto)	$\theta_{o,t}$ [°C]	k_t [m°C]
30	550	9,65
60	680	9,55
90	805	6,15
120	900	4,65

De posse da temperatura média pode-se obter, para as mesas, os fatores de redução da resistência ao escoamento (k_{y,θ_f}) e do módulo de elasticidade do aço (k_{E,θ_f}), como foi mostrado em 2.1.2.1, e assim, calcular a força normal de plastificação, bem como a rigidez à flexão efetiva $(EI)_{fi,eff}$.

$$N_{fi,pl,Rd,f} = 2b_f t_f k_{y,\theta_f} f_y \quad (2.86)$$

$$(EI)_{fi,eff} = \frac{k_{E,\theta_f} E t_f b_f^3}{6} \quad (2.87)$$

- Alma do perfil de aço: assim como no procedimento proposto para as vigas mistas com concreto, uma parte da alma do perfil de aço de altura $h_{w,fi}$, a partir da face interna das duas mesas (Figura 2.39), deve ser desprezada. O valor dessa altura é dado por:

$$h_{w,fi} = 0,5(d - 2t_f) \left(1 - \sqrt{1 - 0,16 \left(\frac{H_t}{d}\right)}\right) \quad (2.88)$$

H_t é um parâmetro em que varia com o TRRF, como mostra a Tabela 2.14.

Tabela 2.14 – Valor de H_t para a determinação de $h_{w,fi}$. - ABNT NBR 14323 (1999).

Tempo requerido de resistência ao fogo (minuto)	H_t [mm]
30	350
60	770
90	1100
120	1250

A força normal de plastificação e a rigidez efetiva são calculadas da seguinte forma:

$$N_{fi,pl,Rd,w} = t_w (d - 2t_f - 2h_{w,fi}) \sqrt{1 - 0,16 \left(\frac{H_t}{d}\right)} f_y \quad (2.89)$$

$$(EI)_{fi,eff,w} = \frac{E(d - 2t_f - 2h_{w,fi})t_w^3}{12} \quad (2.90)$$

- Concreto entre as mesas: Uma camada externa do concreto de espessura $b_{c,fi}$ (Figura 2.39), que ficaria diretamente exposta ao fogo, é desprezada. O valor de tal espessura varia de acordo com o TRRF e com o fator de massividade da seção mista (Equação 2.91),

Tabela 2.15 – Espessura da camada externa a ser desprezada no cálculo.

Tempo requerido de resistência ao fogo (minuto)	$b_{c,fi}$ [mm]
30	4,0
60	15,0
90	$0,5 (u/A)_p + 22,5$
120	$2,0 (u/A)_p + 24,0$

$$(u/A)_p = \frac{d + b_f}{db_f} \quad (2.91)$$

O concreto que não é desprezado tem sua resistência característica à compressão e o módulo de elasticidade reduzidos pelos fatores de redução apresentados em 2.1.2.1, considerando-se uma temperatura média ($\theta_{c,t}$) que é obtida pela Tabela 2.16.

Tabela 2.16 – Temperatura media para o concreto.

30		60		90		120	
$(u/A)_p$ [m ⁻¹]	$\theta_{c,t}$ [°C]						
4	136	4	214	4	256	4	265
23	300	9	300	6	300	5	300
46	400	21	400	13	400	9	400
-	-	50	600	33	600	23	600
-	-	-	-	54	800	38	800
-	-	-	-	-	-	41	900
-	-	-	-	-	-	43	1000

Na Tabela 2.16, valores intermediários do fator de massividade são interpolados linearmente.

A força normal de plastificação e a rigidez efetiva são, então, calculadas com as equações apresentadas a seguir:

$$N_{fi,pl,Rd,c} = 0,86[(d - 2t_f - 2b_{c,fi})(b_f - t_w - 2b_{c,fi}) - A_s]k_{c,\theta}f_{ck} \quad (2.92)$$

$$(EI)_{fi,ef,c} = k_{Ec,\theta}E_c\left\{\left[(d - 2t_f - 2b_{c,fi})\frac{(b_f - 2b_{c,fi})^3 - t_w^3}{12}\right] - I_s\right\} \quad (2.93)$$

0,86 é um fator empírico de ajuste e I_s é o momento de inércia das barras da armadura com relação ao eixo de menor inércia da seção mista.

- Armadura longitudinal: os fatores de redução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade do aço são obtidos por meio das Tabelas 2.17 e 2.18, e dependem, além do TRRF, da média geométrica u_{sm} das distâncias dos eixos das barras até as faces externas do concreto, como será mostrado a seguir:

- Se $(u_1 - u_2)$ for superior a 10 mm : $u_{sm} = [u_2(u_2 + 10)]^{1/2}$
- Se $(u_2 - u_1)$ for superior a 10 mm : $u_{sm} = [u_1(u_1 + 10)]^{1/2}$

em que: u_1 é a distância, em milímetro, do eixo da barra da armadura à face interna da mesa do perfil metálico, e u_2 é a distância, em milímetros, do eixo da barra da armadura à superfície externa do concreto.

Tabela 2.17 – Fator de redução $k_{ys,\theta}$ para a resistência ao escoamento do aço das armaduras - ABNT NBR 14323 (1999).

TRRF (minutos)	u_{sm} (mm)				
	40	45	50	55	60
30	1	1	1	1	1
60	0,789	0,883	0,976	1	1
90	0,314	0,434	0,572	0,696	0,822
120	0,170	0,223	0,288	0,367	0,436

Tabela 2.18 - Fator de redução $k_{E_s,\theta}$ para o módulo de elasticidade do aço das armaduras - ABNT NBR 14323 (1999).

TRRF (minutos)	u_{sm} (mm)				
	40	45	50	55	60
30	0,830	0,865	0,888	0,914	0,935
60	0,604	0,647	0,689	0,729	0,763
90	0,193	0,283	0,406	0,522	0,619
120	0,110	0,128	0,173	0,233	0,285

Os valores da força normal de plastificação de cálculo e da rigidez efetiva da armadura em situação de incêndio são dados por:

$$N_{fi,pl,Rd,s} = A_s k_{ys,\theta} f_{ys} \quad (2.94)$$

$$(EI)_{fi,ef,c} = k_{E_s,\theta} E_s I_s \quad (2.95)$$

Com a força axial de plastificação e a rigidez efetiva em situação de incêndio para todas as quatro partes, pode-se calcular a força total de plastificação por meio da Equação 2.84, e a rigidez efetiva total é dada por:

$$\begin{aligned} (EI)_{fi,ef} = & \varphi_{f,\theta} (EI)_{fi,ef,f} + \varphi_{w,\theta} (EI)_{fi,ef,w} + \varphi_{c,\theta} (EI)_{fi,ef,c} \\ & + \varphi_{s,\theta} (EI)_{fi,ef,s} \end{aligned} \quad (2.96)$$

$\varphi_{i,\theta}$ é o coeficiente de redução que depende dos efeitos das tensões térmicas, sendo dado pela tabela a seguir:

Tabela 2.19 – Coeficiente de redução $\varphi_{i,\theta}$.

Tempo requerido de resistência ao fogo (minuto)	Mesa do perfil $\varphi_{f,\theta}$	Alma do perfil $\varphi_{w,\theta}$	Concreto $\varphi_{c,\theta}$	Armadura $\varphi_{s,\theta}$
30	1,0	1,0	0,8	1,0
60	0,9	1,0	0,8	0,9
90	0,8	1,0	0,8	0,8
120	1,0	1,0	0,8	1,0

Calculada a rigidez efetiva, pode-se calcular a força axial de flambagem elástica:

$$N_{fi,cr} = \frac{\pi^2 (EI)_{fi,ef}}{L_{fi,\theta}^2} \quad (2.97)$$

em que de $L_{fi,\theta}$ é o comprimento de flambagem do pilar em situação de incêndio, e, como foi citado na metodologia da coluna não-mista, pode-se, nos pórticos de múltiplos andares, considerar a rotação impedida nos extremos dos pilares dos pavimentos acima e abaixo do compartimento em incêndio.

No caso do pilar submetido à força excêntrica (ou momentos fletores) de excentricidade μ , essa deve permanecer dentro da seção transversal da seção mista. A força normal resistente de cálculo $N_{fi,Rd,\mu}$ com excentricidade é calculada pela expressão:

$$N_{fi,Rd,\mu} = N_{fi,Rd} \left(\frac{N_{Rd,\mu}}{N_{Rd}} \right) \quad (2.98)$$

em que N_{Rd} e $N_{Rd,\mu}$ representam a força normal de compressão centrada resistente de cálculo e a força normal resistente de cálculo no caso de força excêntrica.

Os cálculos simplificados propostos pela ABNT NBR 8800 (2007) e pelo EUROCÓDIGO 4 p1.2 (2005) são válidos desde que sejam obedecidas as seguintes disposições construtivas:

- O concreto entre as mesas do perfil de aço deve ser ligado à alma por meio de estribos soldados na alma do perfil ou penetrando na alma através de furos e abraçando as barras da armadura longitudinal posicionadas de ambos os lados da alma ou por meio de estribos ou conectores de cisalhamento pino com cabeça soldados na alma do perfil;
- O espaçamento entre os estribos ao longo do comprimento do pilar não pode exceder de 500 mm;

O mesmo perfil do exemplo anterior (W360x122, ASTM A572 gr. 50) será agora analisado com concreto ($f_{ck} = 20$ MPa) entre as mesas. Serão utilizados estribos de 6.3

mm soldados no perfil e, com cobrimento de 30 mm para a face do concreto nas duas direções, os estribos irão posicionar as 4 barras de 16 mm ($f_{ys} = 500$ MPa) nos cantos. Os resultados são apresentados pelos gráficos da força axial resistente *versus* o comprimento de flambagem, para TRRFs iguais a 0, 30, 60 e 90 minutos.

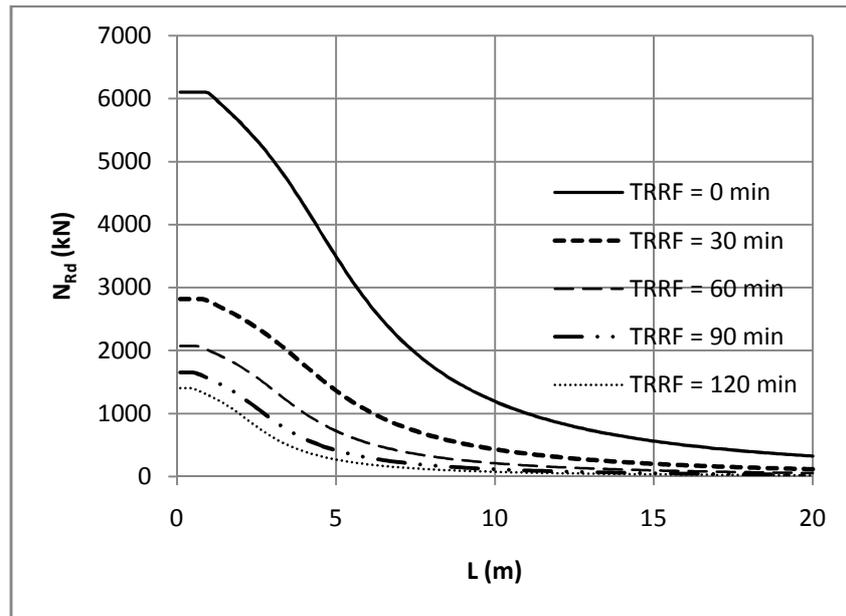


Figura 2.40 - Força normal resistente *versus* comprimento do pilar misto.

Comparadas as Figuras 2.40 e 2.33, pode-se observar o ganho na capacidade resistente propiciado pelo concreto armado entre as mesas. Vale ressaltar que, diferentemente das vigas mistas com concreto entre as mesas, submetidas a momentos fletores positivos, em que a posição da linha neutra, em geral fica mais próxima à laje de concreto e o concreto tracionado entre as mesas é desprezado no cálculo, no caso de pilares mistos sob compressão centrada, o concreto comprimido participa ativamente do aumento da capacidade resistente. Em situação de incêndio, nota-se que a redução da força axial resistente é bem mais branda, com o pilar resistindo a esforços significativos. Outro fato observado é que, à medida que o TRRF vai aumentando, as

curvas tendem a aproximar-se, o que indica que, para TRRFs altos, a escolha por colunas com materiais de proteção térmica com boas características de isolamento se torna mais atrativa.

3

OTIMIZAÇÃO

Um problema de otimização consiste em extremizar uma função, ou seja, determinar um conjunto de variáveis das quais a função é dependente, de modo a encontrar seu valor máximo ou mínimo. A aplicação de otimização em engenharia tem um vasto campo de aplicação e vem sendo amplamente estudada e utilizada nas últimas décadas, principalmente com o avanço tecnológico dos computadores digitais.

Na engenharia estrutural, os problemas possuem basicamente três características principais: a solução procurada é global, as variáveis de projeto são discretas e os problemas sempre têm algum tipo de restrição. A técnica de otimização utilizada neste trabalho é denominada de Método dos Algoritmos Genéticos (AG), que tem sua base na proposta originalmente desenvolvida por John Holland na Universidade de Michigan (HOLLAND, 1975). Essa técnica inspira-se nos mecanismos de evolução de populações de seres vivos, elaborada por Darwin em 1859, em que no processo de evolução os indivíduos mais aptos sobrevivem, e assim são mais capazes de transmitir suas características para geração seguinte. As características que tornam o uso dos AGs atrativos para a solução de problemas na engenharia estrutural são: possuem uma capacidade maior de busca do ponto ótimo global, fornecem soluções efetivas para problemas discretos de otimização e podem ser modificados de modo a incorporar as restrições ao problema.

3.1 CONCEITOS BÁSICOS PARA A OTIMIZAÇÃO

Um problema de otimização pode ser escrito da seguinte forma:

- Encontrar o conjunto de variáveis de projeto: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$
- Que minimizam (ou maximizam) a função objetivo: $f = f(x)$
- Atendendo às seguintes restrições:
 - De comportamento: $g_j(x) \geq 0$ ($j = 1, 2, \dots, J$); $h_k(x) = 0$ ($k = 1, 2, \dots, K$)
 - No espaço de busca: $x_i^L \leq x_i \leq x_i^U$ ($i = 1, 2, \dots, N$)

Os termos, comuns em todos os trabalhos sobre otimização são: variáveis de projeto, função objetivo, restrições de comportamento e no espaço de busca, e serão definidos a seguir.

- Função objetivo: a função objetivo é a função a ser extremizada, determinada pelas variáveis de projeto. São classificadas como unidimensional, no caso de ser função de apenas uma variável, ou multidimensional, quando há mais de uma variável. Nos problemas mais comuns de otimização em engenharia estrutural, podem-se encontrar funções objetivos que definem o peso total de uma estrutura metálica, a energia de deformação da estrutura, as frequências naturais em problemas de dinâmica, o calor de hidratação em problemas de concreto em massa, dentre outros.
- Variáveis de projeto: as variáveis de projeto são aquelas que se alteram durante o processo de otimização que determina a função objetivo, podendo ser contínuas, inteiras ou, no caso de interesse deste trabalho, discretas (valores pertencentes a algum conjunto fixo). Geralmente, em problemas de engenharia de estruturas, estão associadas à geometria da estrutura, à topologia dos

- elementos que a compõem, ao tipo de material utilizado e às suas propriedades físicas e mecânicas.
- Restrições: as restrições representam limites que devem ser atendidos no projeto por meio de funções de igualdade ou de desigualdade. Podem ser divididas em restrições de comportamento, quando se impõem limites às tensões, ao espaço físico, às imposições normativas, dentre outros, e restrições no espaço de busca (restrições laterais) aplicadas sobre as variáveis de projeto, mantendo-as dentro de limites compatíveis com a realidade, como valores mínimos e máximos para dimensões em elementos estruturais, propriedades do material, etc.
 - Espaço de busca ou região viável: é o conjunto, espaço ou região constituído de todas as soluções admissíveis para o problema. Assim, o espaço de busca compreende todas as combinações possíveis das variáveis de projeto que atendem às funções de restrição.
 - Ponto ótimo, Valor ótimo e Solução ótima: ponto ótimo é o ponto, caracterizado pelo vetor $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, formado pelas variáveis de projeto, o qual extremiza a função objetivo. Valor ótimo é o valor da função objetivo $f(x)$ no ponto ótimo. Solução ótima é o par de soluções formado pelo ponto ótimo e o valor ótimo $[x, f(x)]$, podendo representar uma solução local ou global. O par de soluções pode ser classificado como solução restringida, quando atende a todas as restrições, ou não-restringida, quando alguma das restrições é violada.

3.2 ALGORITMOS GENÉTICOS (AGs)

Os algoritmos genéticos podem ser compreendidos como algoritmos que trabalham com estruturas computacionais, representando soluções potenciais, avaliando sua aptidão, de modo que essas evoluam buscando melhorar a adequação média dos

indivíduos da população e encontrar o indivíduo mais apto, que será a solução ótima do problema.

As principais vantagens dos algoritmos genéticos em relação às outras técnicas de otimização são:

- Trabalham com uma codificação para as potenciais soluções e não com elas mesmas;
- A busca se dá em uma população de soluções e não em uma única solução;
- Podem-se separar os melhores indivíduos obtidos em todo o processo, ranqueando-os e com isso se cria a possibilidade de escolha da solução adotada que, apesar de não ser a ótima global pode ser a melhor dentro de um determinado contexto;
- Utilizam informações da função objetivo, não necessitando de derivadas da mesma nem das funções de restrição;
- Utilizam transições probabilísticas entre conjuntos de soluções, ou seja, não utilizam regras determinísticas;
- São de fácil implementação, possibilitam uma grande flexibilidade em relação ao tratamento da função objetivo e apresentam um bom desempenho para uma grande escala de problemas;
- Diminuem o risco de apresentar como solução um extremo local;
- As variáveis de projeto podem ser variáveis reais, lógicas e inteiras, ou até mesmo mais de um tipo de variável para o mesmo vetor.

Como principais desvantagens citam-se:

- Nos casos em que a avaliação da função objetivo requeira um elevado custo computacional, esse método pode ser proibitivo, uma vez que existe a

necessidade de um grande número de avaliações da função objetivo para a sua extremização;

- Dificuldade para achar o ótimo global exato;
- Muitas possibilidades de configurações que podem complicar a resolução do problema tratado.

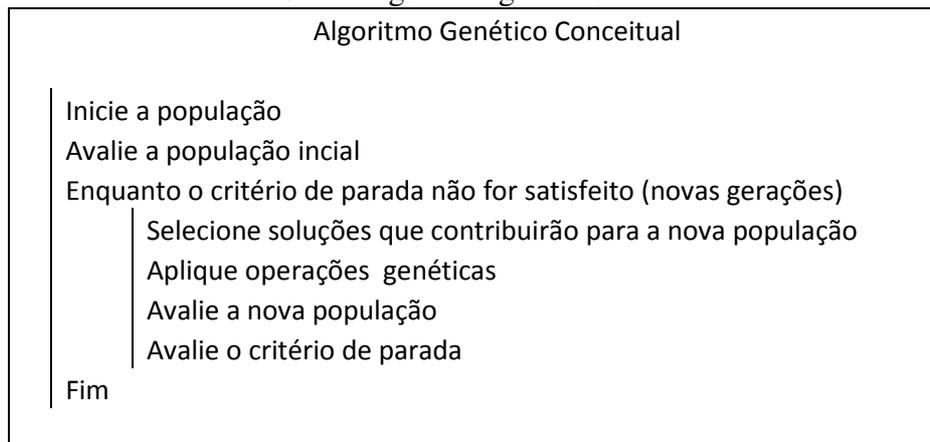
Algumas definições básicas, necessárias para o entendimento do método, são apresentadas a seguir. Devido a influências na criação do método dos algoritmos genéticos, tais definições fazem referências à biologia.

- Cromossomo: seqüência ou cadeia de símbolos (0010101, ABSDE, 324512), em que o símbolo representa uma informação relativa às variáveis de projeto do problema. O cromossomo é a estrutura associada a uma determinada solução do problema. Esse tipo de estrutura é comum aos algoritmos de programação e a estratégias evolucionárias;
- Gen ou Gene: é a unidade básica do cromossomo representada por um símbolo. Cada cromossomo tem um certo número de gens, que define uma certa variável do problema.
- Alelo: cada símbolo, presente no alfabeto utilizado para decodificação;
- Locus: posição de um gene no cromossomo;
- Genótipo: conjunto de genes de um indivíduo;
- Fenótipo: conjunto das características de um indivíduo determinada pelo genótipo;
- Indivíduo: cada conjunto candidato à solução do problema, representado por uma estrutura do tipo do cromossomo;
- População: conjunto de indivíduos em uma geração;

- Geração: cada passo do processo evolutivo, isto é, o ciclo de criação e transformação de uma população, representada pelo número da iteração executada pelo AG.
- Operações genéticas: operações realizadas sobre as estruturas de cromossomos que simulam sua recombinação e mutação, com o objetivo de promover a evolução do indivíduo;
- Aptidão: valor que indica a aptidão do indivíduo para solucionar o problema. Contém a informação numérica do desempenho de cada indivíduo da população e está associado à função objetivo e às restrições do problema. É pela da avaliação da aptidão de cada indivíduo que é possível selecionar os melhores indivíduos de cada população para a aplicação das operações genéticas, e assim promover a evolução da solução.

A forma como os algoritmos genéticos são estruturados podem ser diversas, distinguindo-se umas das outras no processo de criação de novas populações, nas operações genéticas utilizadas, na avaliação da aptidão, dentre outras. A estrutura básica, comum a todos os AGs, denominado algoritmo genético conceitual (BARBOSA, 1997) é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Algoritmo genético conceitual.



O processo de reprodução e de criação de novas populações pode dar-se de diversas maneiras, podendo-se citar como extremos:

- Algoritmo genético geracional: toda a população é substituída por novos indivíduos gerados nos processos de seleção e recombinação. Para evitar a perda de indivíduos com boa aptidão no processo, é comum utilizar em conjunto com esse tipo de algoritmo uma técnica denominada de elitismo, que consiste em copiar os melhores indivíduos para a geração seguinte. Assim, fica garantida uma evolução monotônica da geração para a aptidão do melhor indivíduo;
- Algoritmo genético *steady-state*: apenas um indivíduo é criado de cada vez. Posteriormente ele é avaliado, e só será inserido na população se for mais apto que algum dos indivíduos já existentes, substituindo o pior de todos.

A representação das variáveis de projeto através dos genes que irão compor os cromossomos, deve ser simplificada de modo a facilitar o desempenho da busca da melhor solução. A codificação é fundamental e deve representar cada cromossomo de forma compatível com os operadores genéticos, procurando descrever o espaço de

busca relevante do problema e evitando redundância na representação. A forma mais comum de codificação são os números binários, que podem representar números inteiros e reais. A codificação binária consiste em representar cada indivíduo e apresenta as seguintes vantagens: facilidade para a criação e manipulação dos gens, os operadores genéticos são de fácil aplicação e a decodificação numérica é simplificada.

Cada possível solução, isto é, cada combinação das variáveis de projeto é representada por um cromossomo formado pela justaposição das variáveis de projeto codificadas. Para variáveis de projeto discretas, observa-se que o número total de possíveis valores não necessariamente é uma potência de dois, havendo normalmente a necessidade de utilizar algum tipo de interpolação para contornar o problema.

A geração da população inicial geralmente é feita de modo aleatório, de preferência, a fim de garantir a diversidade dos indivíduos. Em casos especiais, podem-se acrescentar alguns indivíduos que tenham boa aptidão, ou refazer a otimização, partindo-se de uma população inicial que contenha os melhores indivíduos da última otimização, o que, no entanto, pode aumentar consideravelmente o custo computacional.

O tamanho da população inicial N_p indica o número de indivíduos em cada população. Normalmente adota-se esse número, que permanece constante durante a evolução, mas pode-se empregar também algoritmos em que o tamanho vá sendo reduzido à medida que a otimização vai progredindo, para assim reduzir o tempo de processamento. Esse trabalho segue a linha mais comum, em que o tamanho da população é relacionado com o tamanho do cromossomo. Utiliza populações maiores para cromossomos maiores, e assim, garante uma alta diversidade.

A partir dos esquemas de seleção, são escolhidos os melhores indivíduos, ou seja, dos indivíduos que deverão reproduzir-se para dar origem aos indivíduos da próxima geração, o que faz com que essa tenha uma melhor aptidão média em relação à anterior. Os esquemas de seleção baseiam-se no fato de que melhores indivíduos produzem descendentes melhores e de que existe uma correlação entre a aptidão dos pais e a dos filhos (hereditariedade), e, portanto, os melhores indivíduos devem ser selecionados para reproduzir.

Dentre os processos de seleção encontrados na literatura podem ser citados: o método de seleção proporcional da aptidão via método da roleta (HOLLAND, 1975); o método de seleção estocástica remanescente sem substituição; o método de seleção por ordenação e o método de seleção por torneio. Este último foi o utilizado neste trabalho e consiste em promover um torneio entre N_t indivíduos, com $N_t > 2$, escolhidos aleatoriamente na população, e o melhor indivíduo é escolhido para a reprodução. Esse método apresenta as vantagens de evitar a convergência prematura, combater a estagnação, ser de fácil implementação e levar a bons resultados (BLICKLE, 1996).

A combinação do material genético dos indivíduos mais aptos se dá por reprodução (ou cruzamento). Indivíduos novos são criados com características próximas às dos seus “pais”. Busca-se, assim, criar um indivíduo com uma melhor combinação das variáveis de projeto, dentro de um processo natural de evolução. É definida uma probabilidade de cruzamento, P_c , que representa a probabilidade de os indivíduos selecionados cruzarem e trocarem material genético. Probabilidades de cruzamento maiores permitem que sejam introduzidos mais indivíduos com uma maior diversidade; no entanto, isso pode resultar na perda de indivíduos com boas aptidões. Recomendam-se valores de P_c entre 0,5 e 0,95 (CASTRO, 2001).

Os operadores genéticos são responsáveis pelas operações necessárias à modificação e à criação de indivíduos com as informações genéticas de seus pais. Usualmente, existem dois tipos:

- Operadores de recombinação (ou *crossover*): cria novos indivíduos a partir da troca de informações genéticas dos progenitores em um ou mais pontos, selecionados aleatoriamente. As formas mais comuns utilizadas são:
 - Troca em um ponto: um ponto de cruzamento é escolhido aleatoriamente e, a partir dele, são trocadas as informações genéticas dos pais (Figura 3.1).

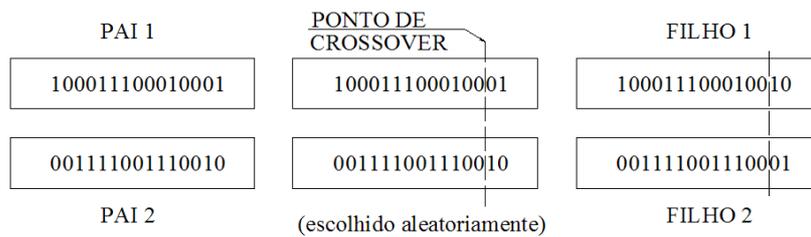


Figura 3.1 – Troca em um ponto.

- Troca em multipontos: São utilizados vários pontos de cruzamento (Figura 3.2).

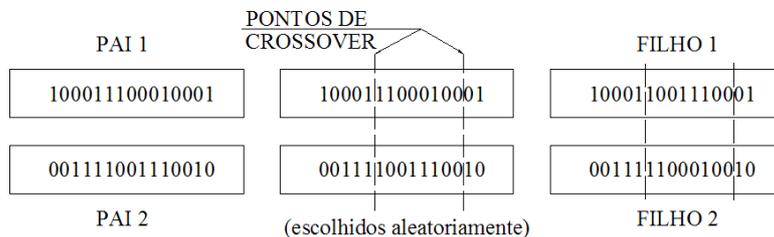


Figura 3.2 – Troca em mais de um ponto.

- Uniforme: não utiliza pontos de cruzamento, mas determina por meio de um parâmetro global qual a probabilidade de cada variável ser trocada (CASTRO, 2001).
- Operadores de mutação: esses operadores são usados para evitar que o processo de evolução se restrinja a um grupo de cromossomos próximos, o que poderia levar a um ponto ótimo local, para manter a diversidade genética da população e recuperar o material genético perdido durante a evolução das gerações. Basicamente, esse operador troca um alelo de um gen por outro alelo arbitrário do alfabeto utilizado na codificação do problema. Pode-se ver um exemplo disso na Figura 3.3, para um caso de codificação binária.

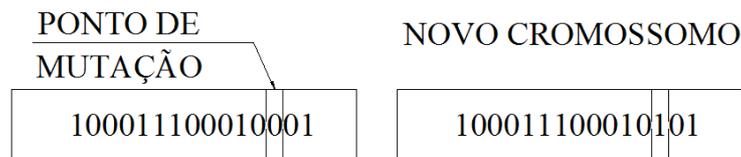


Figura 3.3 – Mutação de um ponto.

Os operadores de mutação costumam ser aplicados em cada gen do indivíduo com uma probabilidade de mutação P_m . Os valores recomendados para a probabilidade de mutação baseiam-se no tamanho dos cromossomos e das populações (CASTRO, 2001); no entanto, a taxa ideal dependerá da aplicação a ser resolvida e da forma de aplicação do operador, geralmente variando entre 0,001 e 0,1 (SHAFFER, 2003), que são valores pequenos e também observados na natureza por se tratar de um operador genético secundário.

Podem-se definir diversos critérios de parada para o otimizador. Os mais comuns serão mostrados a seguir, e que também podem ser combinados entre si:

- Número fixo de gerações: é limitado previamente o número de gerações que serão avaliadas;
- Estagnação: quando não se observa nenhuma melhoria no valor da aptidão do melhor indivíduo;
- Solução satisfatória: determina-se previamente um valor mínimo para a função de aptidão e, caso esse valor seja encontrado, considera-se que o conjunto de variáveis que determinam esse valor para a função de aptidão é a solução do problema e interrompe-se o processo evolutivo;
- Tempo de processamento: a otimização é interrompida quando o tempo de processamento ultrapassa um limite preestabelecido.

As restrições são aplicadas como funções de penalização que combinam as restrições com a função objetivo, fazendo com que os indivíduos que não atendam a alguma restrição, ou seja, não sejam aptos, tenham sua probabilidade de ser selecionados para a reprodução reduzida (ou excluída). Algumas formas de aplicação de penalizações podem ser vistas nos trabalhos de COELLO (2000) e NANAKORN (2001).

3.3 APLICAÇÃO DO AG NA OTIMIZAÇÃO DO CUSTO DE ELEMENTOS METÁLICOS E MISTOS

Neste item será apresentada a metodologia utilizada neste trabalho para a otimização do custo dos elementos metálicos e mistos em temperatura ambiente e em

incêndio, utilizando os algoritmos genéticos (3.3.1 e 3.3.2). O item 3.3.3 mostra o AG utilizado.

3.3.1 VIGAS

A Tabela 3.2 apresenta a formulação clássica do problema de otimização, comparando-o com a formulação para a minimização do custo das vigas mistas de alma cheia (VMAC) e das vigas mistas com concreto entre as mesas (VMCC) submetidas a momento fletor positivo em temperatura ambiente e em incêndio. A Figura 3.4 apresenta as variáveis de projeto para ambos os casos.

Tabela 3.2 – Formulação do problema de otimização da viga mista.

Formulação Clássica	VMAC	VMCC
<p>Minimize (ou maximize): $f = f(x)$</p>	<p>$f(x)$ é o custo da seção x é o vetor das variáveis de projeto: - x_1: perfil de aço; - x_5: espessura do material de proteção.</p>	<p>$f(x)$ é o custo da seção x é o vetor das variáveis de projeto: - x_1: perfil de aço; - x_2: diâmetro da armação; - x_3 e x_4: definem o posicionamento da armadura na horizontal e na vertical, respectivamente.</p>
<p>Sujeito às restrições: $g_j(x) \leq 0$ ($j = 1, 2, \dots, J$) $h_k(x) = 0$ ($k = 1, 2, \dots, K$) $x_i^l \leq x_i \leq x_i^u$ ($i = 1, 2, \dots, n$)</p>	<p>As restrições são: $M_{Rd}(x) \geq M_{Sd}$; $M_{Rdfi}(x) \geq M_{Sdfi}$; Restrições normativas; x_1 e x_5 estão dentro de um espaço de busca preestabelecido</p>	<p>As restrições são: $M_{Rd}(x) \geq M_{Sd}$; $M_{Rdfi}(x) \geq M_{Sdfi}$; $e_h \geq \max(\phi_l; 2\text{cm}; 0,5 \times d_{agr})$; $e_v \geq \max(\phi_l; 2\text{cm}; 1,2 \times d_{agr})$; Restrições normativas; x_1, x_2, x_3 e x_4 estão dentro de um espaço de busca preestabelecido.</p>

Em que: $M_{Rd}(x)$ e $M_{Rdfi}(x)$ são as funções que retornam o momento positivo resistente em temperatura ambiente e em incêndio, respectivamente, calculados de acordo com as prescrições apresentadas nos itens 2.1.1, 2.1.2, 2.2.1 e 2.2.2;

M_{sd} e M_{sdfi} são os momentos solicitantes em temperatura ambiente e em incêndio, respectivamente, com a parcela devida ao peso próprio da viga sendo automaticamente atualizada no processo de otimização;

e_h e e_v ($e_v = x_4$) são os menores espaços livres para a passagem do concreto na horizontal e na vertical, respectivamente (Figura 3.5). Salienta-se que a concretagem ocorre com a viga “deitada”, ou seja, o eixo da alma paralelo ao piso, e assim e_h é menos restritivo. Os espaços limites são apresentados nas expressões presentes na Tabela 3.2 e estão de acordo com a ABNT NBR 6118 (2003).

d_{agr} é o diâmetro médio dos agregados do concreto.

As restrições normativas são aquelas apresentadas nos itens 2.1 e 2.2, e dizem respeito às dimensões mínimas e máximas permitidas.

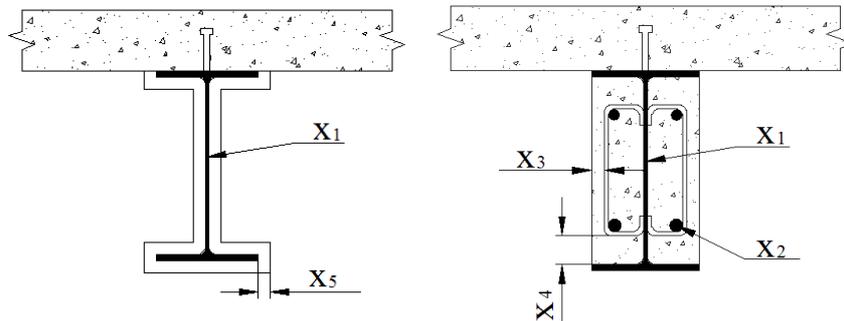


Figura 3.4 – Variáveis de projeto para a VMAC e a VMCC.

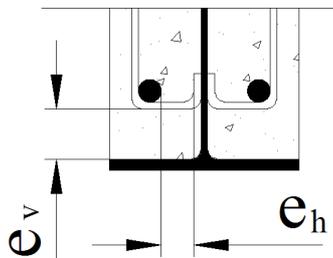


Figura 3.5 – Espaços livres e_h e e_v .

As variáveis de projeto são procuradas em bibliotecas previamente cadastradas pelo usuário. Neste trabalho, foram criadas bibliotecas que contêm informações de perfis laminados e armaduras disponíveis comercialmente. Para as dimensões das variáveis de projeto x_3 , x_4 e x_5 , foram criadas bibliotecas com dimensões práticas para a especificação e a execução. Essas bibliotecas serão apresentadas no capítulo 4.

A função a ser minimizada é o custo por metro da seção (R\$/m, US\$/m, etc.), podendo ser definida como:

- Viga mista com concreto:

$$f(x) = A(x_1)\rho_a Ins_a + A_c(x_1, x_2, x_3, x_4)\rho_c Ins_c + A_s(x_2)\rho_s Ins_s + A_{est}(x_3, x_4)\rho_s Ins_s \quad (3.1)$$

- Viga mista de alma cheia:

$$f(x) = A(x_1)\rho_a Ins_a + A_p(x_1, x_5)\rho_p Ins_p \quad (3.2)$$

Em que:

$A(x_1)$ é uma função que define a área da seção transversal do perfil;

$A_c(x_1, x_2, x_3, x_4)$ é uma função que define a área da seção transversal do concreto entre as mesas, que de forma simplificada pode não levar em conta a área das armaduras, sendo escrita como $A_c(x_1)$;

$A_s(x_2)$ é uma função que define a área da seção transversal da armadura, incluindo também as duas barras de 8,0 mm nos dois cantos superiores, conforme 2.2;

$A_{est}(x_3, x_4)$ é uma função que define a área da seção transversal dos estribos em um espaço de um metro, estando o perfil devidamente espaçado, soldado no perfil de aço e com o diâmetro mínimo, conforme apresentados em 2.2;

$A_p(x_1, x_5)$ é uma função que define a área da seção transversal do material de proteção.

ρ_a , ρ_c , ρ_s e ρ_p são as massas específicas do aço, do concreto do aço das armaduras e do material de proteção, respectivamente, com γ_s tomado igual a γ_a .

Ins_a , Ins_c , Ins_s e Ins_p são os insumos fornecidos pelo usuário para o aço do perfil, o concreto, as armaduras e o material de proteção, sendo expresso em unidade monetária/unidade de massa, por exemplo: R\$/kg, US\$/kg, etc. Esses insumos podem incluir custos de montagem, fabricação, mão-de-obra, dentre outros, e ficam a critério do usuário.

Neste trabalho, é criado um custo de referência, C_{ref} , que é o maior custo possível para cada caso (perfil de maior área, com maiores diâmetros das armaduras ou maior espessura do material de proteção). Para cada indivíduo avaliado, se uma ou mais restrições são violadas, o indivíduo assume esse custo amplificado com uma função que aumenta linearmente com o nível de violação. Por exemplo, se um indivíduo viola a restrição $M_{Rd} \geq M_{Sd}$ ele assumirá o custo $f(x) = [1 + ((M_{Sd} - M_{Rd})/M_{Sd})]C_{ref}$. Dessa forma tenta-se evitar que características de indivíduos que violem por pouco as restrições não sejam perdidas.

3.3.2 PILARES

O custo dos pilares mistos (PM) e não-mistos (PNM) é otimizado de forma análoga às vigas. A função que define o custo para o caso do PM é a mesma mostrada na Equação 3.1 e para o PNM na Equação 3.2. A Tabela 3.3 apresenta a formulação do problema.

Tabela 3.3 – Formulação do problema de otimização das colunas.

PNM	PM
<p>$f(x)$ é o custo da seção a ser minimizado</p> <p>x é o vetor das variáveis de projeto:</p> <ul style="list-style-type: none"> - x_1: perfil de aço; - x_5: espessura do material de proteção 	<p>$f(x)$ é o custo da seção a ser minimizado</p> <p>x é o vetor das variáveis de projeto:</p> <ul style="list-style-type: none"> - x_1: perfil de aço; - x_2: diâmetro da armação; - x_3 e x_4: definem o posicionamento da armadura na horizontal e vertical, respectivamente
<p>As restrições são:</p> $r(x) \leq I;$ $r_{fi}(x) \leq I;$ <p>Restrições normativas;</p> <p>x_1 e x_5 estão dentro de um espaço de busca preestabelecido</p>	<p>As restrições são:</p> $r(x) \leq I;$ $r_{fi}(x) \leq I;$ $e_h \geq \max(\phi_l; 2\text{cm}; 0,5 \times d_{agr});$ $e_v \geq \max(\phi_l; 2\text{cm}; 1,2 \times d_{agr});$ <p>Restrições normativas;</p> <p>x_1, x_2, x_3 e x_4 estão dentro de um espaço de busca preestabelecido</p>

Na Tabela 3.3 estão apresentadas as funções $r(x)$ e $r_{fi}(x)$ que são definidas como:

- Pilar não-misto (PNM):

Se $M_{Sdx} = 0$ e $M_{Sdy} = 0$, então $r(x) = N_{Sd} / N_{Rd}$, caso contrário $r(x)$ assume o valor das equações de interação do AISC/LRFD (2005) apresentadas nas Equações (2.52) e (2.53). Para $r_{fi}(x)$, procede-se de maneira análoga, sendo as equações de interação as apresentadas nas Equações (2.60) e (2.61).

- Pilar Misto (PM):

$r(x)$ é calculado da mesma forma que o pilar não-misto. Para $r_{fi}(x)$ tem-se: se $M_{Sdxfi} = 0$ e $M_{Sdyfi} = 0$, então $r_{fi}(x) = N_{Sdfi} / N_{Rdfi}$, caso contrário $r_{fi}(x) = N_{Sdfi} / N_{fiRd\mu}$.

As variáveis de projeto podem ser observadas na Figura 3.6, e as restrições normativas foram mostradas no item 2.3.

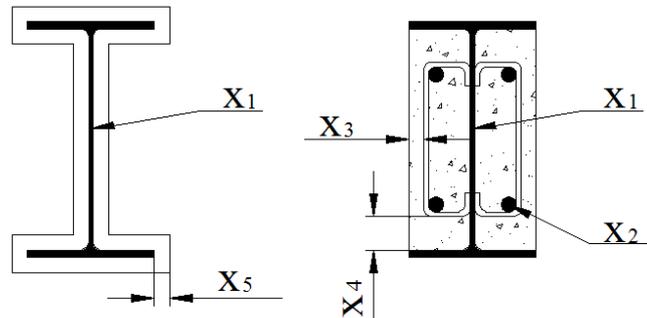


Figura 3.6 – Variáveis de projeto para o PM e o PNM.

3.3.3 ALGORITMO GENÉTICO UTILIZADO

O algoritmo genético utilizado foi inicialmente desenvolvido na tese de doutorado de CASTRO (2001), e posteriormente adaptado por SILVOSO (2003). O programa é desenvolvido em linguagem FORTRAN e tem como principais características:

- Algoritmo genético geracional, isto é, cada nova população substitui integralmente a população anterior;
- Para evitar a perda de bom material genético, utiliza-se a técnica de elitismo do melhor indivíduo, isto é, o indivíduo com melhor aptidão é transferido para a geração seguinte;
- As variáveis de projeto são codificadas com seqüências de números binários. Cada indivíduo é representado por um cromossomo, em que cada bit representa um gen.
- Seleção por torneio;
- Operadores de recombinação em dois pontos com probabilidade P_c ;
- Operador de mutação em um ponto com probabilidade P_m ;

- O critério de parada é o número máximo de gerações;

Sendo assim, os parâmetros de controle do algoritmo são:

- o tamanho da população;
- o número de gerações;
- a probabilidade de cruzamento;
- a probabilidade de mutação;
- o número de indivíduos utilizados para torneio no esquema de seleção.

A Figura 3.7 a seguir apresenta um fluxograma geral do AG utilizado.

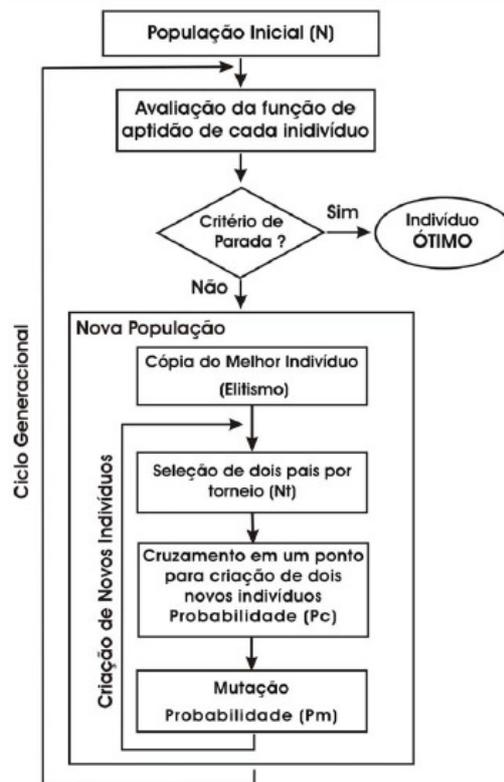


Figura 3.7 – Fluxograma do AG utilizado (SILVOSO, 2003).

4

APLICAÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados da otimização dos custos das vigas, dos pilares e das diagonais de contraventamento de um edifício garagem com 12 pavimentos, de acordo com a metodologia apresentada no capítulo anterior. A partir da estimativa de insumos adotada, serão analisadas e comparadas as soluções com VMAC, VMCC, PM e PNM.

Esse edifício já teve seu comportamento estrutural analisado anteriormente nos trabalhos de MOUÇO (2008) e LANDESMANN et al. (2007).

4.1 DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO

O edifício garagem analisado é composto por vigas principais e secundárias, ambas com vãos de 8 metros. As ligações viga-coluna e viga-viga são consideradas rotuladas. As colunas são rotuladas na fundação e possuem 3 metros de altura entre cada pavimento. A Figura 4.1 apresenta a planta baixa do pavimento tipo, com distribuição de leiaute de vagas:

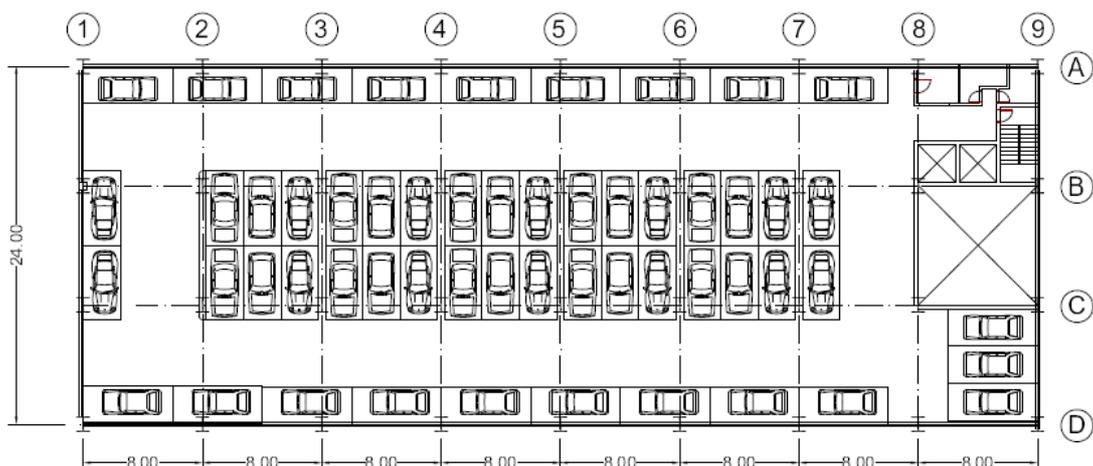


Figura 4.1 – Planta baixa do pavimento tipo.

O esquema estrutural do pavimento tipo pode ser visto na Figura 4.2. A posição das diagonais está indicada pelo pontilhado nesta mesma figura e pode ser mais bem visualizado na elevação mostrada na Figura 4.3, referente a um dos pórticos resistentes, eixos ímpares (1, 3, 5, 7 e 9).

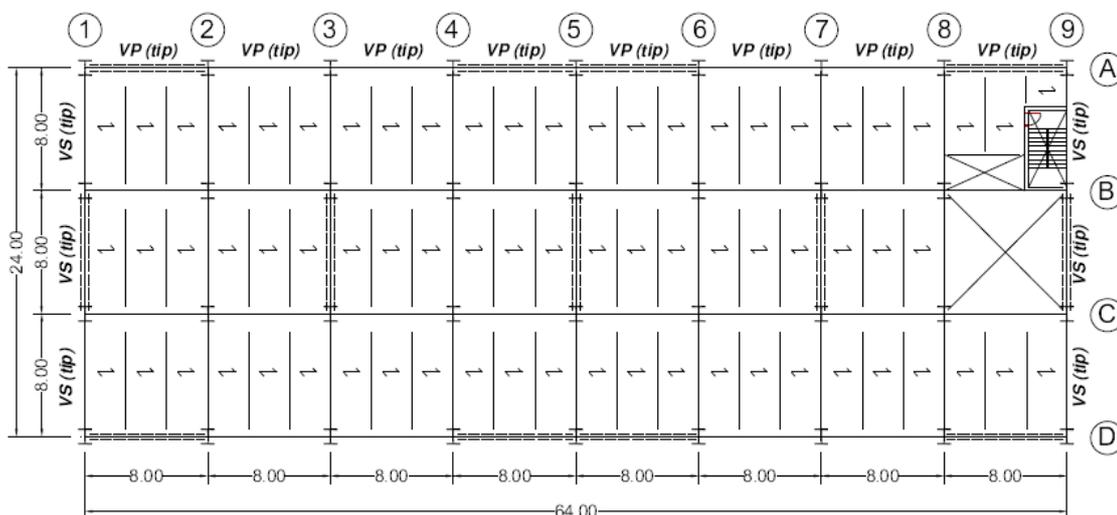


Figura 4.2 – Esquema estrutural do pavimento tipo.

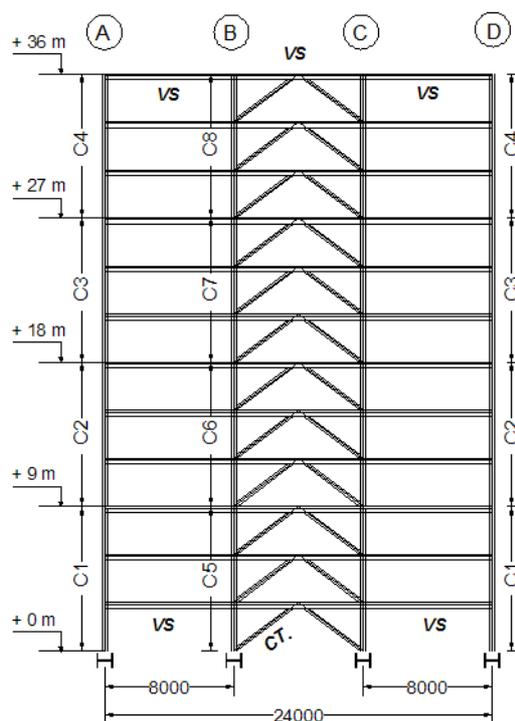


Figura 4.3 – Elevação para os eixos 1,3,5,7 e 9.

As lajes do pavimento tipo são de concreto armado, moldadas *in loco* com 10 cm de espessura e armadas em uma direção (Figura 4.2). A construção é escorada e os conectores de cisalhamento são dimensionados de modo a garantir interação total entre a laje de concreto e o perfil. O cálculo da largura efetiva, de acordo com o que foi apresentado em 2.1, resulta tanto para as vigas principais (VP) quanto para as vigas secundárias (VS) uma largura efetiva de 1000 mm.

Foram consideradas as seguintes combinações de carregamentos no modelo:

- $Comb_1$ (temp. ambiente) = $1,5SC + 1,25PP_{aço} + 1,35(PP_{laje} + rev)$
- $Comb_2$ (temp. ambiente) = $0,6SC + 1,4W + 1,25PP_{aço} + 1,35(PP_{laje} + rev)$
- $Comb_3$ (situação de incêndio) = $0,5SC + 1,20PP_{aço} + 1,20(PP_{laje} + rev)$

Em que:

SC é a sobrecarga de utilização, considerada igual a 3 kN/m^2 ; $PP_{aço}$ é o peso próprio da estrutura de aço, inicialmente estimado em $0,5 \text{ kN/m}^2$. Lembrando que esse valor é automaticamente atualizado pelo programa no processo de otimização; PPl_{aje} é o peso próprio da laje de concreto; rev é a carga considerada para o revestimento da laje de piso ($0,32 \text{ kN/m}^2$);

W é o carregamento de vento.

4.2 ESTIMATIVA DE CUSTOS

Os materiais considerados neste trabalho são: concreto C20 ($f_{ck} = 20 \text{ MPa}$), aço para perfil metálico ASTM A572 gr. 50 ($f_y = 345 \text{ MPa}$), aço para a armadura CA-50 ($f_{ys} = 500 \text{ MPa}$), argamassa projetada com as seguintes propriedades térmicas:

- densidade - $\rho_p = 264 \text{ kg/m}^3$;
- calor específico - $c_p = 2400 \text{ J/kg.K}$;
- condutividade térmica - $\lambda_p = 0,174 \text{ W/mK}$.

A estimativa de custo para os insumos do concreto, armação e perfil metálico considerados nas análises desenvolvidas foi feita para valores médios previstos para maio de 2008, no Estado do Rio de Janeiro (PINI, 2008). Para o material de proteção térmica foram feitas pesquisas com diversos fornecedores de tal material. Ressalta-se que o modelo desenvolvido permite a inclusão/atualização de quaisquer outros valores de insumos disponíveis para cada situação analisada. A Tabela 4.1 apresenta os valores utilizados para os insumos.

Tabela 4.1 – Insumos utilizados na aplicação.

Item	Custo (R\$/kg)	Observação
Concreto C20	0,1059	Materiais, lançamento e adensamento
Armadura CA50	5,2	Corte, dobraagem e lançamento
Perfil laminado tipo wide-flange ASTM A572 gr50	8,0	Cortes, furações e montagem
Material de Proteção térmica	10,61	Material e aplicação

4.3 ESPAÇOS DE BUSCA

Como foi citado no item 3.3, a busca das variáveis de projeto (X_1 a X_5 , Figuras 3.4 e 3.6) se dá a partir de bibliotecas cadastradas pelo usuário. A Tabela 4.2 apresenta os valores possíveis para as variáveis de projeto, adotadas neste trabalho.

Tabela 4.2 – Valores possíveis para as variáveis de projeto.

Variável	Descrição	Posições previstas
X_1	Perfil metálico laminado	190 opções, de W100x19.3 até W1100x499
X_2	Armadura de aço CA50	diâmetros em mm: 8,0 , 10,0 , 12,5 , 16, 20, 25, 32
X_3	Cobrimento do estribo na horizontal	valores em mm: 20, 25, 30, 35
X_4	Cobrimento do estribo na vertical	valores em mm: 20, 25, 30, 35, 40, 45,50
X_5	Espessura do material de proteção	valores em mm: 0,0 , 5,0 , 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40

4.4 RESULTADOS

4.4.1 VIGAS

Os momentos de dimensionamento iniciais (obtidos para a envoltória das combinações analisadas) para as vigas principais e as secundárias tanto para temperatura ambiente como para situação de incêndio são mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resumo da envoltória de solicitações de flexão.

Viga	M_{Sd} (kNm) <i>Comb₁</i>	M_{Sdfi} (kNm) <i>Comb₂</i>
<i>Principal</i>	550,4	346,4
<i>Secundária</i>	192,9	118,5

Um resumo com resultados obtidos com o presente modelo de otimização para as vigas principais (VP) e secundárias (VS), considerando-se ambas as tipologias propostas, VMCC e VMAC, é apresentado nas tabelas a seguir. Os valores relacionados aos custos serão normalizados para o TRRF de 0 minuto, da seção VMCC para a viga secundária. Uma comparação entre as tipologias analisadas é mostrada na Figura 4.4.

Tabela 4.4 – Resultados para a viga secundária (seção parcialmente concretada – VMCC).

TRRF (min)	X_1	X_2 (mm)	X_3 (mm)	X_4 (mm)	M_{Rd}/M_{Sd}	M_{Rdfi}/M_{Sdfi}	Custo
0	W250x145x24	10	20	25	1,00	-	100%
30	W250x145x24	10	20	25	1,00	1,46	100%
60	W310x165x31	8	30	50	1,31	1,24	125%
90	W360x170x44	8	30	50	1,90	1,63	178%
120	W250x250x73	8	35	50	2,06	1,40	280%

Tabela 4.5 - Resultados para a viga secundária (seção com/sem material de proteção – VMAC).

TRRF (min)	X_1	X_5 (mm)	M_{Rd}/M_{Sd}	M_{Rdfi}/M_{Sdfi}	Custo
0	W310x100x23.8	0	1,07	-	87%
30	W310x100x23,8	15	1,07	1,33	105%
60	W250x100x25,3	25	1,01	1,07	119%
90	W310x100x23,8	40	1,07	1,19	135%
120	W310x100x32,7	40	1,42	1,22	169%

Tabela 4.6 – Resultados para a viga principal (seção parcialmente concretada – VMCC).

TRRF (min)	X_1	X_2 (mm)	X_3 (mm)	X_4 (mm)	M_{Rd}/M_{Sd}	M_{Rdfi}/M_{Sdfi}	Custo
0	W460x150x52	16	20	50	1,01	-	211%
30	W460x150x52	16	20	50	1,01	1,61	211%
60	W460x150x52	16	20	50	1,01	1,09	211%
90	W460x190x61	16	35	50	1,12	1,03	243%
120	W530x210x92	8	35	50	1,73	1,42	360%

Tabela 4.7 - Resultados para a viga principal (seção com/sem material de proteção – VMAC).

TRRF (min)	X_1	X_5 (mm)	M_{Rd}/M_{Sd}	M_{Rdfi}/M_{Sdfi}	Custo
0	W460x150x60	0	1,06	-	219%
30	W460x150x60	10	1,06	1,23	237%
60	W460x150x60	20	1,06	1,07	255%
90	W460x150x60	30	1,05	1,02	272%
120	W460x150x60	40	1,05	1,04	290%

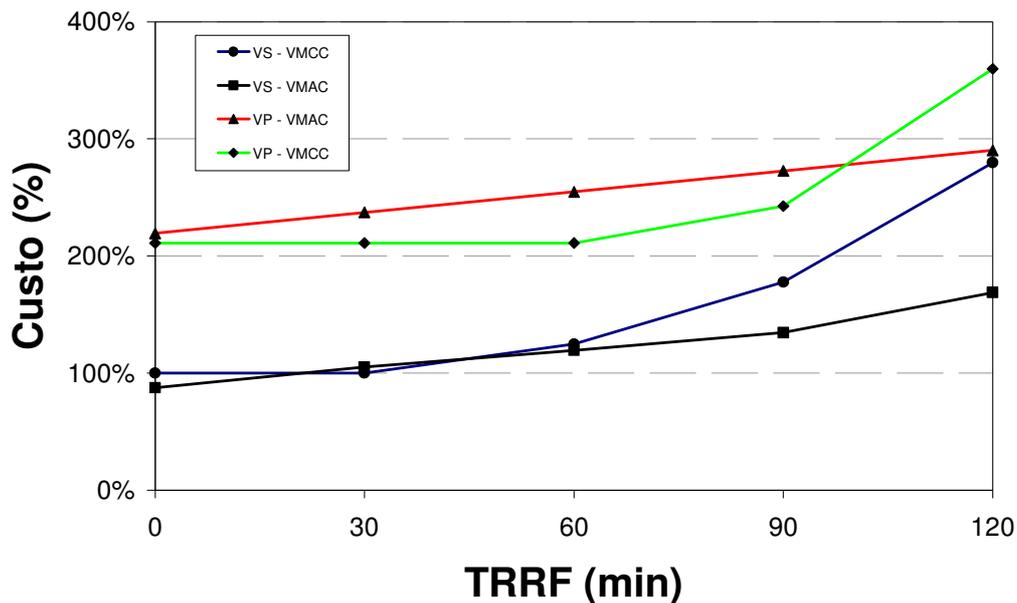


Figura 4.4 – Resultados das seções analisadas para diferentes TRRFs.

Analisando os resultados obtidos, pode-se observar que o programa encontra soluções ótimas com relação M_{Rd}/M_{Sd} e M_{Rdfi}/M_{Sdfi} bem próximas de 1,0, dependendo

do caso que esteja sendo mais significativo para a capacidade resistente da seção. Nos casos analisados, verifica-se que o TRRF de 60 minutos é geralmente a fronteira entre as situações de temperatura ambiente e de situação de incêndio ser dimensionante, ou seja, para este TRRF, as relações M_{Rd}/M_{Sd} e M_{Rdfi}/M_{Sdsi} estão mais equilibradas, ambas próximas de 1,0.

Para tal cenário de insumos, a solução de VMCC mostrou-se mais vantajosa para as vigas principais, que são aquelas com maiores momentos solicitantes, o que se deve ao fato da presença do concreto armado que, além do ganho no momento resistente, protege relativamente bem o perfil às altas temperaturas. Nas vigas secundárias, que são menos solicitadas, as duas tipologias foram bem competitivas até TRRFs inferiores a 60 minutos.

No TRRF de 120 minutos, a solução com material de proteção térmica foi mais vantajosa nas vigas principais e secundárias. Esse fato se deve às características de isolamento do material de proteção térmica serem melhores que as do concreto.

Também foi implementado no programa uma rotina que salva todos os indivíduos gerados no modelo, e esses indivíduos são posteriormente ranqueados de acordo com sua aptidão, ou seja, do indivíduo com menor custo para o indivíduo com maior custo. Como entrada, o usuário escolhe o número de melhores resultados que deseja visualizar. Exemplos dessa lista podem ser vistos nas Tabelas 4.8 e 4.9, que apresentam os 25 melhores resultados para a viga principal para as tipologias de VMCC e VMAC com TRRF de 60 minutos. Esse tipo de lista é de grande utilidade prática, pois permite ao engenheiro a escolha da seção de acordo com as disponibilidades para cada caso. Também possibilita a escolha de seções com relação

M_{Rd}/M_{Sd} e/ou M_{Rdfi}/M_{Sdfi} maiores, para o caso de necessidade de opções com maiores fatores de segurança.

Tabela 4.8 – Lista com os 25 melhores resultados encontrados para a viga principal, para a seção VMCC e com TRRF = 60 minutos.

Rank	X_1	X_2 (mm)	X_3 (mm)	X_4 (mm)	M_{Rd}/M_{Sd}	M_{Rdfi}/M_{Sdfi}	Custo
1	W460x150x52	16	20	50	1,01	1,09	452,7
2	W460x150x52	16	20	45	1,01	1,09	452,8
3	W460x150x52	16	20	40	1,02	1,09	452,9
4	W460x150x52	16	20	35	1,02	1,08	453,1
5	W460x150x52	16	20	30	1,02	1,08	453,2
6	W460x150x52	16	20	25	1,02	1,08	453,4
7	W460x150x52	20	20	50	1,07	1,15	461,9
8	W460x150x52	20	20	45	1,07	1,15	462,0
9	W460x150x52	20	20	40	1,08	1,15	462,2
10	W460x150x52	20	20	35	1,08	1,14	462,3
11	W460x150x52	20	20	30	1,08	1,14	462,5
12	W460x150x52	20	20	25	1,08	1,13	462,6
13	W410x180x53	25	20	50	1,07	1,11	488,0
14	W410x180x53	25	20	40	1,07	1,11	488,2
15	W410x180x53	25	20	25	1,08	1,09	488,7
16	W460x150x60	8	20	50	1,05	1,09	500,6
17	W460x150x60	8	20	40	1,05	1,09	500,9
18	W460x150x60	10	20	50	1,07	1,10	502,9
19	W460x150x60	10	20	40	1,07	1,10	503,2
20	W460x150x60	10	20	35	1,07	1,10	503,3
21	W460x150x60	10	20	30	1,07	1,10	503,5
22	W460x150x60	10	20	25	1,07	1,10	503,6
23	W460x150x60	12,5	20	50	1,09	1,12	506,5
24	W460x150x60	12,5	20	45	1,09	1,12	506,6
25	W460x150x60	12,5	20	40	1,09	1,12	506,8

Tabela 4.9 - Lista com os 25 melhores resultados encontrados para a viga principal, para a seção VMAC e com TRRF = 60 minutos.

Rank	X_1	X_5 (mm)	M_{Rd}/M_{Sd}	M_{Rdf}/M_{Sdf}	Custo
1	W460x150x60	20	1,06	1,07	546,6
2	W460x150x60	25	1,06	1,40	565,6
3	W460x190x61	25	1,05	1,32	575,9
4	W460x150x60	30	1,05	1,58	584,5
5	W460x190x61	30	1,05	1,58	596,2
6	W460x150x60	35	1,05	1,64	603,5
7	W410x180x67	20	1,07	1,20	609,4
8	W460x190x67	20	1,17	1,20	613,7
9	W460x190x61	35	1,05	1,64	616,5
10	W460x150x68	20	1,20	1,36	618,9
11	W460x150x60	40	1,05	1,64	622,4
12	W410x180x67	25	1,07	1,51	628,2
13	W460x190x67	25	1,17	1,58	634,2
14	W460x190x61	40	1,05	1,64	636,8
15	W460x150x68	25	1,20	1,70	637,9
16	W410x180x67	30	1,07	1,64	647,0
17	W460x190x67	30	1,17	1,78	654,6
18	W460x150x68	30	1,20	1,84	657,0
19	W410x180x67	35	1,07	1,67	665,7
20	W410x180x75	20	1,18	1,43	669,3
21	W460x190x74	20	1,29	1,44	670,1
22	W460x190x67	35	1,17	1,83	675,1
23	W460x150x68	35	1,20	1,87	676,1
24	W410x180x67	40	1,07	1,67	684,5
25	W410x180x75	25	1,18	1,72	688,1

Analisando as Tabelas 4.8 e 4.9, pode-se verificar a sensibilidade do otimizador, que encontra soluções bem próximas ao recombinar as variáveis de projeto. O uso de filtros que separem os resultados de acordo com a o tipo de visualização que o usuário deseja pode tornar essas listas mais atrativas, considerando um caráter prático. Como exemplo, pode-se citar um filtro que mostre apenas os melhores resultados para perfis diferentes.

O baixo custo computacional para a solução desse tipo de problema pode ser observado nas figuras 4.5 a 4.9 a seguir. Estas apresentam o valor do custo do melhor

indivíduo de cada geração *versus* geração, considerando-se um número máximo de gerações (critério de parada do programa) de 5, 10, 25, 50 e 100. Será mostrado o caso da viga principal com seção VMCC e TRRF de 60 minutos.

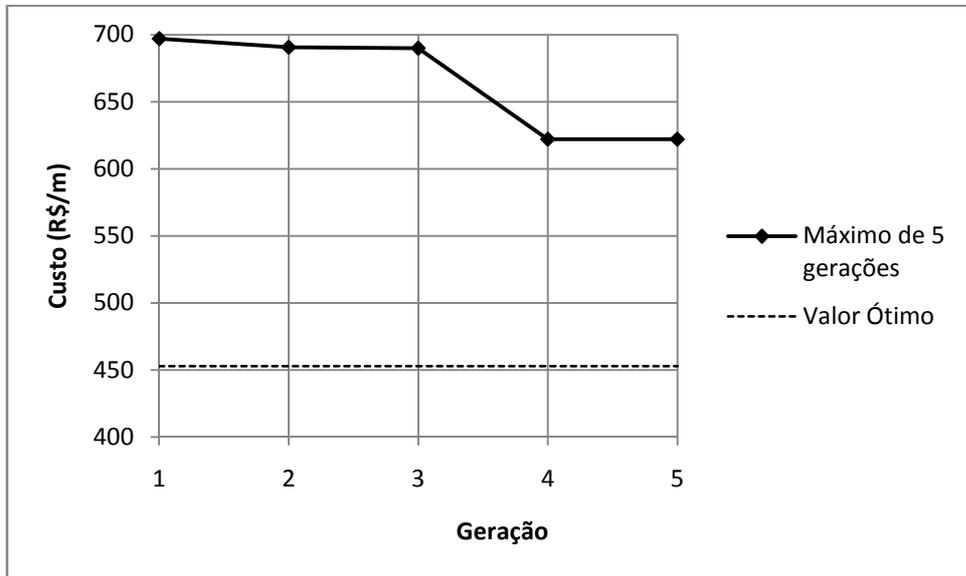


Figura 4.5 – Custo *versus* geração, considerando-se um número máximo de 5 gerações.

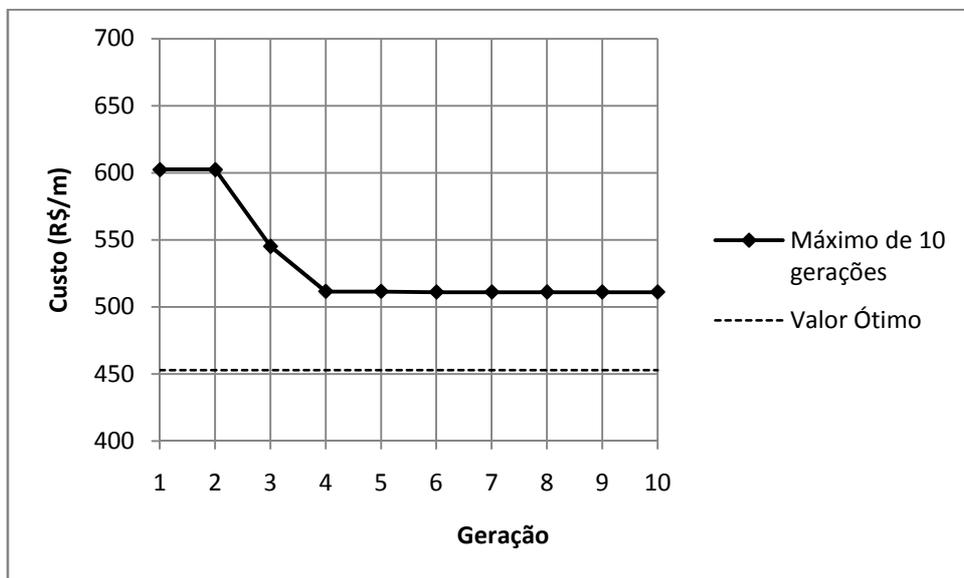


Figura 4.6 - Custo *versus* geração, considerando-se um número máximo de 10 gerações.

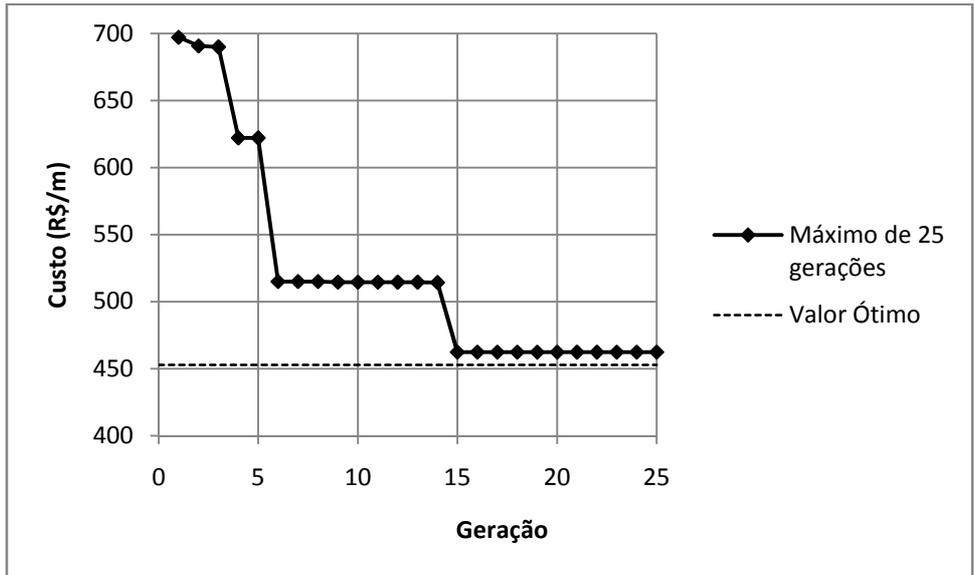


Figura 4.7 - Custo *versus* geração, considerando-se um número máximo de 25 gerações.

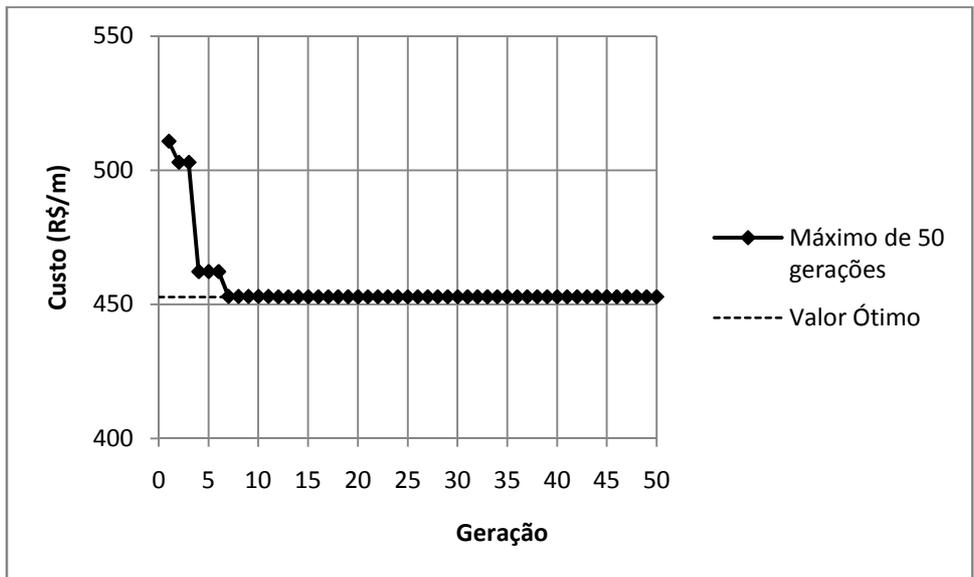


Figura 4.8 - Custo *versus* geração, considerando-se um número máximo de 50 gerações.

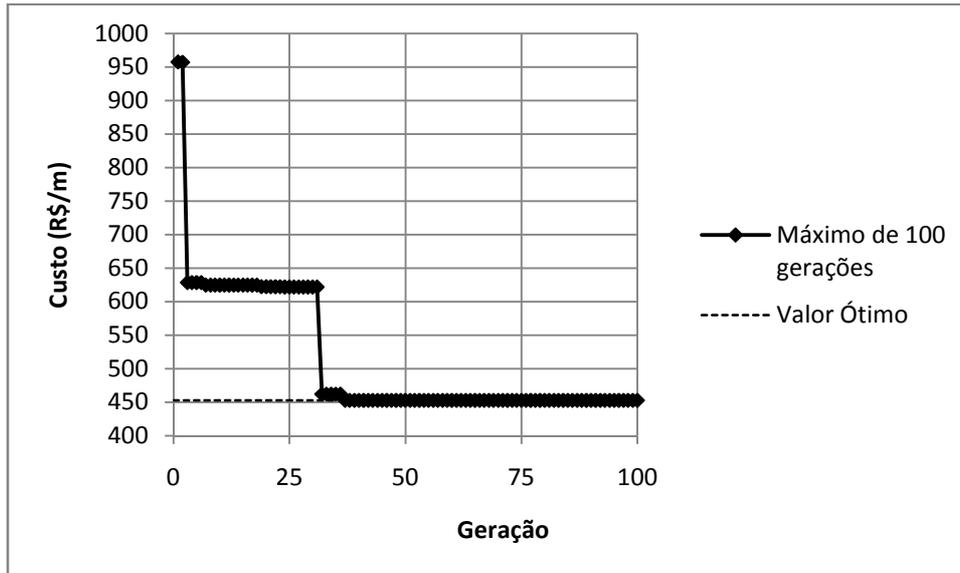


Figura 4.9 - Custo *versus* geração, considerando-se um número máximo de 100 gerações.

Para esse tipo de problema, em geral com um número máximo de aproximadamente 50 gerações, existe uma boa probabilidade de o indivíduo ótimo ser encontrado, o que implica em baixo custo computacional. Ressalte-se que, como o processo de criação da primeira geração (e subseqüentes) não obedece a regras determinísticas, isso irá influenciar o caminho percorrido pelas gerações na busca do valor ótimo, como se pode observar nos gráficos das Figura 4.5 à Figura 4.9, que em outras análises poderiam ter formatos diferentes.

Outros exemplos de otimização de VMAC e VMCC podem ser vistos nos trabalhos de CÂMARA NETO, et al (2008).

4.4.2 PILARES

Os esforços solicitantes para dimensionamento dos pilares foram obtidos por meio de modelo numérico de elementos de barra, seguindo as recomendações previstas. Visando uniformizar os pilares e diagonais de contraventamento, a estratégia de

otimização tomou como ponto de partida a divisão do edifício em quatro grupos. Cada grupo abrange três pisos, e os pilares serão dimensionados para o maior esforço normal, que ocorre sempre no pilar posicionado no nível mais baixo do grupo. As diagonais também serão divididas nos mesmos grupos. Dentro de cada grupo também foram criados dois subgrupos, o primeiro é composto pelas colunas centrais (eixos B e C), e o segundo pelas colunas periféricas (eixos A e D).

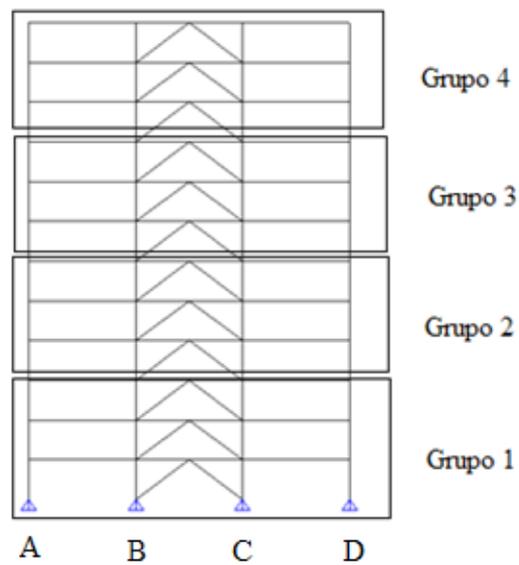


Figura 4.10 – Definição dos grupos para a otimização.

Tabela 4.10 – Esforços normais solicitantes para os elementos comprimidos.

Pisos	Combinação	Pilares		Diagonais
		Eixos A = D	Eixos B = C	
		Esforço normal (kN)	Esforço normal (kN)	Esforço normal (kN)
1 a 3	<i>Comb₁</i>	3577	6953	162
	<i>Comb₂</i>	2423	6207	549
	<i>Comb₃</i>	2132	4207	99
4 a 6	<i>Comb₁</i>	2680	5198	143
	<i>Comb₂</i>	1817	4355	429
	<i>Comb₃</i>	1600	3146	89
7 a 9	<i>Comb₁</i>	1784	3444	127
	<i>Comb₂</i>	1212	2688	309
	<i>Comb₃</i>	1066	2086	78
10 a 12	<i>Comb₁</i>	887	1689	112
	<i>Comb₂</i>	606	1227	182
	<i>Comb₃</i>	533	1025	69

A otimização será feita para a envoltória dos esforços apresentados na Tabela 4.10, da qual se pode concluir que as colunas serão analisadas para as combinações *Comb₁* e *Comb₃*, e as diagonais para as combinações *Comb₂* e *Comb₃*. Em ambos os casos, para temperatura ambiente e situação de incêndio, respectivamente. O comprimento de flambagem para os pilares será considerado como 3 m em temperatura ambiente, e 1,5 m em situação de incêndio.

As diagonais serão consideradas apenas como metálicas, pois esta situação implica maior facilidade na montagem. Além disso, na *Comb₂* (vento) uma das duas barras fica tracionada, situação que não é abrangida pelo programa desenvolvido. Todas as diagonais serão otimizadas para os esforços da *Comb₂* no grupo 1. O comprimento de flambagem considerado foi de 5 m em temperatura ambiente e em situação de incêndio.

Os resultados obtidos serão mostrados a seguir, com o custo normalizado para o PNM, em temperatura ambiente e para os pilares laterais (eixos A e D) do grupo 1.

Tabela 4.11 – Resultados para o grupo 1 – PNM – Eixos A e D.

TRRF (min)	X_1	X_5 (mm)	$r(X)$	$r_{fi}(X)$	Custo
0	W460x280x113	0	0,9	-	100,0%
30	W250x250x115	5	1	1	103,6%
60	W250x250x115	15	1	0,7	108,4%
90	W250x250x115	20	1	1	110,8%
120	W250x250x115	30	1	0,8	115,6%

Tabela 4.12 - Resultados para o grupo 1 – PM – Eixos A e D.

TRRF (min)	X_1	X_2 (mm)	X_3 (mm)	X_4 (mm)	$r(X)$	$r_{fi}(X)$	Custo
0	W250x250x73	25	35	50	1	-	74,8%
30	W250x250x73	25	35	50	1	0,9	74,8%
60	W310x310x97	25	20	50	0,7	0,9	96,7%
90	W310x310x97	32	35	50	0,7	0,8	102,4%
120	W360x370x134	32	35	50	0,5	0,9	136,6%

Tabela 4.13 – Resultados para o grupo 1 – PNM – Eixos B e C.

TRRF (min)	X_1	X_5 (mm)	$r(X)$	$r_{fi}(X)$	Custo
0	W360x370x196	0	1	0	173,5%
30	W360x370x196	5	1	0,9	177,0%
60	W360x370x196	15	1	0,7	183,8%
90	W360x370x196	20	1	0,8	187,3%
120	W360x370x196	25	1	1	190,7%

Tabela 4.14 - Resultados para o grupo 1 – PM – Eixos B e C.

TRRF (min)	X_1	X_2 (mm)	X_3 (mm)	X_4 (mm)	$r(X)$	$r_{fi}(X)$	Custo
0	W360x370x134	25	20	50	1	0	130,9%
30	W360x370x134	25	20	50	1	1	130,9%
60	W610x325x174	25	20	50	0,8	1	169,4%
90	W610x325x174	32	35	50	0,8	1	175,1%
120	W920x310x201	32	35	50	0,7	1	200,5%

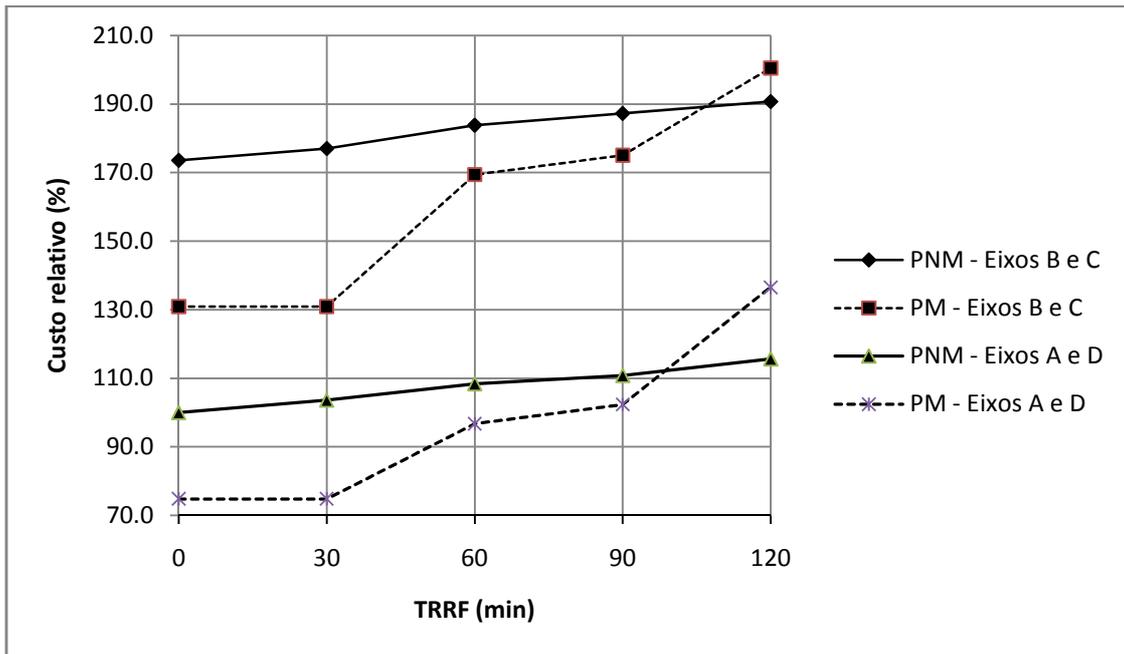


Figura 4.11 – Comparação dos resultados para os pilares do grupo 1.

Tabela 4.15 – Resultados para o grupo 2 – PNM – Eixos A e D.

TRRF (min)	X_1	X_5 (mm)	$r(X)$	$r_{fi}(X)$	Custo
0	W250x250x89	0	1	0	78,7%
30	W250x250x89	10	1	0,6	83,5%
60	W250x250x89	15	1	0,9	85,8%
90	W250x250x89	25	1	0,8	90,6%
120	W250x250x89	35	1	0,8	95,3%

Tabela 4.16 - Resultados para o grupo 2 – PM – Eixos A e D.

TRRF (min)	X_1	X_2 (mm)	X_3 (mm)	X_4 (mm)	$r(X)$	$r_{fi}(X)$	Custo
0	W250x250x73	16	35	50	0,8	0	69,6%
30	W250x250x73	16	35	50	0,8	0,9	69,6%
60	W250x250x73	25	20	50	0,7	0,9	74,9%
90	W310x310x97	20	35	50	0,6	0,9	93,5%
120	W310x310x97	32	30	50	0,5	1	102,4%

Tabela 4.17 - Resultados para o grupo 2 – PNM – Eixos B e C.

TRRF (min)	X_1	X_5 (mm)	$r(X)$	$r_{fi}(X)$	Custo
0	W610x325x155	0	1	0	136,8%
30	W310x310x158	5	1	0,9	141,6%
60	W310x310x158	15	1	0,7	147,4%
90	W310x310x158	20	1	0,8	150,3%
120	W310x310x158	25	1	1	153,2%

Tabela 4.18 - Resultados para o grupo 2 – PM – Eixos B e C.

TRRF (min)	X_1	X_2 (mm)	X_3 (mm)	X_4 (mm)	$r(X)$	$r_{fi}(X)$	Custo
0	W310x310x97	32	35	50	1	0	102,4%
30	W310x310x97	32	35	50	1	0,8	102,4%
60	W690x250x125	25	20	50	0,9	0,9	125,0%
90	W610x325x155	25	35	50	0,6	0,9	152,1%
120	W610x325x155	32	35	50	0,6	0,9	157,8%

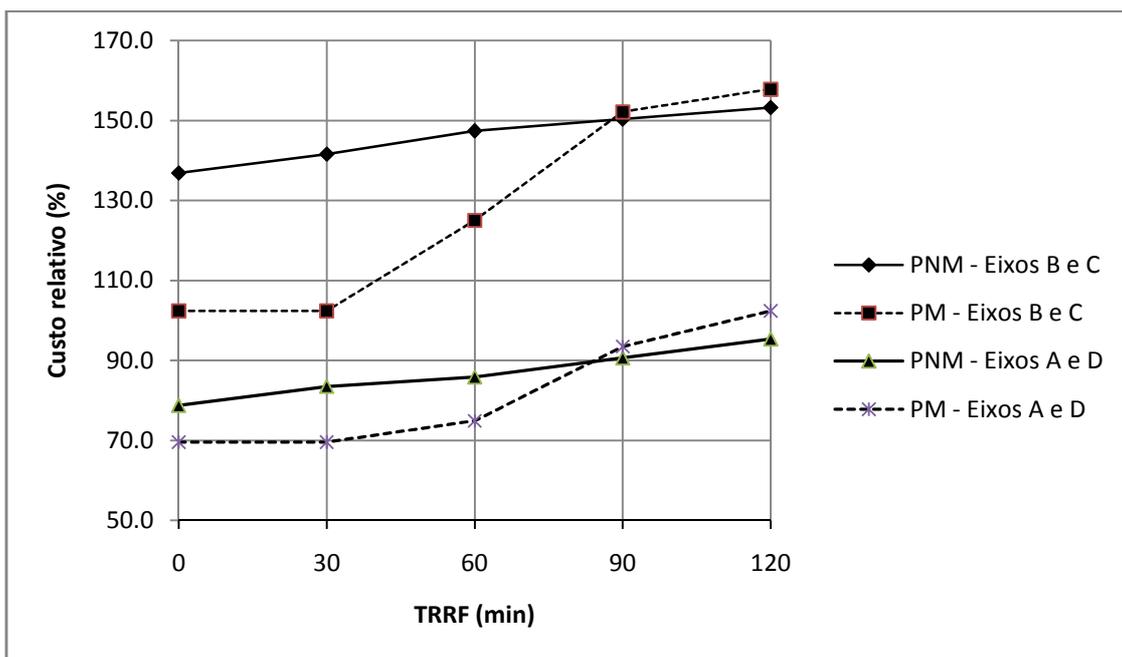


Figura 4.12 – Comparação dos resultados para os pilares do grupo 2.

Tabela 4.19 – Resultados para o grupo 3 – PNM – Eixos A e D.

TRRF (min)	X_1	X_5 (mm)	$r(X)$	$r_{fi}(X)$	Custo
0	W200x200x71	0	0,9	0	63,0%
30	W200x200x71	10	0,9	0,5	66,8%
60	W200x200x71	15	0,9	0,8	68,8%
90	W200x200x71	25	0,9	0,8	72,6%
120	W200x200x71	30	0,9	1	74,5%

Tabela 4.20 - Resultados para o grupo 3 – PM – Eixos A e D.

TRRF (min)	X_1	X_2 (mm)	X_3 (mm)	X_4 (mm)	$r(X)$	$r_{fi}(X)$	Custo
0	W250x250x73	16	35	50	0,6	0	69,6%
30	W250x250x73	16	35	50	0,6	0,6	69,6%
60	W250x250x73	16	25	50	0,6	0,8	69,6%
90	W310x310x97	20	35	50	0,4	0,6	93,5%
120	W310x310x97	20	35	50	0,4	0,8	93,5%

Tabela 4.21 - Resultados para o grupo 3 – PNM – Eixos B e C.

TRRF (min)	X_1	X_5 (mm)	$r(X)$	$r_{fi}(X)$	Custo
0	W310x310x107	0	1	0	93,8%
30	W310x310x107	10	1	0,6	99,5%
60	W310x310x107	15	1	1	102,3%
90	W310x310x107	25	1	0,9	108,0%
120	W310x310x107	35	1	0,8	113,7%

Tabela 4.22 - Resultados para o grupo 3 – PM – Eixos B e C.

TRRF (min)	X_1	X_2 (mm)	X_3 (mm)	X_4 (mm)	$r(X)$	$r_{fi}(X)$	Custo
0	W250x250x73	25	35	50	0,9	0	74,8%
30	W250x250x73	25	30	50	0,9	0,9	74,8%
60	W310x310x97	20	25	50	0,7	1	93,5%
90	W310x310x97	32	35	50	0,6	0,8	102,4%
120	W360x370x134	32	30	50	0,5	0,9	136,6%

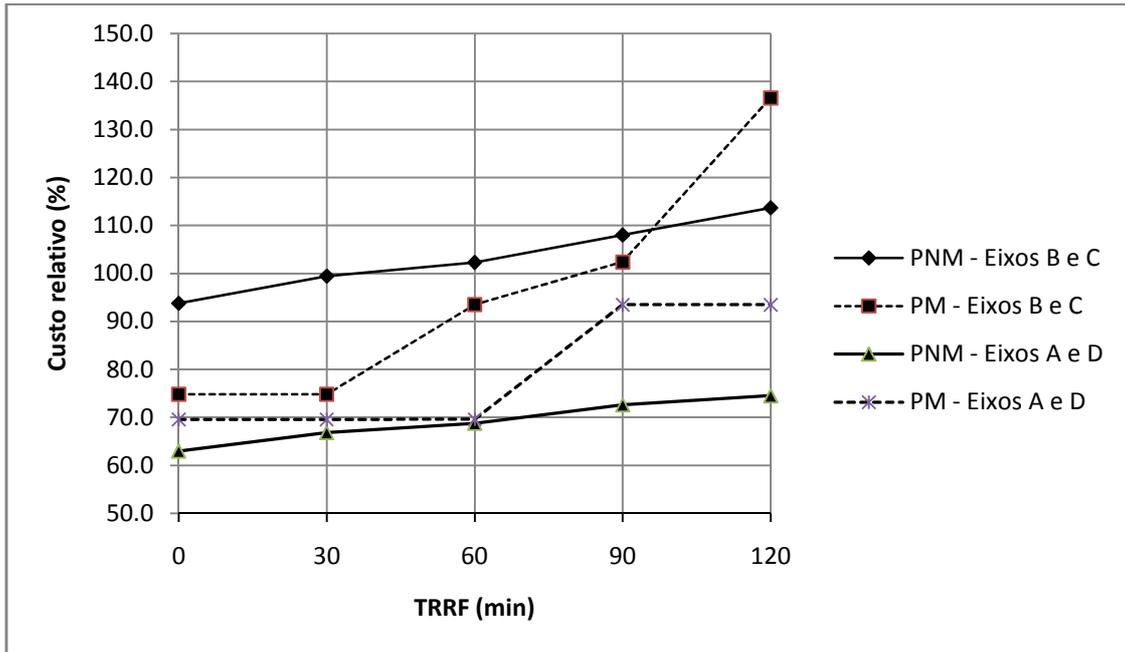


Figura 4.13 - Comparação dos resultados para os pilares do grupo 3.

Tabela 4.23 - Resultados para o grupo 4 – PNM – Eixos A e D.

TRRF (min)	X_1	X_5 (mm)	$r(X)$	$r_{fi}(X)$	Custo
0	W310x165x38,7	0	1	0	34,1%
30	W310x165x38,7	10	1	1	38,1%
60	W200x165x41,7	20	0,9	0,8	43,1%
90	W200x165x41,7	30	0,9	0,8	46,4%
120	W200x165x41,7	40	0,9	0,8	49,7%

Tabela 4.24 - Resultados para o grupo 4 – PM – Eixos A e D.

TRRF (min)	X_1	X_2 (mm)	X_3 (mm)	X_4 (mm)	$r(X)$	$r_{fi}(X)$	Custo
0	W250x250x73	16	35	50	0,3	0	69,6%
30	W250x250x73	16	35	50	0,3	0,2	69,6%
60	W250x250x73	16	35	50	0,3	0,3	69,6%
90	W310x310x97	20	35	50	0,1	0,2	93,5%
120	W310x310x97	20	35	50	0,1	0,2	93,5%

Tabela 4.25 - Resultados para o grupo 4 – PNM – Eixos B e C.

TRRF (min)	X_1	X_5 (mm)	$r(X)$	$r_{fi}(X)$	Custo
0	W200x200x71	0	0,9	0	63,0%
30	W200x200x71	10	0,9	0,5	66,8%
60	W200x200x71	15	0,9	0,8	68,8%
90	W200x200x71	25	0,9	0,7	72,6%
120	W200x200x71	30	0,9	0,9	74,5%

Tabela 4.26 - Resultados para o grupo 4 – PM – Eixos B e C.

TRRF (min)	X_1	X_2 (mm)	X_3 (mm)	X_4 (mm)	$r(X)$	$r_{fi}(X)$	Custo
0	W250x250x73	16	35	50	0,5	0	69,6%
30	W250x250x73	16	35	45	0,5	0,6	69,6%
60	W250x250x73	16	25	50	0,5	0,8	69,6%
90	W310x310x97	20	35	50	0,4	0,3	93,5%
120	W310x310x97	20	35	50	0,4	0,4	93,5%

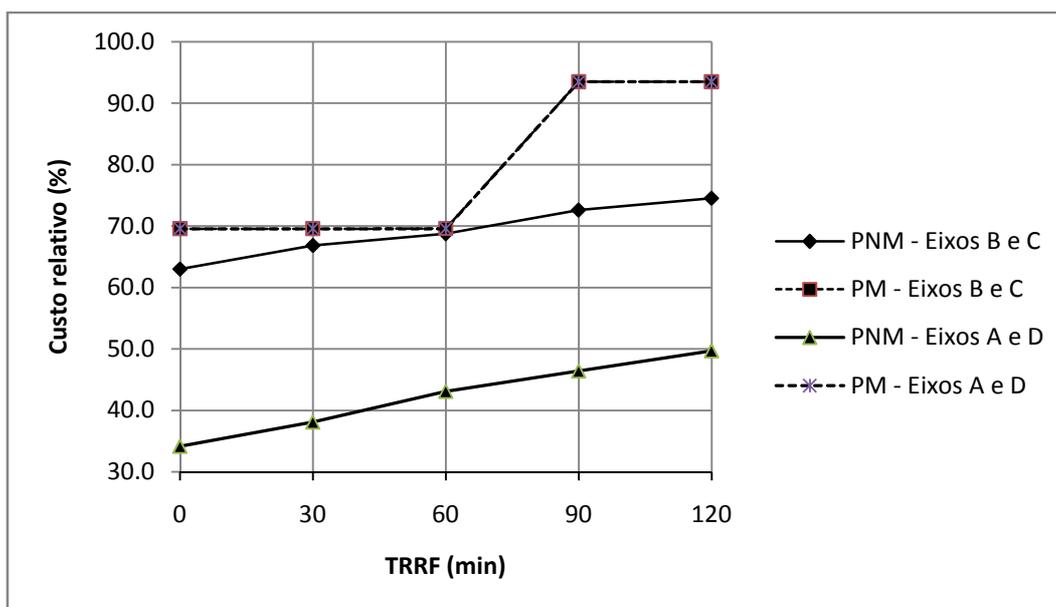


Figura 4.14 - Comparação dos resultados para os pilares do grupo 4.

Tabela 4.27 - Resultados para as diagonais – dimensionadas como PNM.

TRRF (min)	X_1	X_5 (mm)	$r(X)$	$r_{fi}(X)$	Custo
0	W200x200x46.1	0	0,8	0	40,3%
30	W200x200x46.1	5	0,8	0,9	42,2%
60	W200x200x46.1	15	0,8	0,6	45,9%
90	W200x200x46.1	25	0,8	0,6	49,7%
120	W200x200x46.1	30	0,8	0,8	51,5%

Com a análise dos resultados obtidos nas Tabelas 4.11 à 4.29, pode-se observar que o programa encontra soluções ótimas, nas quais a relação $r(X)$ e $r_{fi}(X)$ estão o mais próximo possível de 1,0. Pode-se notar que, a partir do grupo 3 (esforços menores), os pilares mistos apresentam valores menores para essas relações, o que se deve às restrições normativas que impõem valores mínimos para as dimensões das seções, de acordo com o TRRF.

Nos grupos 1 e 2 (esforços maiores), a solução em PM é mais vantajosa em TRRFs menores que 90 minutos, o que se deve à participação do concreto armado que, além de conferir um aumento à capacidade resistente, também reduz a elevação de temperatura no perfil. Para TRRFs maiores que 90 minutos, a solução com material de proteção apresentou maior vantagem, o que se deve à sua característica de proteção térmica.

Na solução não-mista, em cada grupo, as soluções ótimas para TRRFs diferentes em geral possuem o mesmo perfil (variável de projeto X_1), diferindo apenas na espessura do material de proteção. Em alguns casos, em TRRFs maiores, o programa precisou aumentar o perfil. Ressalte-se que a variável de projeto X_5 possuía como valor máximo 40 mm. Se fosse adotada uma biblioteca de espessuras com valores maiores, poderiam ter existido soluções ótimas com o mesmo perfil para todos os TRRFs. O programa, então, analisaria se seria mais vantajoso aumentar o perfil ou a espessura do material de proteção para atender a TRRFs maiores.

Esse tipo de análise também indica que as soluções que combinam PMs e PNMs podem gerar uma boa economia no custo global da construção. Como exemplo, se o edifício analisado tivesse de atender a TRRFs inferiores a 90 minutos, os pilares

dos grupos 1 e 2 poderiam ser mistos e os demais não-mistos, o que iria gerar uma boa redução de custos.

A mesma consideração relativa ao número máximo de gerações aplica-se ao caso das colunas, uma vez que o espaço de busca tem exatamente a mesma dimensão.

4.5 O EDIFÍCIO IDEAL

No contexto desse trabalho, em que o custo dos elementos é minimizado, o edifício ideal seria aquele que tivesse o menor custo global para as vigas, colunas e diagonais, além de atender as solicitações em temperatura ambiente e em situação de incêndio.

A Tabela 4.28 apresenta as tipologias que resultaram mais vantajosas em cada grupo para diferentes TRRF. As soluções com concreto armado entre as mesas do perfil estão destacadas na tabela.

Ressalte-se que o conceito de edifício ideal é extremamente complexo devido a fatores como: mão-de-obra, disponibilidade de tecnologia e de materiais, valor dos insumos, entre outros.

Tabela 4.28 – Comparação das soluções com e sem elementos mistos no edifício analisado.

TRRF (min)	GRUPO	VP	VS	PILARES	
				EIXOS A=D	EIXOS B=C
0	1	VMCC	VMAC	PM	PM
	2			PM	PM
	3			PNM	PM
	4			PNM	PNM
30	1	VMCC	VMCC	PM	PM
	2			PM	PM
	3			PNM	PM
	4			PNM	PNM
60	1	VMCC	VMAC	PM	PM
	2			PM	PM
	3			PNM	PM
	4			PNM	PNM
90	1	VMCC	VMAC	PM	PM
	2			PNM	PM
	3			PNM	PM
	4			PNM	PNM
120	1	VMAC	VMAC	PNM	PNM
	2			PNM	PNM
	3			PNM	PNM
	4			PNM	PNM

5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a aplicação de um modelo numérico-computacional para o dimensionamento e a otimização do custo de elementos metálicos e mistos sob temperatura ambiente e em situação de incêndio. Foram consideradas as metodologias simplificadas (analíticas) para dimensionamento, propostas pelas normatizações nacionais e internacionais.

O dimensionamento das vigas considerou interação total com a laje maciça de concreto, a construção escorada e apenas momento fletor positivo. A metodologia de dimensionamento apresentada para as vigas mistas com concreto entre as mesas não está presente nas normas nacionais atualmente vigentes. Diante disso foram adotados os procedimentos propostos pelo EUROCÓDIGO 4 p1.1 e p1.2 (2005).

Para os pilares, foram apresentadas metodologias de dimensionamento considerando compressão centrada e flexão composta reta e oblíqua. Tais metodologias estão presentes nas normas brasileiras ABNT NBR 8800 (2007) e ABNT NBR 14323 (1999). Foram consideradas duas tipologias para os pilares: com concreto entre as mesas (PM), e com/sem material de proteção térmica (PNM).

A técnica de otimização utilizada teve como base o método dos Algoritmos Genéticos (HOLLAND, 1975). Essa técnica apresentou algumas vantagens cruciais

para este tipo de problema, dentre as quais pode ser citado o fato de se trabalhar com variáveis discretas e inteiras, o que permitiu que as variáveis de projetos assumissem valores usuais e comercialmente disponíveis. A metodologia permite que sejam criadas listas com os melhores indivíduos encontrados no processo de otimização, possibilitando ao usuário ter mais opções de escolha para as seções. Ressalte-se que essas listas podem ser mais bem visualizadas com o uso de filtros que separem as melhores soluções por tipo de perfil, espessura do material de proteção, diâmetro da armadura, etc.

No final da descrição de cada metodologia de dimensionamento, contemplada no capítulo 2, foram apresentados exemplos numéricos que permitiram dar uma idéia inicial do comportamento de cada tipologia, ao indicar as suas vantagens e limitações, as quais foram posteriormente confirmadas com os exemplos de otimização.

Os resultados obtidos para a otimização tomaram por base a entrada de dados dos insumos fornecidos, que se fundamentaram em estimativas de custos fornecidas em revistas especializadas (PINI, 2008) e em informações de fabricantes. Ressalta-se a dificuldade de se obter valores de insumos para os materiais de proteção térmica, uma vez que os fornecedores normalmente passam idéias dos custos globais da solução (Custo/ m² de área construída), e o programa desenvolvido encontra uma solução ótima em que a variável de projeto é a espessura do material de proteção térmica. Portanto, os resultados serão mais realistas se forem fornecidos os insumos em unidades de custo/m³ (ou custo/kg) de material.

O uso de bibliotecas pré-cadastradas para as variáveis de projeto permite que cada usuário crie seu próprio conjunto de informações de acordo com a disponibilidade de cada projeto. Os insumos também podem variar bastante ao longo do tempo e da

localidade do projeto, influenciando diretamente na solução ótima encontrada. Podem ser citados exemplos em que para uma determinada localidade, seja mais vantajoso aumentar o perfil de aço a utilizar um perfil menor com maior espessura de material de proteção térmica, ou ainda, locais em que o uso de soluções com concreto entre as mesas seja proibitivo por questões de logísticas ou de outra natureza (construtivas, acesso a insumos no local, etc.).

No estudo de caso analisado, a solução com concreto entre as mesas, tanto nas vigas mistas com concreto quanto nos pilares mistos, mostraram ser excelentes alternativas em situações de maiores esforços solicitantes (vigas principais e colunas centrais dos níveis mais baixos do edifício garagem). Tal fato se deve à presença do concreto armado, que aumenta a capacidade resistente da seção. No entanto, tais soluções só foram mais vantajosas para TRRFs abaixo de 90 minutos, o que confirma que o concreto só confere uma boa proteção térmica até determinadas temperaturas, a partir das quais é mais favorável o uso de materiais específicos para proteger o perfil metálico às altas temperaturas.

As restrições são facilmente aplicadas no programa por meio de penalidades impostas às variáveis de projeto que violem às condições de segurança. Com isso, o usuário pode criar restrições e verificações adicionais, podendo-se citar como exemplo: verificação ao esforço cortante e verificações em serviço, como limites de flechas e abertura de fissuras no material de proteção térmica.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido à facilidade de implementação do método de otimização apresentado neste trabalho, torna-se amplo o campo de aplicações futuras. As principais são:

- Acoplar o programa de otimização a programas de análise estrutural e assim fazer o dimensionamento automático e a otimização completa das estruturas;
- Considerar a interação parcial com a laje de concreto;
- Considerar a construção não escorada;
- Considerar outras solicitações como momento negativo, esforço cortante e verificações em serviço;
- No caso das vigas mistas podem-se acrescentar mais variáveis de projeto na otimização, tais como: conectores de cisalhamento, e assim dimensioná-los de forma que o programa compare se são mais vantajosos os métodos de interação total ou parcial; criar uma variável que indique se é mais vantajosa a construção com ou sem escoramento provisório; tipologias diferentes de lajes, como *steel deck*, por exemplo.
- No caso das VMAC e PNM, uma das variáveis de projeto foi a espessura do material de proteção térmica, partindo-se de um único material de proteção. Outra alternativa que se acrescentaria ao programa seria o usuário cadastrar mais de um material de proteção térmica com propriedades diferentes e assim, além da espessura, o programa especificaria o material que gerasse menor custo;
- Nas listas com os melhores resultados obtidos na otimização, devem ser criados filtros que separem os melhores resultados de acordo com a necessidade do usuário, sendo uma alternativa para os ótimos globais, que às vezes apresentam resultados redundantes e não práticos;
- Criar uma interface gráfica para maior facilidade de uso do programa.

O programa considerou métodos simplificados para o dimensionamento das seções em situação de incêndio. Uma outra corrente que atualmente já é abordada

pelas normatizações nacionais e internacionais são os métodos avançados para as análises de estruturas. Tais métodos são objeto de estudo no Programa de Engenharia Civil da COPPE, e tem-se como objetivo para trabalhos futuros, acoplar metodologias de otimização aos métodos avançados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, L. M. P., FAKURY,R.H., 1998, “Elevação da Temperatura de Elementos Estruturais de Aço de Edifícios em Incêndio”, In: *VII Semana de Iniciação da UFMG*, v.1, p.318 – 318, Belo Horizonte/MG.

ABREU, L. M. P., FIGUEIREDO JÚNIOR, F. P., FAKURY,R.H., LAS CASAS, E.B., 2001, “Análise Crítica do Projeto de Vigas Mistas de Edifícios em Situação de Incêndio”, In: *Anais do I CICOM*, São Paulo/SP.

AISC/LRFD, 2005, *Manual of Steel Construction – Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction, Chicago.

BAILEY, C. G., MOORE, D. B. (2000a), “The Structural Behaviour of Steel Frames with Composite Floors Slabs Subject to Fire: Part 1: Theory”, *The Structural Engineer*, v. 78, n. 11.

BAILEY, C. G., MOORE, D. B. (2000b), “The Structural Behaviour of Steel Frames with Composite Floors Slabs Subject to Fire: Part 2: Design”, *The Structural Engineer*, v. 78, n. 11.

BARBOSA, H. J. C., 1997, “Algoritmos Genéticos para a Otimização em Engenharia: Uma Introdução. Introdução aos Algoritmos Genéticos”, *2ª Escola de Verão em Computação Científica*, LNCC, Rio de Janeiro, RJ.

- BICKLE, T., T., THIELE, L., 1996, “A comparison of selection schemes used in evolutionary algorithms”, *Evolutionary Computation*, v.4, n.4 pp. 361-394, MIT-Press.
- CÂMARA NETO, J., LANDESMANN, A., BATISTA, E. M., 2008, *Otimização de Vigas-Mistas Aço-Concreto para Condições de Temperatura Ambiente e Incêndio*, In: XXIX CILAMCE, Maceió/AL.
- CÂMARA NETO, J., LANDESMANN, A., BATISTA, E. M., 2008, *Aplicação de Algoritmos Genéticos para Dimensionamento de Vigas-Mistas Aço-Concreto*, In: CONSTRUMETAL, São Paulo/SP.
- CÂMARA NETO, J., LANDESMANN, A., BATISTA, E. M., 2008, *Otimização de Vigas-Mistas Aço-Concreto para Condições de Temperatura Ambiente e Incêndio*, In: XXIX CILAMCE, Maceió/AL.
- CAMPOS, A. S., 2006, Estudo sobre os critérios de dimensionamento de pilares mistos de aço e concreto. Campinas, Brasil: UNICAMP, FEC, 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, 2006. 158p.
- CASTRO, R. E., 2001, “Otimização de estruturas com multi-objetivos via algoritmos genéticos de Pareto”, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, RJ.
- CBESP, 2005a, *Instrução Técnica nº 2 - Conceitos Básicos de Segurança Contra Incêndio*, São Paulo. Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo.
- CBESP, 2005b, *Instrução Técnica nº 7 - Separação entre Edificações (Isolamento de Risco)*, São Paulo. Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo.
- CBESP, 2005c, *Instrução Técnica nº 8 - Segurança Estrutural nas Edificações*, São Paulo. Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo.

CBESP, 2005d, Instrução Técnica nº 9 - *Compartimentação Horizontal e vertical*, São Paulo. Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo.

CHEN, W. F., LUI, E. M., 1991, *Stability Design of Steel Frames*, 1st Boca Raton, Florida, CRC Press, inc.

COELLO, C. A., “Use of a self adaptative penalty approach for engineering optimization problems”, *Computers in Industry*, v.43, pp. 113-127, 2000.

DIAS, L. A. M. (2002). *Estruturas de aço. Conceitos, técnicas e linguagem*. Zigurate. São Paulo.

ERBATUR, F., HANSANÇEBI, O., TÛTÛNCÛ, I. AND KILIÇ, H., 2000, “Optimal design of Planar and Space Structures with Genetic Algorithms”, *Computers & Structures*, 75, pp. 209-224.

European Committee for Standardization, 2005, *Eurocode 3: “Design of Steel Structures”*, Part 1.1– *General Rules and Rules for Buildings*, Brussels.

European Committee for Standardization, 2005, *Eurocode 3: “Design of steel structures”*, Part 1.2: *Structural fire design*, Brussels.

European Committee for Standardization, 2005, Eurocode 4: “*Design of composite steel and concrete structures - Part 1.1: General rules and rules for buildings*”, Brussels.

European Committee for Standardization, 2005, *Eurocode 4: “Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures - Part 1.2: General rules - Structural fire design”*, Brussels.

FAKURY, R. H., SPÍNDOLA, C. C., 2002, “Dimensionamento de Pisos Mistos em Situação de Incêndio com Proteção apenas das Vigas Principais”, In: *Anais do II CICOM*, São Paulo/SP.

- FERREIRA, A. F., CLARET, A.M., SANTOLIN, A., 2007, “Determinação da distribuição de temperatura em perfis de aço parcialmente protegidos: método simplificado”, In: Rev. Esc. Minas v.60 n.4, Ouro Preto/MG.
- GUIMARÃES, P. P. O., 2007, *Sobre o Dimensionamento do Revestimento Contra Fogo de Estruturas de Aço*, Dissertação M.Sc., EP-USP, São Paulo.
- HOLLAND, J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- ISO 834-1, 1999. *Fire-Resistance Tests - Elements of Building Construction, Part 1: General Requirements*. Geneva.
- KAMESHKI, E. S. AND SAKA, M. P., 2001, “Optimum design of nonlinear steel frames with semi-rigid connections using a genetic algorithm”, *Computers & Structures*, v. 79, pp. 1593-1604.
- KRAVANJA, S., ILIH, S. S., 2002, “Optimization based comparison between composite I beams and composite trusses”, In: *Journal of Steel Construction*.
- KLANSEK, U., KRAVANJA, S., 2005, “Cost estimation, optimization and competitiveness of different composite floor systems – Part 1: Self-manufacturing cost estimation of composite and steel structures”, In: *Journal of Steel Construction*.
- LANDESMANN, A., 2003, *Modelo Não-Linear Inelástico para Análise de Estruturas Metálicas Apertadas em Condições de Incêndio*, Tese D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- LANDESMANN, A., MOUÇO, D.L., 2007, *Análise Estrutural de um Edifício de Aço sob Condições de Incêndio*, REM - Revista da Escola de Minas, v.60, n.2, pp. 285-294; abr.jun.2007 (ISSN 0370-4467), Ouro Preto.

MERGULHÃO, A. J. R., FREITAS, A. M. S., MACHADO, R. M., 1998, “Composite Steel Beams Strength Evaluation Constituted of Steel Profiles Filled with Reinforced Concrete” In: Journal of Steel Construction”.

MOUÇO, D. L., 2008, *Modelo Inelástico para Análise Avançada de Estruturas Mistas Aço-Concreto em Situação de Incêndio*, Dissertação M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

NANAKORN, P. AND MEESOMKLIN, K., 2001, “An adaptive penalty function in genetic algorithms for structural design optimization”, *Computers & Structures*, v.79, 2527-2539.

NBR – 14323, 1999, *Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio*, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

NBR – 14432, 2000, *Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações - Procedimento*, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

NBR – 6118, 2003, *Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento*, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

NBR – 8800, 2007, *Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas mistas de Aço e Concreto de Edifícios (Projeto de Revisão)*, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

NBR – 15200, 2004, *Projeto de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio*, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

PANNONI, F. D., 2004, “Princípios da Proteção de Estruturas Metálicas em Situação de Corrosão e Incêndio”, In: *Coletânea do Uso do Aço*, 3º Ed., Vol. 2.

PINI, Revista Construção Mercado, Editora PINI, n.82, Maio/2008.

QUEIROZ, G.; CHAVES, L. B., 2000, “Repartição de cargas entre aço e concreto em uma ligação viga-pilar misto”. In: *III SEMINÁRIO INTERNACIONAL “O USO DE ESTRUTURAS METÁLICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL”*.

REGOBELO, R, 2007, *Análise Numérica de Seções Transversais e de Elementos Estruturais de Aço e Concreto em Situação de Incêndio*, Dissertação M.Sc., EESC/USP, São Paulo.

SHAFFER, R., 2003, *Practical Guide to Genetic Algorithms*, Naval Res. Lab., Chem. Div. In: <http://chemdiv-www.nrl.navy.mil//chemometrics/practga.html>.

SILVOSO, M. M., 2003, “Otimização da fase construtiva de estruturas de concreto em face dos efeitos da hidratação via algoritmos genéticos”, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, RJ.

SSEDTA: Structural steelwork Eurocodes development of a trans-national approach. Lecture 1: Introduction to composite construction of buildings. ©SSEDTA 2001, Last modified 29/03/2001.

WANG, Y. C., 1997, “Composite Beams with Partial Fire Protection”, In: *Journal of Steel Construction*.

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](#)