

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
SECRETARIA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

CAP GUSTAVO DA LUZ LIMA CABRAL

**Metodologia de produção e emprego de agregados de
argila calcinada para pavimentação**

Rio de Janeiro

2005

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

CAP GUSTAVO DA LUZ LIMA CABRAL

**METODOLOGIA DE PRODUÇÃO E EMPREGO DE AGREGADOS DE
ARGILA CALCINADA PARA PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof^o. Luiz Antônio Silveira Lopes – D.C.
Co-orientador: Prof^o. Álvaro Vieira – M.C.

Rio de Janeiro

2005

c2005

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha.

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do autor e dos orientadores.

T Cabral, Gustavo da Luz Lima

Metodologia de produção e emprego de agregados de argila calcinada para pavimentação / Gustavo da Luz Lima Cabral – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2005.

358 p.: il., tab.

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro, 2005.

1. Argila calcinada. 2. Metodologia. 3. Produção e emprego. 4. Pavimentação. I. Instituto Militar de Engenharia. II. Título.

CDD

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

CAP GUSTAVO DA LUZ LIMA CABRAL

**METODOLOGIA DE PRODUÇÃO E EMPREGO DE AGREGADOS DE
ARGILA CALCINADA PARA PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof. Luiz Antônio Silveira Lopes - D.C.

Co-orientador: Prof. Álvaro Vieira – M.C.

Aprovada em 15 de fevereiro de 2005 pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Luiz Antônio Silveira Lopes – D.C. do IME - Presidente

Prof. Álvaro Vieira – M.C. do IME

Prof. Salomão Pinto – D.C. do IPR/DNIT

Prof^a. Laura Maria Goretti da Motta – D.C. da COPPE/UFRJ

Prof. Jonas Alexandre – D.C. da UENF

Rio de Janeiro

2005

Dedico este trabalho ao Coronel Carlos Fernandes Lima, "Guará", e aos meus pais, Osvaldo Gorgônio Cabral e Leila da Luz Lima Cabral, em retribuição ao incansável e dedicado empenho na minha formação.

AGRADECIMENTOS

A Deus e aos meus guias, por terem me dado saúde e ensinamentos para persistir em meus objetivos mesmo na presença de adversidades; por terem orientado o meu caminho durante as decisões tomadas e, proporcionarem excelentes oportunidades durante toda a vida.

Aos meus pais, a quem sempre deverei todo o esforço e sacrifício, que por diversas vezes tiveram de empenhar, para que hoje eu possa estar atingindo mais este objetivo.

A minha esposa, Raphaela, que tem me acompanhado nesses últimos anos, por vezes até privando-se do seu lado profissional, para prestar apoio pessoal, mesmo por ocasiões de obras em regiões inóspitas e distantes.

A todos os meus familiares. Em especial, aqueles com quem pude voltar a conviver neste período do curso, principalmente, “Biba”, Andréa, Vitória, Douglas, “Dudu” e “Didão”.

Ao Exército Brasileiro, à Secretaria de Ciência e Tecnologia, e ao Comando do Instituto Militar de Engenharia, pela confiança e investimento em mais uma etapa do meu aperfeiçoamento profissional como Engenheiro Militar.

Ao Coronel Álvaro Vieira, que desde a época da graduação, tenho grande admiração devido à grande experiência e pelo rigor técnico que norteou sua carreira como Engenheiro Militar, servindo hoje como exemplo e referência a todos os seus alunos; agradeço por sua orientação, apoio irrestrito pessoal e material, pela leal amizade, e principalmente pelo acúmulo de esforços pessoais por 3 seguidos anos, empenhando-se para a realização do meu curso.

Ao Coronel Silveira Lopes pelos ensinamentos, por sua orientação, pelo grato convívio nestes dois anos e pela colaboração nas atividades externas necessárias.

A Professora Laura Motta, pela imensa simpatia e boa vontade com que fui recebido por todas as vezes que foram necessárias na COPPE/UFRJ, pelos ensinamentos e orientações quanto ao texto, por disponibilizar e ministrar a disciplina de Materiais de Pavimentação, por disponibilizar material e pessoal para a realização dos ensaios de Rice e pelo gratificante convívio que espero ter apenas se iniciado com a realização deste curso.

Ao Professor Salomão Pinto pelos ensinamentos e orientações provenientes da sua vasta e notória experiência em pavimentação e misturas asfálticas, e por disponibilizar recursos materiais e pessoais dos laboratórios do IPR/DNIT, adicionado à sua supervisão, durante a realização das misturas asfálticas deste estudo.

Ao Professor Jonas Alexandre da UENF, por aceitar o convite para participar da banca examinadora, pelas contribuições e sugestões a esta dissertação, e pela hospitalidade e acompanhamento na cidade de Campos dos Goytacazes (RJ) por ocasião das excelentes visitas técnicas às olarias daquela região.

Aos professores do curso de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e do curso de Engenharia de Fortificação e Construção.

Ao amigo Fernando pela contribuição no estudo, pela amizade, e pela recepção durante a Operação Ricardo Franco em Santarém.

Ao amigo Albuquerque pelo grato retorno do convívio durante o curso, momentos de descontração, pelos ensinamentos e troca de informações auxiliando-me na confecção deste trabalho.

A todos os amigos da nossa turma de 1.998, em especial Veiga e Dilermando, colegas das demais especialidades, e dos companheiros de outras turmas, Menezes, Chagas, Ben-Hur, Aurélio, Rubbioli e Emanuel.

Aos amigos do curso de mestrado do IME das Turmas 2002 e 2003.

Ao companheiro Ricardo da COPPE/UFRJ pela troca de experiências sobre a pesquisa, e que muito me auxiliou neste trabalho.

A todos os organizadores da Operação Ricardo Franco II: das seções do IME (Cel Dias, Maj Fábio e Prof. Amorim); do Corpo de Alunos (Ten Zenílson); do Comando Militar da Amazônia; do 2º Grupamento de Engenharia de Construção (Cel Barbosa, Cap Ferro e Cap Dutra); do Núcleo de TV do IME e à Cap Sandra pelo excelente trabalho de divulgação da pesquisa na TV e dos meus caros alunos que tive o grande prazer em monitorá-los tecnicamente durante a OPRF II.

Ao 8º Batalhão de Engenharia de Construção pela acolhida e auxílio operacional em Santarém, ao Cel Mansur, Maj Baccini, Cap Rodrigo, e especialmente ao Cap Renato, Maj dos Santos e SC Napoleão pelo envio dos solos para a realização desta pesquisa e pelo auxílio no contato com as olarias.

A Sra. Charlotte Zaeyen da CPRM pela disponibilização dos dados.

Ao Sr. Francisco Araújo Vieira, proprietário da Cerâmica CIFRAMA, pelo imenso auxílio prestado, pela parceria firmada, pela confecção e envio da primeira produção industrial do agregado de argila calcinada, e por disponibilizar os dados necessários à composição dos custos com esta produção.

Aos Departamentos de Engenharia de Materiais (SE/4) e Química (SE/5), em especial ao Felipe e Joel pela realização do ensaio de análise química EDS no MEV e ao Cap Cano pela realização dos ensaios de ATD/ATG.

Aos amigos Sérgio Romário do IPR/DNIT, Ana Maria da COPPE/UFRJ, Sgt Mozeika, Wanderlei, Sgt Mauro e Sd André, todos do IME, pela amizade, e pelo empenho pessoal que disponibilizaram no auxílio à realização dos ensaios.

Ao Sr. Ronaldo da Costa Maurício – Coord. de Economia Mineral do DRM/RJ, pela receptividade, e envio do cadastro de olarias do estado, bem como o fundamental contato com o Prof. Jonas Alexandre.

As cerâmicas São Silvestre e Marajó no pólo de Itaboraí (RJ); a todas as empresas visitadas no pólo de Campos (RJ); Maicá, Telhas Santarém, Concretap e Tapajoara no pólo de Santarém (PA) pela receptividade, ensinamentos, e disponibilização de informações imprescindíveis à realização deste estudo.

A Carbonífera Metropolitana S/A, na pessoa do Sr. Vânio Joaquim, pelo envio do carvão mineral moído e dados referentes ao uso deste material em peças cerâmicas.

Ao Eng. Eládio Vasconcelos – da Secretaria Municipal de Infra-Estrutura de Santarém (PA) pela disponibilização de dados sobre a pavimentação na região.

A Prof. Consuelo Alves da Frota pela troca de informações sobre a pesquisa da argila calcinada realizada na UFAM, por ocasião da visita à Manaus.

Aos colegas Fabrício Mourão, Izel e à FASFDUC que em momento de grande dificuldade, disponibilizaram o ligante asfáltico necessário à pesquisa.

Ao Prof. Jo Dweck da Escola de Química da UFRJ pela paciência, pelos ensinamentos e pela realização dos ensaios de ATD/ATG.

A LLC INFO CONNECTION pelos ensinamentos em Propriedade Industrial, Marcas e Patentes.

A todos que de alguma forma colaboraram com este desafiante e gratificante trabalho e eu possa ter cometido o desafortunado lapso de aqui ter não citado.

“Árdua é a missão de defender e desenvolver a Amazônia. Muito mais difícil, porém, foi a missão de nossos antepassados em conquistá-la e mantê-la”.

GEN EX RODRIGO OTÁVIO DE JORDÃO RAMOS

“...venham fazer tijolos e queimá-los no fogo e os usemos em lugar das pedras”.

GENESIS, CAP. XI, VERSÍCULO 3

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	14	
LISTA DE TABELAS.....	20	
LISTA DE SIGLAS.....	22	
1	INTRODUÇÃO	26
1.1	Considerações iniciais	26
1.2	Objetivos da dissertação.....	27
1.3	Estrutura da dissertação	28
2	OS AGREGADOS ARTIFICIAIS	30
2.1	Considerações iniciais	30
2.2	Considerações sobre jazidas de agregados naturais	30
2.3	A origem dos agregados artificiais a partir de resíduos industriais	33
2.3.1	Revisão sobre a gestão de agregados artificiais a partir do entulho da construção civil	35
2.4	Agregados artificiais empregados na pavimentação	38
2.4.1	O agregado artificial de escória siderúrgica.....	39
2.4.2	A cinza volante e a cinza pesada	42
2.4.3	Cinza da casca de arroz	45
2.4.4	O agregado reciclado de telha cerâmica	47
2.5	O agregado de argila expandida.....	48
2.5.1	Algumas considerações sobre os processos de produção do agregado de argila expandida	49
2.5.2	A usina de argila expandida da CINASITA	56
2.5.3	Os projetos das usinas de argila expandida do DNER	58
2.5.4	Considerações finais acerca da usina móvel do DNER.....	64
2.6	O agregado de argila calcinada	69
2.6.1	A evolução da pesquisa.....	70
2.6.2	Problemas encontrados e ainda não solucionados	76

3	A TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DOS MATERIAIS CERÂMICOS	78
3.1	Considerações iniciais	78
3.2	Os materiais cerâmicos	79
3.2.1	Definições	79
3.2.2	A indústria cerâmica	81
3.2.3	A cerâmica vermelha	82
3.3	Metodologias utilizadas na obtenção de peças de cerâmica vermelha ..	88
3.3.1	Pesquisa e seleção da matéria-prima.....	89
3.3.1.1	Análise química e capacidade de troca de cátions	98
3.3.1.2	Difração de raios X – DRX.....	107
3.3.1.3	Análise Térmica Diferencial (ATD) e Análise Termogravimétrica (ATG).....	110
3.3.1.4	Microscópio eletrônico de varredura - MEV	114
3.3.2	A produção industrial da cerâmica vermelha.....	116
3.3.2.1	Extração da matéria-prima.....	119
3.3.2.2	Beneficiamento	119
3.3.2.3	Conformação	121
3.3.2.4	Tratamento térmico.....	123
3.3.2.5	Exemplos de fornos	126
3.3.2.6	Consumo de energia.....	139
3.3.3	O controle tecnológico da produção	144
3.3.3.1	A questão da porosidade dos materiais cerâmicos	144
3.4	Estudo de caso: Projetos da região amazônica.....	152
3.4.1	Projeto Argila-Belém.....	153
3.5	Visitas realizadas às indústrias cerâmicas.....	161
3.5.1	Pólo cerâmico de Itaboraí (RJ)	162
3.5.2	Pólo cerâmico de Campos dos Goytacazes (RJ)	168
3.5.3	Pólo cerâmico de Santarém (PA)	174
4	PROPOSTA METODOLÓGICA PARA A PRODUÇÃO E EMPREGO DE AGREGADOS DE ARGILA CALCINADA.....	176
4.1	Considerações iniciais	176

4.2	Estrutura da metodologia.....	176
4.3	1ª Fase da metodologia.....	178
4.3.1	1ª Fase: Ensaios preliminares.....	178
4.3.2	1ª Fase: Ensaios complementares.....	182
4.4	2ª Fase da metodologia.....	188
4.4.1	2ª Fase: Escolha do modelo e produção industrial.....	188
4.5	3ª Fase da metodologia.....	194
4.5.1	3ª Fase: Análise de custos.....	194
4.5.2	3ª Fase: Emprego do agregado em pavimentação.....	196
5	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	208
5.1	Considerações iniciais.....	208
5.2	Caracterização da região de Santarém (PA).....	209
5.2.1	Dados sócio-econômicos.....	209
5.2.2	A questão dos materiais de pavimentação na região.....	211
5.2.3	O pólo cerâmico de Santarém.....	214
5.3	1ª Fase: Ensaios realizados.....	218
5.3.1	Resultados dos ensaios preliminares.....	218
5.3.2	Resultados dos ensaios complementares.....	221
5.3.2.1	Análise química, mineralógica e térmica.....	221
5.3.2.2	Resultados dos ensaios realizados com agregados (corpos de prova) produzidos em laboratório.....	228
5.3.2.3	Estudo adicional da absorção e porosidade.....	234
5.4	2ª Fase: Processo adotado para a produção industrial.....	239
5.4.1	Características da produção.....	240
5.5	3ª Fase: Análise dos custos envolvidos na produção.....	244
5.6	3ª Fase: Emprego do agregado como material de pavimentação.....	248
5.6.1	Mistura solo-agregado.....	249
5.6.2	Mistura asfáltica.....	254
5.6.3	Análise numérica.....	267
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	273
6.1	Considerações finais.....	273
6.2	Conclusões.....	273

6.3	Sugestões de pesquisas futuras.....	281
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	283
8	APÊNDICES	295
8.1	APÊNDICE 1: Fichas dos ensaios de caracterização dos solos.....	296
8.2	APÊNDICE 2: Relatórios e difratogramas da análise química e mineralógica	299
8.3	APÊNDICE 3: Fichas dos ensaios de compactação e ISC (CBR) das misturas solo-agregado	303
8.4	APÊNDICE 4: Relatórios dos ensaios de módulo resiliente das misturas solo-agregado	311
8.5	APÊNDICE 5: Fichas dos ensaios referentes à parte experimental sobre as misturas asfálticas.....	315
8.6	APÊNDICE 6: Relatório do ensaio e previsão da curva de fadiga com o concreto asfáltico produzido	333
9	ANEXOS	336
9.1	ANEXO 1	337
9.2	ANEXO 2	338
9.3	ANEXO 3	339
9.4	ANEXO 4	340
9.5	ANEXO 5	341
9.6	ANEXO 6	342
9.7	ANEXO 7	344
9.8	ANEXO 8	346
9.9	ANEXO 9	349

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG.2.1 Mistura de materiais de resíduos de construção e demolição pela ausência de gestão em demolições	38
FIG.2.2 Detalhe do forno rotativo criado para a fabricação de argila expandida, conforme o documento de patente GB 786500.....	56
FIG.2.3 Fluxograma de fabricação de agregado leve de argila piroexpandida	58
FIG.2.4 Usina protótipo móvel - Unidade de processamento da argila	61
FIG.2.5 Usina protótipo móvel - Unidade de queima.....	62
FIG.2.6 Fluxograma do processo de produção	63
FIG.2.7 Detalhe do dispositivo destorroador e silo dosador	66
FIG.2.8 Carga da argila ao pelletizador.....	67
FIG.2.9 Saída da argila pelletizada para a correia que alimenta o forno rotativo	67
FIG.2.10 Forno rotativo em operação. À direita, o grupo gerador que forneceu energia à usina.....	68
FIG.2.11 Detalhe da saída do forno rotativo em operação, e do conjunto sobre o chassi de uma carreta.....	68
FIG.3.1 Localização de alguns segmentos do setor cerâmico brasileiro.....	82
FIG.3.2 Diagrama granulométrico de Winkler.....	84
FIG.3.3 Fluxograma do processo de fabricação de blocos e telhas.....	86
FIG.3.4 Localização dos principais pólos de cerâmica vermelha em alguns estados do sul/sudeste do país.....	87
FIG.3.5 Certificado de ensaio preliminar para emprego da argila como matéria-prima cerâmica.....	96
FIG.3.6 Difratoograma da Am RB-02	108
FIG.3.7 Difratoograma da Am RB-03 e Am RB-04	108
FIG.3.8 Difratoograma da Am RB-05, Am RB-06, Am RB-07, Am RB-08.....	109
FIG.3.9 Difratoograma da Am RB-09, Am RB-10, Am RB-11, Am RB-12.....	109
FIG.3.10 Curvas ATD esquemáticas de argilominerais.....	111
FIG.3.11 Curvas ATD/ATG da Am RB-01	111
FIG.3.12 Curvas ATD/ATG da Am RB-02	112
FIG.3.13 Curvas ATD (acima) e TG (abaixo) da Am RB-05, Am RB-06, Am RB-	

07, Am RB-08.....	112
FIG.3.14 Curvas ATD (acima) e TG (abaixo) da Am RB-09, Am RB-10, Am RB-11, Am RB-12.....	113
FIG.3.15 Curvas ATD/ATG da Am RB-13 e RB-14 – mistura com 50% de cada	114
FIG.3.16 Microscopia eletrônica de argilas de São Gonçalo do Amarante (RN)	116
FIG.3.17 Fluxograma detalhado da produção de cerâmica vermelha	118
FIG.3.18 Disposição geral de uma fábrica de tijolos	127
FIG.3.19 Forno intermitente de chama invertida, com pontos de controle de temperatura.....	129
FIG.3.20 Evolução das temperaturas de um forno intermitente	130
FIG.3.21 Vistas de topo e corte de forno câmara disposto em forma de anel.....	131
FIG.3.22 Exemplo de forno tipo câmara (HOFFMANN) com o advento de carros de abastecimento.....	132
FIG.3.23 Seção transversal de um forno túnel	134
FIG.3.24 Detalhe da vista frontal do forno Hoffmann	135
FIG.3.25 Corte transversal do forno Hoffmann.....	135
FIG.3.26 Planta geral e cortes do forno Hoffmann	136
FIG.3.27 Planta geral e cortes do forno caieira	138
FIG.3.28 Média geral de custos na indústria cerâmica.....	143
FIG.3.29 Adaptação na alimentação de combustível em forno intermitente (esquerda) e Hoffmann (direita) com queimadores móveis de GN	143
FIG.3.30 Ilustração dos vazios do agregado	145
FIG.3.31 Mapa de localização do Projeto Argila-Belém	153
FIG.3.32 Mapa de ocorrências minerais do Projeto Argila-Belém	154
FIG.3.33 Ocorrências das jazidas de argilas do Projeto Argila-Belém	156
FIG.3.34 Vista interna do galpão com as etapas de preparação e moldagem da matéria-prima	163
FIG.3.35 Detalhe dos silos dosadores de argila e do equipamento triturador na seqüência.....	164
FIG.3.36 Matéria-prima parcialmente homogeneizada seguindo para a umidificação e equipamento misturador.....	164
FIG.3.37 Seqüência das etapas da secagem: transporte; exaustores para secagem; 1ª secagem em galpão; 2ª secagem ao ar	165

FIG.3.38 Seqüência das etapas de queima: vista geral do forno Hoffmann; detalhe do empilhamento; vistas das escotilhas de topo para entrada de combustível.....	165
FIG.3.39 Depósito de matéria-prima e área para sazonalidade.....	166
FIG.3.40 Funcionamento de equipamento misturador com dois eixos de hélices helicoidais	166
FIG.3.41 Depósito e incorporação de carvão mineral moído à massa argilosa antes da etapa de extrusão.....	166
FIG.3.42 Extrusão e corte dos tijolos; extrusão e prensagem de telhas.....	167
FIG.3.43 Estantes móveis sobre trilhos para secagem inicial das telhas e unidade estufa	167
FIG.3.44 Etapa de queima: controle da temperatura; mistura de serragem e carvão utilizado como combustível; carros com termômetro e maçaricos móveis; empilhamento das peças	168
FIG.3.45 Mapa de localização das empresas pertencentes ao Pólo de Campos dos Goytacazes	170
FIG.3.46 Vista geral do forno tipo caieira para tijolos (esquerda) e do tipo abóbada para telhas	172
FIG.3.47 Funcionamento do forno Hoffmann: detalhes do empilhamento (esquerda); abertura entre as peças para entrada da lenha e vista de cima da queima.....	172
FIG.3.48 Forno túnel: queimadores para serragem e/ou gás natural; unidade de pré-tratamento da serragem (direita).	173
FIG.3.49 Forno túnel: carros destinando as peças para a unidade estufa ou unidade de queima final; peças após queima (direita).	173
FIG.3.50 Linha de produção automatizada: após extrusão e corte (esquerda) as peças são destinadas para os carros em esteiras rolantes.....	173
FIG.3.51 Extrusora à vácuo e linha de fornos do laboratório da UENF.....	174
FIG.3.52 Amostra de argila calcinada produzida no IME.	175
FIG.3.53 Presença dos alunos do IME e oficiais do 8 ^o BECnst na Operação Ricardo Franco II.....	175
FIG.4.1 Fluxograma representativo da metodologia.....	177
FIG.4.2 Etapas representativas da 2a fase da metodologia.....	189

FIG.4.3 Determinação das espessuras em função do número “N” e do CBR – Método do DNER.	201
FIG.4.4 Identificação das espessuras – Método do DNER.....	202
FIG.4.5 Fluxograma do método de dimensionamento da resiliência.....	203
FIG.5.1 BR-163 no estado do Pará em outubro de 2.004	210
FIG.5.2 Porto de Santarém.....	210
FIG.5.3 Agregado (seixo) utilizado como material de construção em Santarém	212
FIG.5.4 Flagrante da visita à SEMINF em Santarém (PA)	213
FIG.5.5 Detalhe de depósito de cacos cerâmicos para uso em pavimentação	213
FIG.5.6 Usina de asfalto do 8º BECnst para confecção do AAUQ.....	213
FIG.5.7 Trecho de pavimentação urbana sendo executado pelo 8º BECnst.....	213
FIG.5.8 Depósito de peças inservíveis e perdas da produção.	215
FIG.5.9 Flagrante da entrega de amostra de argila calcinada à empresário ceramista de Santarém.	215
FIG.5.10 Pontos de amostragem de argilas em jazidas de Santarém (NETO et al., 1997).	217
FIG.5.11 Paisagem e identificação das amostras de argila de Santarém.....	218
FIG.5.12 Desagregação manual e secagem das argilas de Santarém.	218
FIG.5.13 Desenho do diagrama com as amostras de argila de Santarém.	220
FIG.5.14 Seqüência da preparação das amostras para o ensaio EDS.	223
FIG.5.15 Execução do ensaio EDS no equipamento MEV do IME.	223
FIG.5.16 Ensaio de análise térmica no IME: paisagem da amostra (acima); conjunto de equipamentos para ATD/ATG (centro); execução do ensaio de ATD (abaixo).	226
FIG.5.17 Curvas da análise térmica diferencial e termogravimétrica.	227
FIG.5.18 Seqüência para produção dos corpos de prova: máquina extrusora do IME, laminação, massa plástica, extrusão e moldagem, queima, corpos de prova.	230
FIG.5.19 Seqüência operacional do ensaio de desgaste por abrasão no aparelho Los Angeles.	232
FIG.5.20 Ensaio da perda de massa por desgaste após fervura.....	233
FIG.5.21 Avaliação da resistência mecânica (10% de finos e resistência ao esmagamento).	233

FIG.5.22 Determinação da perda ao choque no aparelho Treton.	234
FIG.5.23 Amostra de carvão mineral e dos corpos de prova após queima com a incorporação deste produto.....	236
FIG.5.24 Variação da absorção de água do agregado de argila calcinada com a incorporação de carvão mineral moído.	236
FIG.5.25 Variação da absorção de água com o tempo de queima.....	237
FIG.5.26 Variação da absorção de água com a temperatura de queima.	238
FIG.5.27 Execução do ensaio de absorção e densidade aparente do agregado de argila calcinada.	239
FIG.5.28 Detalhe do depósito de argila. De frente, o Sr. Francisco Vieira, proprietário da UP.	243
FIG.5.29 Dispositivo para secagem das peças ao ar.	243
FIG.5.30 Foto do vagão fora do forno com as peças empilhadas.	244
FIG.5.31 Vista geral dos dois fornos tipo túnel e do sistema de trilhos para o deslocamento dos vagões.....	244
FIG.5.32 Dispositivo de controle da temperatura embutido na parede do forno túnel.	244
FIG.5.33 Detalhe da lenha empregada como combustível e da instalação do novo sistema de queima (acima).	244
FIG.5.34 Gráfico proveniente da planilha de custos mensais da fabricação de tijolo maciço na UP de Santarém (PA).	247
FIG.5.35 Relatório e curvas do ensaio de módulo com a amostra de sub-leito do Km 174 da BR-163/PA.....	250
FIG.5.36 Esquema representativo dos ensaios com os resultados de ISC e $M_{R_{médio}}$ das misturas solo-agregado.....	251
FIG.5.37 Curva granulométrica de projeto das misturas solo-agregado e os limites da faixa especificada para o tráfego escolhido	252
FIG.5.38 Mistura solo-agregado com brita comercial do RJ – detalhe da preparação, homogeneização e a mistura na umidade ótima.....	252
FIG.5.39 Mistura solo-agregado com a argila calcinada industrial: separação e posterior homogeneização das amostras de agregado e de solo do sub- leito da BR-163.	253
FIG.5.40 Preparação para ensaio de módulo: Mistura na umidade ótima; molde	

tri-partido para conformação do corpo-de-prova (CP) de 10cm x 20cm; compactador elétrico do CP.....	253
FIG.5.41 Equipamento triaxial do IME para a realização do ensaio de módulo de resiliência. Detalhe de um CP após o ensaio.....	254
FIG.5.42 Forma do agregado original proveniente de Santarém. Nota-se a presença ainda de algumas peças cilíndricas e de superfícies externas arredondadas.	255
FIG.5.43 Forma do agregado de argila calcinada industrial após o beneficiamento (re-britagem) em laboratório.	255
FIG.5.44 Detalhe do beneficiamento dentro das granulometrias a serem empregadas por ocasião da dosagem da mistura asfáltica.	255
FIG.5.45 35 Kg de agregados de argila calcinada industrial separados por peneiras para atender a curva de projeto (à esquerda no IME, e à direita no IPR/DNIT).....	257
FIG.5.46 Execução da dosagem pelo método Marshall com teor de ligante de 8% (esq.) e 9% (dir.).	260
FIG.5.47 Execução da dosagem pelo método Marshall com teor de ligante de 10% (esquerda) e 11% (direita).	260
FIG.5.48 Corpos de prova com teores de 8%, 9%, 10% e 11% de ligante asfáltico (esquerda) e todos os CP's no teor de 8,7% (direita).	261
FIG.5.49 Detalhe de um corpo de prova com o teor de ligante pela dosagem Marshall de 8,7%.	261
FIG.5.50 Gráfico comparativo entre as alternativas de cálculo (DMTC e DMM).	263
FIG.5.51 Execução do ensaio Rice: banho com temperatura controlada; aplicação de vácuo na mistura.....	263
FIG.5.52 Ensaio Rice: Procedimento adicional para agregados porosos.....	264

LISTA DE TABELAS

TAB.2.1 Composição química preferencial da argila para a “argila queimada” do documento de patente GB465318	55
TAB.2.2 Ensaio provenientes do Texas Highway Department	70
TAB.2.3 Evolução da pesquisa sobre o agregado de argila calcinada no IME.....	71
TAB.2.4 Outras pesquisas sobre o agregado artificial de argila calcinada	75
TAB.3.1 Escalas granulométricas para a fração argila	80
TAB.3.2 Produção anual dos segmentos do setor cerâmico	81
TAB.3.3 Composição granulométrica dos produtos de cerâmica vermelha, de acordo com o Diagrama de Winkler.	84
TAB.3.4 Caracterização da escória de aciaria através da análise química, ATD, ATG e difração de raios X.	97
TAB.3.5 Normas preconizadas para a 1ª Fase (item 3.3.1).	98
TAB.3.6 Valores usuais da CTC de alguns argilominerais.	105
TAB.3.7 Base de dados com amostras de argilas caracterizadas encontradas na bibliografia.....	106
TAB.3.8 Composição química das argilas pesquisadas.....	106
TAB.3.9 Poder calorífico de materiais combustíveis e valor correspondente em tep – tonelada equivalente de petróleo	140
TAB.3.10 Perfil da indústria cerâmica no Amazonas.....	141
TAB.3.11 Perfil da indústria cerâmica no RN	141
TAB.3.12 Funções dos componentes presentes nas matérias-primas dos corpos cerâmicos.....	148
TAB.3.13 Características e propriedades de corpos cerâmicos à base de argila, com resíduos redutores de plasticidade.....	149
TAB.3.14 Características e propriedades de tijolos com resíduos fundentes.....	150
TAB.3.15 Registros de indústrias cadastradas pelo Projeto Argila-Belém	158
TAB.3.16 Produção do setor cerâmico no Rio de Janeiro	169
TAB.3.17 Divisão do Pólo de Campos dos Goytacazes (RJ)	169
TAB.4.1 Ensaio preconizados para a etapa preliminar	179
TAB.4.2 Faixas de especificação para a composição química de argilas	

adequadas para a produção de agregado artificial calcinado.	183
TAB.4.3 Ensaio preconizado para a etapa complementar de teste de seleção de matéria-prima para produção de agregado artificial calcinado.....	185
TAB.4.4 Limites especificados dos resultados para os ensaios com corpos de prova da etapa complementar.....	187
TAB.5.1 Empresas cerâmicas visitadas em Santarém (PA).....	215
TAB.5.2 Resultados da caracterização das amostras de Santarém (PA)	219
TAB.5.3 Composição granulométrica das amostras de Santarém de acordo com o Diagrama de Winkler.....	220
TAB.5.4 Composição química pelos métodos EDS e Fluorescência	224
TAB.5.5 Argilominerais presentes nas amostras provenientes de Santarém.....	225
TAB.5.6 Escolha da temperatura de trabalho para a produção do agregado.....	230
TAB.5.7 Resultados dos ensaios de resistência mecânica com agregados de argila calcinada e a brita comercial do Rio de Janeiro	231
TAB.5.8 Ensaio de resistência mecânica com a Argila Calcinada Industrial	243
TAB.5.9 Planilha de custos mensais da produção de tijolo maciço na UP.	246
TAB.5.10 Granulometria, LL, LP e ISC do solo utilizado.....	249
TAB.5.11 Composição granulométrica das misturas solo-agregado.	251
TAB.5.12 Comparativo de desempenho de concretos asfálticos para a R_T e M_R	265
TAB.5.13 Índice de degradação Marshall com o agregado de argila calcinada	266
TAB. 5.14 Dados do projeto de pavimentação da BR-163/PA	267
TAB. 5.15 Comparativo entre as estruturas do pavimento para a BR-163/PA.....	268

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEPAC	Associação Nacional de Entidades de Produtores de Agregados Construção Civil
ART	Agregado reciclado de telhas
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATD	Análise térmica diferencial
ATG	Análise termogravimétrica
ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry
BECnst	Batalhão de Engenharia de Construção
BMP	Borracha moída de pneus
CBUQ	Concreto betuminoso usinado a quente
CBR	Califórnia Bearing Ratio
CCA	Cinza da casca de arroz
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Coordenação de Pós-Graduação Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CTC	Capacidade de troca de cátions
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
DNPM	Departamento Nacional da Produção Mineral
DRM-RJ	Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro
DRX	Difração de raios X
EDS	Energy dispersive spectrometry
ELSYM	Elastic Layered System
EPO	European Patent Office
FEPAVE	Finite Element Analysis of Pavement
FUNTAC	Fundação de Tecnologia do Estado do Acre
GN	Gás natural de petróleo
IME	Instituto Militar de Engenharia
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
INT	Instituto Nacional de Tecnologia
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LDH	Louisiana Department of Highways

MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MT	Ministério dos Transportes
NCAT	National Center for Asphalt Technology
PMF	Pré-misturado a frio
RCD	Resíduo de construção e demolição
SEMINF	Secretaria Municipal de Infra-Estrutura de Santarém (PA)
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SUCS	Sistema unificado de classificação de solos
THD	Texas Highway Department
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense
UFAM	Universidade Federal do Amazonas
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UNIT	Unidade de Infra-Estrutura Terrestre
UR	Umidade relativa do ar
USACE	United States Army Corps of Engineers
USPTO	United States Patent and Trademark Office

RESUMO

A pesquisa sobre a produção de agregados cerâmicos e sua utilização em pavimentação rodoviária, no país, teve seu início na década de 80, com os estudos do Instituto de Pesquisas Rodoviárias, do antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (IPR/DNER), sobre a viabilidade de produção e emprego de agregados de argila expandida na região norte. Os resultados preliminares indicaram custos elevados de produção desse tipo de agregado, inviabilizando o prosseguimento dos estudos. Nos últimos anos, pesquisas desenvolvidas no Instituto Militar de Engenharia (IME) têm se direcionado, com sucesso, à obtenção de agregados de menor custo, obtidos por calcinação de solos argilosos selecionados e à análise do seu comportamento em misturas asfálticas.

A fase atual da pesquisa está direcionada à obtenção de respostas relativas à produção em escala industrial dessa alternativa como material de pavimentação. Conseqüentemente, as questões referentes aos custos de fabricação são também relevantes, principalmente para regiões com escassez do agregado pétreo, ressaltando assim a vantagem econômica do agregado cerâmico.

A presente dissertação de mestrado na área de infra-estrutura de transportes descreve um processo metodológico proposto para a fabricação e utilização desse tipo de agregado artificial em pavimentação rodoviária. Pretende-se com este estudo, fornecer subsídios indispensáveis ao processo decisório da escolha de materiais de pavimentação em regiões que apresentem carência de agregados de origem rochosa, apresentando a seqüência de operações a serem desenvolvidas desde a prospecção da matéria-prima necessária até a sugestão de unidades-modelo capazes de atender a todas as etapas de produção do agregado, indicando protótipos que possam produzir os agregados artificiais de argila calcinada com características adequadas à utilização em pavimentação, respeitando as condições e limitações regionais.

Através de experimentos realizados em laboratório no presente estudo, foi constatada a viabilidade técnica de uma produção industrial experimental do agregado artificial de argila calcinada. São também apresentados os resultados das propriedades de resistência mecânica, porosidade e absorção, mistura solo-agregado, mistura asfáltica, e conseqüentemente dos custos envolvidos com esta pioneira produção experimental.

ABSTRACT

The research over the production of ceramic aggregates for road paving, in the country, had its beginning in the decade of 80's, with the studies of IPR/DNER, beyond the production viability and employment of expanded clay aggregates in the north area. The preliminary results indicated high production costs of such aggregate, making unfeasible the continuity of such studies. In the last years, researches developed at the Institute of Military Engineering (IME) addressed, with success, the obtaining of low cost aggregates, obtained by calcination of selected clay soils and to the analysis of its behavior in asphalt mixtures.

The current phase of this scientific research is addressed to obtain answers that could resolve the production in industrial scale of this solution as paving material. Consequently, the subjects about the production costs are also priority, mainly for areas without rocks, emphasizing this way, the ceramic aggregates economical advantage.

The present infrastructure transportation master's thesis describes a methodological process proposed for the production and employment of such aggregate in road paving. It is intended with this study, to supply indispensable subsidies to the process of paving materials choice for areas that present this lack of rocks, from the selection of the raw material to be used, until the unit-model suggestion capable to assist all stages of production of the aggregate, indicating prototypes that can produce the artificial calcined clay aggregates with appropriate characteristics to its use in paving, being respected the conditions and regional limitations.

Through laboratory experiments accomplished at the present study, the technical feasibility of an experimental industrial production of the artificial calcined clay aggregates was verified. It is also presented the results of the mechanical resistance properties, porosity and absorption, soil-aggregate mixture, hot mix asphalt concrete, and consequently all the costs involved with this pioneer experimental production.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A pesquisa científica visando a obtenção de matérias-primas que propiciem a fabricação e o emprego de agregados artificiais na construção civil teve a sua ênfase nos últimos anos, a nível mundial, em particular naqueles países onde a carência de jazidas de material pétreo é a principal condicionante para a engenharia local.

Não tendo como limitativo apenas a questão da formação geológica desfavorável, mas também em relação aos aspectos ambientais, ressalta-se a crescente preocupação com a atividade de exploração e operação de pedreiras, devido ao uso de explosivos e detonantes, principalmente quando estes estão próximos a áreas urbanas, e também da escassez de alguns tipos de rochas em determinadas regiões, cuja causa vem a ser a exploração não planejada destas jazidas, o que resulta em impactos irreversíveis ao meio ambiente.

No Brasil, os principais estudos voltados para a busca de tecnologias relacionadas aos agregados artificiais vêm avançando continuamente em face dos esforços de pesquisas científicas e estratégicas levadas a efeito.

Particularmente, e de forma pioneira, uma destas pesquisas vêm sendo desenvolvida pelo Instituto Militar de Engenharia (IME) com o interesse de ratificar a solução do agregado artificial de argila calcinada para a diminuição de custos com a pavimentação. Mais especificamente, tal desenvolvimento visa a região norte do país onde existe a carência de jazidas pétreas, e onde estão situados alguns dos Batalhões de Engenharia de Construção, que freqüentemente estão encarregados da construção ou conservação de diversos corredores rodoviários que agregam valores sócio-econômicos indispensáveis ao desenvolvimento regional, integração nacional e manutenção de políticas estratégicas locais.

A partir dos resultados revelados nas pesquisas anteriores que comprovaram a viabilidade técnica desta alternativa do agregado artificial de argila calcinada, tornou-se uma conseqüência natural, a obtenção de respostas relativas à passagem da produção em laboratório para a escala industrial dessa alternativa como material de pavimentação.

Conseqüentemente, as questões relativas aos custos de fabricação tornam-se simultaneamente relevantes, a fim de evidenciar a vantagem econômica do agregado cerâmico comparativamente à aquisição dos agregados naturais de origem rochosa, para os casos citados de escassez de jazidas que ocasionam elevados custos de transporte, ou de fatores ambientais, onde ambos justifiquem o emprego de materiais de pavimentação alternativos.

1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação tem como objetivo principal uma proposta metodológica direcionada ao processo industrial de produção, bem como as diversas fases anteriores à obtenção do agregado artificial de argila calcinada. Ou seja, desde a seleção e prospecção de jazidas da matéria-prima necessária à fabricação deste tipo de agregado artificial, até a definição das condicionantes relacionadas às unidades de produção providas com a finalidade de atender todas as etapas de preparação, moldagem, queima, assim como de aplicação do agregado artificial de argila calcinada.

De forma simplificada, procura-se conceber, com este objetivo principal, a elaboração de um roteiro operacional, que propicie a alternativa do agregado artificial de argila calcinada ao técnico que esteja em processo de análise dos materiais de pavimentação a serem empregados em seu empreendimento viário, principalmente se estiver em localidades de escassez de agregados naturais, ou nos casos de restrições ambientais à exploração das jazidas minerais rochosas, e assim possa verificar a possibilidade de implantar e utilizar esta tecnologia do agregado artificial de argila calcinada já comprovada viável tecnicamente, em estudos anteriores.

São também objetivos adicionais do presente estudo, a verificação dos resultados obtidos com este agregado artificial em determinadas situações, mais especificamente decorrentes de sugestões e recomendações proferidas em estudos anteriores a esta dissertação, conforme listadas a seguir:

- Ampliar a base de dados composta pelos resultados existentes relativos aos ensaios de viabilidade técnica deste tipo de agregado artificial. A partir destes resultados, deseja-se eliminar algumas variáveis que ainda denotam algumas

dúvidas sobre a produção do agregado artificial, tais como a temperatura de queima, tempo de queima, composição química e mineralógica da amostra;

- Efetuar um estudo relativo à absorção do agregado artificial de argila calcinada, e verificar a existência de aditivos capazes de reduzir desta porosidade;
- Analisar o comportamento de uma mistura solo-agregado utilizando o agregado artificial de argila calcinada, para emprego em camadas de sub-base e base para pavimentação, sob a ótica dos métodos empírico e mecanístico, e comparar o resultado com uma mistura semelhante que utilize o agregado natural;
- Verificar o comportamento de misturas asfálticas com o agregado artificial de argila calcinada, e observar o teor de ligante obtido quando empregado um agregado menos poroso;
- Comparar os resultados e registrar as conseqüências decorrentes da execução de ensaios por diferentes métodos de medidas das densidades do agregado e da mistura asfáltica, particularmente pelo método da Louisiana e do DNER (para medida da densidade do agregado); e pelo método de Rice e do DNER (para medida da densidade da mistura);
- Elaborar uma mistura asfáltica cuja granulometria dos agregados seja composta com 100% de agregados provenientes de argila calcinada, inclusive o fíler.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está composta por 6 (seis) capítulos, 6 (seis) Apêndices e 7 (sete) Anexos, de acordo com a seguinte estrutura:

No Capítulo 1 são apresentadas as generalidades, uma abordagem sumária sobre o assunto que será desenvolvido, os objetivos, e a constituição desta dissertação.

No Capítulo 2 relata-se uma síntese sobre metodologias para produção de agregados artificiais, assim como das matérias-primas necessárias à obtenção destes agregados e a disponibilidade das mesmas. Destaca-se ainda neste capítulo, a experiência adquirida com os métodos de fabricação do agregado de argila expandida em outros países, e a experiência brasileira segundo o estudo do DNER, materializada em um protótipo de usina móvel para produção do agregado leve.

Encerra-se este capítulo com um resumo histórico sobre a evolução do estudo

do agregado artificial de argila calcinada; e por último com o registro dos problemas encontrados até o presente estudo e ainda não solucionados.

O Capítulo 3 contempla o estado da arte sobre os materiais cerâmicos, mais especificamente sobre o ramo da cerâmica vermelha. São descritas algumas metodologias utilizadas para a caracterização e classificação das matérias-primas empregadas na fabricação de peças convencionais, os tipos de fornos e equipamentos que são utilizados pelas indústrias cerâmicas (olarias).

No intuito de agregar conhecimento à presente pesquisa, são apresentados os dados levantados em estudos sobre argilas da região amazônica, assim como de visitas técnicas realizadas em alguns pólos cerâmicos dos estados do Rio de Janeiro e Pará.

No Capítulo 4, estão listadas e descritas todas as etapas constituintes da proposta metodológica. Tem por finalidade a produção e o emprego do agregado artificial de argila calcinada, desde a prospecção de uma jazida com a matéria-prima argilosa, passando pelas etapas de caracterização física, química e mineralógica e relatando as faixas de especificação que esta matéria-prima deve atender; a seguir, detalhando as etapas de produção em si do agregado, quer seja em uma unidade do tipo usina móvel, ou ainda em uma unidade fabril cerâmica convencional (olaria).

No Capítulo 5 apresenta-se um exemplo prático de aplicação desta proposta metodológica, com a utilização de amostras de solos provenientes da região de Santarém (PA), e da mesma forma, com amostras de agregados de argila calcinada provenientes de uma produção experimental efetuada exclusivamente para este estudo, em uma indústria cerâmica, também localizada em Santarém (PA).

No Capítulo 6 são relatadas as conclusões da pesquisa realizada, assim como, as recomendações para desenvolvimentos futuros sobre o tema em análise.

Nos Apêndices da dissertação, estão as fichas com os dados dos principais ensaios realizados.

Nos Anexos, constam as normas utilizadas para os ensaios de medição da densidade dos agregados e das misturas asfálticas, e as plantas referentes ao Projeto Argila-Belém.

2 OS AGREGADOS ARTIFICIAIS

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o uso de agregados artificiais na engenharia, a sua origem e justificativa, os respectivos métodos de obtenção da matéria-prima necessária à fabricação destes agregados artificiais, a disponibilidade destas matérias-primas e os processos desenvolvidos para a produção industrial destes agregados.

É também apresentada uma síntese sobre a produção do agregado de argila expandida em outros países, com maior foco sobre as etapas de prospecção da matéria-prima, e dos procedimentos e equipamentos empregados na fabricação deste tipo de agregado. Da mesma forma, é relatada a experiência da primeira usina móvel projetada e construída no Brasil, para produzir agregados de argila expandida em um estudo pioneiro para a região amazônica.

Com o intuito de prover um melhor entendimento dos objetivos propostos na presente dissertação, é feito um breve resumo histórico dos estágios do desenvolvimento da tecnologia do agregado artificial de argila calcinada. Sendo assim, são apresentados os problemas encontrados nos estudos anteriores, as sugestões e recomendações feitas para estudos subseqüentes e conseqüentemente a forma na qual a presente dissertação aborda e propõe soluções a cada um destes temas.

2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE JAZIDAS DE AGREGADOS NATURAIS

Atualmente, o conceito de que areias e rochas para britagem são facilmente encontradas na natureza já vem sendo encarado de forma diferente. Somado a esta nova concepção, o custo crescente do transporte de insumos também tem contribuído para encarecimento do preço para o consumidor final.

Idealmente, os pontos de produção devem ficar o mais próximo possível dos pontos de consumo, o que torna antieconômico boa parte dos recursos minerais para areia e rocha disponíveis na natureza.

Entretanto, nem sempre as condições ideais são encontradas. Há regiões onde os recursos disponíveis estão distantes. Um exemplo urbano (muito comum na região norte), é o município de Manaus (AM), onde rochas para brita não são encontradas, sendo então utilizados outros materiais em sua substituição, tal como o seixo ou o cascalho. Na Bacia do Paraná, como é geologicamente conhecida boa parte da região Sul e Sudeste do país, afloramentos de rocha para britagem são difíceis de serem encontrados, criando-se a necessidade de transportar a brita por distâncias superiores a 100 km.

Muitas vezes, mesmo havendo recurso mineral disponível, este não pode ser extraído devido a restrições à sua exploração. Caso típico de restrição encontramos na cidade do Rio de Janeiro, onde acima da cota 100 é proibida a extração de rocha, restringindo tanto o nível de produção quanto a vida útil das pedreiras em operação, além de inviabilizar a abertura de novas pedreiras. Áreas de proteção ambiental, como o caso do Rio de Janeiro, existem em todo país, criando restrições ao uso dos recursos minerais existentes (VALVERDE, 1997).

Além das restrições ambientais, leis de zoneamento municipais restritivas também impedem o aproveitamento dos recursos existentes. Muitas cidades brasileiras estão encravadas em bacias sedimentares ou vales de rios, inviabilizando o aproveitamento da areia existente. Outras estão localizadas sobre maciços rochosos. Frequentemente, as autoridades administrativas locais adotam como objetivo, a promoção do desenvolvimento industrial em detrimento da produção de agregados em seus territórios, aparentemente sem perceberem que estas duas atividades são interdependentes.

Mesmo que não haja zoneamento municipal restritivo à mineração, a própria expansão urbana torna o acesso a esses recursos minerais inviável. As ocupações desordenadas de várzeas e morros nos grandes centros urbanos expulsam os portos-de-areia e as pedreiras, seja pela ação política dos habitantes, seja pelo encarecimento da propriedade. Na Região Metropolitana de São Paulo, recursos importantes de areia foram suprimidos por loteamentos residenciais e industriais legais e clandestinos. Apesar de terem sido cubados na região cerca de 6 bilhões de metros cúbicos de areia, pelo Projeto Bases para o Planejamento de Areia na Região Metropolitana de São Paulo; pela combinação de restrições, usos competitivos do solo e inadequado planejamento, esta região importa mais da

metade de suas necessidades de areia de locais a mais de 150 Km de distância, o que é um verdadeiro contra-senso (VALVERDE, 1997).

A vista destas considerações, deve-se levar em conta o planejamento local existente e/ou as restrições que a sociedade impõe à atividade. Em outras palavras, de nada vale a existência de reservas de ótima qualidade, quantidade e localização, se a sociedade ou órgãos ambientais restringem, impedem ou não aproveitam de forma racional e planejada a sua exploração.

Em face destas condições particularizadas, mas não limitativas, adicionados aos fatores de custos, é que são justificadas as pesquisas direcionadas à aplicação de agregados artificiais na engenharia, mais especificamente na pavimentação, onde são necessários grandes quantitativos de insumos desta natureza.

Além desta demanda quantitativa, pois os agregados que compõem as misturas asfálticas para pavimentação representam geralmente de 90 a 95% em peso e 70 a 85% em volume; em termos estruturais, esta parcela mineral é em parte a responsável pela capacidade de suporte de cargas dos revestimentos, influenciando assim o desempenho dos pavimentos. Na pavimentação asfáltica o agregado é também usado comumente na base e eventualmente na sub-base. Na pavimentação rígida o agregado é usado na confecção do concreto de cimento Portland (MARQUES, 2001).

Apenas a título de padronização da terminologia utilizada, deve-se registrar que na bibliografia pesquisada sobre o assunto, os termos “agregados artificiais” (*artificial aggregates*) e “agregados sintéticos” (*synthetic aggregates*), podem ser considerados de mesmo significado, embora a denominação de “sintético” seja mais encontrada em publicações provenientes dos Estados Unidos, e conseqüentemente foi o termo adotado nas especificações brasileiras do DNER. Já em publicações de origem européia, é mais freqüente encontrar o termo “artificial”.

Ainda sobre este assunto, são encontrados também alguns outros termos que dizem respeito ao agregado de “argila expandida” (*expanded clay*), principalmente alguns termos comerciais (ver item 2.5.1). Mas certamente, o termo “agregado leve” (*lightweight aggregate*) vem a ser o mais encontrado, e de maneira uniforme para todos os países, quando se trata do agregado de “argila expandida”.

Ainda assim, esta denominação de agregado leve também pode ser encontrada quando se tratar de agregado proveniente da escória siderúrgica (*slag*) ou até

mesmo proveniente das cinzas volantes (*fly ashes*) ou cinzas pesadas (*bottom ashes*).

Já para o agregado cerâmico sem que o mesmo atinja o nível de expansão (tratado com maior ênfase neste estudo), embora seja de rara freqüência a sua citação em publicações internacionais como agregado para a engenharia, podem ser encontrados termos do tipo *calcined* (ou *calcinated*) *clay*, ou ainda *burnt* (ou *burned*) *clay*.

O termo adotado, e a ser utilizado na presente dissertação, é o de agregado artificial de argila calcinada, ou apenas agregado de argila calcinada.

2.3 A ORIGEM DOS AGREGADOS ARTIFICIAIS A PARTIR DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS

No modelo atual de produção, os resíduos sempre são gerados seja para bens de consumo duráveis (imóveis, obras públicas) ou não-duráveis (embalagens descartáveis). Neste processo, a produção quase sempre utiliza matérias-primas não-renováveis de origem natural. Este modelo não apresentava problemas até recentemente, em razão da abundância de recursos naturais e menor quantidade de pessoas incorporadas à sociedade de consumo.

Com a intensa industrialização, advento de novas tecnologias, crescimento populacional, aumento de pessoas em centros urbanos e diversificação do consumo de bens e serviços, os resíduos se transformaram em graves problemas urbanos com um gerenciamento oneroso e complexo considerando-se volume e massa acumulados, principalmente após 1980. Os problemas se caracterizavam por escassez de área de deposição de resíduos causadas pela ocupação e valorização de áreas urbanas, altos custos sociais no gerenciamento de resíduos, problemas de saneamento público e contaminação ambiental (ÂNGULO, 2001).

Na verdade, sabe-se que ações isoladas não irão solucionar os problemas advindos por estes resíduos e que a indústria deve tentar fechar seu ciclo produtivo de tal forma que minimize a saída de resíduos e a entrada de matéria-prima não renovável.

De forma geral, estes ciclos para a construção tentam aproximar a construção civil do conceito de desenvolvimento sustentável, entendido como um processo que leva a mudanças na exploração de recursos, na direção dos investimentos, na

orientação do desenvolvimento tecnológico e nas mudanças institucionais, todas visando à harmonia e ao entrelaçamento nas aspirações e necessidades humanas presentes e futuras. Este conceito não implica somente multidisciplinariedade, envolve também mudanças culturais, educação ambiental e visão sistêmica (ANGULO, 2001).

Desta forma, a reciclagem de resíduos industriais para utilização na construção civil pode gerar inúmeros benefícios, tais como estes citados a seguir:

- Redução no consumo de recursos naturais não-renováveis, quando substituídos por resíduos reciclados (JOHN, 2000).

- Redução de áreas necessárias para aterro, pela minimização de volume de resíduos pela reciclagem. Destaca-se aqui a necessidade da própria reciclagem dos resíduos de construção e demolição, que representam mais de 50% da massa dos resíduos sólidos urbanos (PINTO, 1999 apud ÂNGULO, 2001).

- Redução do consumo de energia durante o processo de produção. Destaca-se a indústria do cimento, que usa resíduos de bom poder calorífico para a obtenção de sua matéria-prima (co-incineração) ou utilizando a escória de alto forno, resíduo com composição semelhante ao cimento (JOHN, 2000).

- Redução da poluição; por exemplo, para a indústria de cimento, que reduz a emissão de gás carbônico utilizando escória de alto forno em substituição ao cimento portland (JOHN, 1999).

Embora a redução na geração de resíduo seja sempre uma ação necessária, ela é limitada, uma vez que existem impurezas na matéria-prima, envolve custos e patamares de desenvolvimento tecnológico (JOHN, 2000).

A maior experiência brasileira na utilização de produtos gerados por outras indústrias na produção de materiais de construção civil é a conduzida pela indústria de cimento, que recicla principalmente escórias básicas de alto forno e cinzas volantes. YAMAMOTO et al. (1997) estimam que em 1996 a indústria de cimento brasileira ao adotar a reciclagem maciça de cinzas volantes e escórias granuladas básicas de alto forno, além da calcinação de argilas e adição de fíler calcário, reduziu a geração de CO₂ em 29% e obteve uma economia de combustível de 28%.

Durante as últimas décadas, foram divulgadas algumas tentativas de se substituir a matéria-prima proveniente de rochas quando da necessidade de emprego de agregados, principalmente na pavimentação. Esta busca por agregados

alternativos em geral, está relacionada à proximidade de ocorrência em grandes quantidades destes resíduos que tem se mostrado adequado em sua utilização como agregados artificiais, e conseqüentemente das fábricas ou usinas geradoras destes expurgos.

Até o presente momento, são registrados exemplos de aplicações destes agregados artificiais conforme já foram alguns deles brevemente citados, e estão listados a seguir:

- A escória proveniente da indústria siderúrgica (na verdade, neste caso existem dois tipos de resíduos distintos, a escória de alto-forno e de aciaria);
- A cinza volante e a cinza pesada provenientes de usinas termoelétricas;
- A cinza proveniente da casca de arroz;
- A própria reciclagem de uma camada de revestimento asfáltico envelhecido;
- A borracha triturada de pneus, ou também denominada de borracha moída de pneus (BMP), que sob um dos processos de utilização, o processo à seco, as partículas de borracha de pneus trituradas substituem parte dos agregados constituintes da mistura asfáltica, sendo designado “agregado-borracha”, e que após a adição do cimento asfáltico, formam um novo produto denominado “concreto asfáltico modificado com adição de borracha” (Patriota et al., 2004);
- Os rejeitos de construção civil (entulho).

São feitas, a seguir, considerações a respeito de cada uma destas alternativas, separadamente, para que seja possível agregar conhecimento sobre as ocorrências das matérias-primas, metodologias utilizadas na reciclagem destes resíduos, e o respectivo emprego na engenharia.

Particularmente para o agregado de entulho da construção civil, mas que pode ser estendida aos outros tipos de agregados artificiais, são levantadas questões relativas aos processos de gestão, que revelam como são imprescindíveis as etapas de análise e seleção da matéria-prima que será posteriormente convertida em agregado artificial.

2.3.1 REVISÃO SOBRE A GESTÃO DE AGREGADOS ARTIFICIAIS A PARTIR DO ENTULHO DA CONSTRUÇÃO CIVIL

A utilização de resíduos de entulhos da construção civil, ou como também são

chamados de resíduos de construção e demolição (RCD) foi iniciada na Europa após a segunda guerra mundial a partir de 1946, com o objetivo de reconstruir diversas cidades européias que tiveram seus edifícios demolidos. Neste contexto, ao mesmo tempo em que se retiravam as ruínas processavam-se materiais de construção. Nos Estados Unidos, seu aproveitamento é realizado há mais de 30 anos, para produzir agregados artificiais.

No Brasil, esta tecnologia encontra-se em evolução, motivado pelo crescente déficit habitacional, dos motivos ambientais, da escassez e da demanda de agregados em alguns estados da região norte, especialmente se comparada com países europeus. Recentemente, foram elaboradas normas (ABNT) específicas para este tipo de agregado:

→ NBR 15112: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.

→ NBR 15113: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projetos, implantação e operação.

→ NBR 15114: Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto implantação e operação.

→ NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos.

→ NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

Particularmente, como é o caso da Holanda, a fração reciclada pode atingir cerca de 90% e já se discute a certificação do produto, contando com mais de 40 usinas de reciclagem de entulho (HENDRICKS, 1994; AMORIM et al., 1999).

Este atraso tem vários componentes. Em primeiro lugar, os repetidos problemas econômicos e os prementes problemas sociais ocupam a agenda de discussões políticas. Mesmo a discussão mais sistemática sobre resíduos sólidos é recente. No Estado de São Paulo só recentemente iniciou-se a discussão de uma Política Estadual de Resíduos Sólidos, na forma de um texto de lei aprovado pelo Conselho Estadual de Meio Ambiente. Este projeto de Lei estabelece uma política sistemática de resíduos, incluindo ferramentas para minimização e reciclagem de resíduos.

A inexistência de marcas de qualidade ambiental de produtos demonstra que,

diferente de outros países, as empresas brasileiras que eventualmente reciclem não utilizam sua contribuição ambiental como ferramenta de marketing, apesar do consumidor, mantido o preço e a qualidade, preferir produtos com menor impacto ambiental (MORENO, 1998 apud ÂNGULO, 2001). Uma das causas possíveis para este aparente desinteresse é um eventual receio de que o público consumidor leigo associe o produto reciclado a produto de baixa qualidade. Esta dúvida somente pode ser resolvida através de pesquisa de mercado.

A variação da porcentagem da reciclagem dos RCD em diversos países é função da disponibilidade de recursos naturais, distância de transporte entre reciclados e materiais naturais, situação econômica e tecnológica do país e densidade populacional.

Embora já se observe no mercado a movimentação de empresas interessadas em explorar o negócio de reciclagem de RCD e não apenas o negócio de transporte, as experiências brasileiras estão limitadas em ações das municipalidades que buscam reduzir os custos e o impacto ambiental negativo da deposição da enorme massa de entulho, em média de 0,5 ton/hab. ano, segundo dados obtidos (PINTO, 1999 apud ÂNGULO, 2001) em meio urbano para algumas cidades brasileiras de médio e grande porte.

Um dos problemas mais graves nos RCD é a variabilidade de composição e conseqüentemente, de propriedades desses agregados reciclados.

A recente introdução maciça de gesso na forma de revestimentos ou placas no Brasil pode ser um complicador para a reciclagem dos RCD, caso processos de controle não sejam instalados em Centrais de Reciclagem. A solução para alguns contaminantes presentes nos RCD (plásticos, ferros e madeiras) pode ser o emprego de tanques de depuração por flotação e separadores magnéticos; mas, em alguns casos, a retirada das fases contaminantes pode ser algo bem mais complexo, como compostos orgânicos voláteis e hidrocarbonetos.

A solução para a variabilidade da composição e das outras propriedades desses agregados pode ser o manejo em pilhas de homogeneização, reduzindo esta variabilidade. O que se sugere, é o emprego dos agregados em diversas finalidades, porém com um adequado controle, permitindo a valorização do resíduo e não simplesmente destiná-lo para as necessidades da pavimentação, que possuem critérios de exigência diferenciados, e aparentemente podem denotar uma maior

aceitação (ÂNGULO, 2000).

O que se pretende tomar como experiência desta alternativa que é praticada com muita propriedade em outros países, é que os processos de gestão adotados afetam as características dos resíduos, incluindo as possibilidades de reciclagem. Considerado em um processo tradicional como um estorvo ou problema, o resíduo, especialmente se não perigoso, não é freqüentemente tratado como produto.

Como o processo de demolição no Brasil não é seletivo (FIG. 2.1), o resíduo de construção e demolição disponível é um resíduo misto de concretos, alvenarias, revestimentos e outros. E esta mistura reduz as possibilidades de utilização do resíduo como produto reciclado (ÂNGULO et al., 2003).



FIG.2.1 Mistura de materiais de resíduos de construção e demolição pela ausência de gestão em demolições (JOHN, 2000).

2.4 AGREGADOS ARTIFICIAIS EMPREGADOS NA PAVIMENTAÇÃO

A pedra britada como agregado natural, sempre figurou como um dos mais importantes materiais para a construção de rodovias e sua utilização é observada nas diversas camadas que compõem o pavimento.

Em função dos diversos fatores relatados no início deste capítulo, diversos países vêm tentando contornar esta situação, da substituição dos agregados naturais, com soluções que buscam a partir de matéria prima excedente, sintetizar agregados que possuam características e propriedades mecânicas similares e possam substituir o material pétreo que até então, convencionalmente, é usado nas obras da engenharia.

Tais soluções existentes, em linhas gerais, constituem-se da retirada da matéria-

prima da jazida, ou ainda nesta primeira etapa, coletar os expurgos de fornos industriais, idealizar seu beneficiamento, enquadrando-os nas granulometrias convencionais e transportá-lo até o local da obra, onde todo este sistema seja ainda mais favorável economicamente do que optar pelo agregado natural.

Países como a Alemanha, Japão e Estados Unidos desenvolvem tecnologia para fabricação e emprego deste tipo de agregado desde as primeiras décadas do século passado, conforme é possível observar em documentos de patentes depositados em base de dados internacionais, realizando pesquisas sobre matérias-primas queimadas a altas temperaturas tais como a argila e que são empregadas para este fim até hoje.

Sendo assim, são analisadas a seguir algumas destas soluções de agregados artificiais para a pavimentação, que já são de uso corrente em alguns países desenvolvidos que dominam estas tecnologias.

2.4.1 O AGREGADO ARTIFICIAL DE ESCÓRIA SIDERÚRGICA

A escória siderúrgica é um dos principais subprodutos gerados pelas indústrias siderúrgicas, e que até pouco tempo no Brasil, por falta de informação e política de utilização, não era aproveitada.

Os rejeitos siderúrgicos são oriundos do processo industrial para beneficiamento do aço. Dentre outros, é possível citar como rejeito da indústria do aço: escória de alto-forno, pó de alto forno, lama de alto-forno, escória de dessulfuração, escória de aciaria LD, lama grossa de aciaria, lama fina de aciaria e carepa. As escórias são os resíduos de maior geração (mais de 60,0% da geração de resíduos) neste tipo de processo. Existem dois tipos de escórias siderúrgicas produzidas em larga escala:

- Alto-forno: resultante da fusão redutora dos minérios para obtenção do ferro gusa (obtido diretamente do alto forno, em geral com elevado teor de carbono e várias impurezas), obtidas em conversores;

- Aciaria: resultante da produção do aço. São obtidas em fornos elétricos e conversores a oxigênio, durante a conversão de sucata em aço. Estas escórias podem ser tanto oxidantes (produzida pela injeção de oxigênio no aço fundido para oxidar carbono, silício e enxofre) quanto redutoras (gerada após o vazamento da escória oxidada através da adição de óxido de cálcio - CaO e de fluorita - CaF₂).

Estes dois compostos são injetados no processo para dessulfurar o aço líquido e adicionar elementos de liga) (MACHADO, 2000).

A utilização de escória na Europa, Estados Unidos e Japão, não é novidade. Desde o final da segunda guerra mundial é utilizada em grande escala como pavimento na construção de estradas, pistas de aeroportos, pátios de estacionamento e restauração e/ou recuperação de vias em geral, devido às suas qualidades de drenagem, corretivo de solo, substituto do concreto e particularmente o baixo custo do material, quando a situação de emprego é favorecida pela proximidade destas indústrias.

Ainda de acordo com CASTELO BRANCO (2004), as escórias de aciaria, tanto de alto forno quanto elétrica, depois de beneficiadas tornam-se agregados siderúrgicos. Estes agregados são definidos como material não metálico e podem ser classificados como agregado bruto, graduado de alto forno (oriundo da escória de alto forno) ou como agregado graduado de aciaria (oriundo da escória de aciaria elétrica).

A bibliografia que trata especificamente sobre este assunto registra diversas aplicações, no exterior e no país, do agregado de escória em obras de infra-estrutura viária.

ALVARENGA (2001) relata algumas obras brasileiras onde foi utilizada escória de aciaria na pavimentação. Entre elas: BR-393 (Volta Redonda-Três Rios), RJ-157 (Barra Mansa-Divisa RJ/SP), RJ-141 (BR-393-Vargem Alegre), BR-116 (Volta Redonda-Divisa RJ/SP), 13 km da rodovia que liga Volta Redonda e o distrito Nossa Senhora do Amparo (Barra Mansa), várias ruas dos municípios de Volta Redonda, Resende, Barra do Pirai, Itaguaí, Barra Mansa e Magé (RJ) e no município de Mogi das Cruzes (SP), vias no interior da CST e revestimentos primários na região Sul Fluminense.

Outros exemplos de aplicações são mostrados pelo catálogo de produtos da COSIPA (2004), Companhia Siderúrgica Paulista, empresa do grupo Usiminas:

- Pavimentação de estradas vicinais e vias públicas DERSA/DNER (300 Km);
- Programa de pavimentação econômica da Prefeitura de Santos (SP);
- Pavimentação da 3ª zona residencial de Praia Grande (100 Km);
- Regularização de solo e aplicação do pavimento econômico do Condomínio Guaratuba – Bertioga (SP);

- Pavimentação de vários bairros em São Vicente (SP);
- Pavimentação urbana em Mogi das Cruzes (SP), Volta Redonda (RJ) e Três Rios (RJ);
- Pavimentação da Via Dutra - Trecho de Resende (RJ);
- Revestimento de diversos pátios de estacionamento na Baixada Santista;
- Revestimento do pátio de containeres da COSIPA.

Um dos fatores mais observados nas pesquisas para este tipo de material sintético é a sua composição química tanto das matérias-primas quanto do produto final, que geralmente ao ser submetido à queima passa por reações químicas que interferem nas suas propriedades e conseqüentemente vai estar selecionando este produto final de acordo com a sua finalidade e aplicação na engenharia.

Pode-se citar como exemplo deste interesse na prospecção das características químicas dos materiais sintéticos, a variação acentuada da composição observada na escória resultante das indústrias de aço.

Para a utilização da escória como material de pavimentação, o DNER estabeleceu alguns parâmetros para aceitação deste tipo de material (DNER-EM 262/94: Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários), porém devido à falta de critérios de controle adequados à realidade industrial brasileira, a expansibilidade deste tipo de material (que pode até chegar em valores de 10%) é a característica que tem causado as maiores preocupações, tanto quando utilizada como base de pavimentação, aterro ou agregado para concreto asfáltico.

Como foi explanado, para a obtenção de um agregado satisfatório, deve existir um processo de gestão e certificação desde a origem, ou seja, ainda na indústria siderúrgica.

Um exemplo disto, praticado em países desenvolvidos, é o documento de patente GB 1048294, encontrado nas bases de dados do European Patent Office (EPO), publicado em 16/11/1966, intitulado "Método e aparato para produzir agregado leve de escória", sob titularidade de Yawata Chemical Industry Co. Ltd do Japão, onde são detalhadas de forma minuciosa todas as etapas necessárias à obtenção de um agregado mais homogêneo (principalmente na fase de resfriamento) que propicie boa resistência mecânica, com menor peso específico, sendo aplicado principalmente em concreto estrutural leve, com boa trabalhabilidade.

Ainda neste capítulo, são divulgados outros documentos de patentes para melhor ilustrar como alguns países tratam este assunto, e protegem suas tecnologias sobre agregados artificiais provenientes de resíduos industriais ou de outras matérias-primas, com a devida seriedade.

Dessa forma, é oportuno relatar que estes documentos podem ser encontrados (alguns até na íntegra) em bases de dados nacionais e internacionais de propriedade industrial, tais como:

→ Instituto Nacional da Propriedade Industrial – INPI:

<http://www.inpi.gov.br>

→ United States Patent and Trademark Office – USPTO:

<http://www.uspto.gov>

→ European Patent Office - EPO:

<http://ep.espacenet.com>

2.4.2 A CINZA VOLANTE E A CINZA PESADA

Devido ao crescente potencial termoelétrico, no sul do país, o aumento da poluição, através das cinzas, tem causado nos meios técnicos uma preocupação constante em amenizar tal problema, conjugando-o com soluções que viabilizem conseqüentemente a substituição do agregado mineral natural.

Segundo NARDI (1988), as cinzas geradas pelas termoelétricas sul-brasileiras apresentam um grande potencial para reaproveitamento na engenharia. Estima-se uma disponibilidade de 3 milhões de toneladas/ano de cinzas originadas da queima do carvão mineral, compostas de 65% à 85% de cinzas volantes (*fly ashes*) e 15% à 35% de cinzas pesadas (*bottom ashes*).

No complexo termoelétrico de Jorge Lacerda das Centrais Elétricas do Sul do Brasil S.A. – ELETROSUL (localizado entre os municípios de Capivari de Baixo e Tubarão, estado de Santa Catarina) por exemplo, parte da cinza volante (ou seca) gerada é coletada pelos precipitadores eletrostáticos e estocada em silos e, cerca de 1/3 do volume estocado chega ao mercado da construção civil através de sua aquisição pelas indústrias cimenteiras e concreteiras, que a emprega como adições ao cimento ou incorporações ao concreto de cimento Portland.

Já as cinzas pesadas (ou úmidas), geradas no complexo, são eliminadas em

bacias de sedimentação, sendo este subproduto geralmente empregado na regularização de terrenos e realização de aterros (ROCHA, 1999).

Para descrever o processo de formação das cinzas, é necessário entender uma característica fundamental dos carvões minerais, no Brasil, que é a de apresentar um alto teor de cinzas após combustão.

Este carvão é constituído por fragmentos heterogêneos em sua composição mineralógica. Alguns são formados essencialmente de matéria carbonosa, outros de uma mistura íntima, mas em proporções extremamente variadas, de componentes carbonosos e minerais (argilominerais, quartzo, sulfetos, carbonatos e etc).

No interior da câmara de combustão das caldeiras é característica a existência de diferentes zonas de temperaturas. Devido a essa peculiaridade, as partículas tendem a apresentar comportamentos diferentes, resultando frações de cinzas com características físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais distintas.

É neste processo de combustão instantânea do carvão pulverizado que se produz a cinza, num estado de fusão pastosa para cada partícula, tendendo na solidificação a uma forma arredondada.

O processo de formação das partículas esféricas é governado pela viscosidade e tensão superficial da fase silicática fundida e ocorre próximo às temperaturas de 1.400°C. As partículas sílico-aluminosas, impregnadas de carvão sofrem um processo de microcombustão local, favorecendo a formação de esferas.

Exposições às altas temperaturas levam à formação de partículas arredondadas, exposições limitadas à baixa temperatura provocam um menor grau de arredondamento. As frações mais finas da cinza são ricas em partículas esféricas vítreas.

Em função das diferentes zonas de temperatura, na caldeira, são classificadas em secas (cinzas volantes) e úmidas (cinzas pesadas ou também denominadas de cinzas de fundo).

A cinza volante é coletada, através dos gases de combustão, por processos mecânicos ou eletrostáticos, isto por ser finamente dividida e facilmente transportada até os silos de estocagem.

A cinza pesada, proveniente de aglomeração dos grãos semifundidos no interior da fornalha, é retirada na base da caldeira por arraste hidráulico e depositada em enormes bacias, a céu aberto, para decantação.

Desta forma, o rejeito proveniente da combustão do carvão pulverizado é um material extremamente complexo e heterogêneo, de difícil estudo, cujas características de composição física, química, mineralógica e microestrutural dependem, essencialmente, das condições de combustão e características do carvão mineral utilizado (NARDI, 1988).

Pesquisas realizadas em todo o mundo tornaram as cinzas um material de utilização totalmente diversificado. Resumindo sua utilização atual teremos: cinzas no concreto e no cimento; como argamassa para injeções; como agregado leve sob a forma pelotizada; na cerâmica, tijolos e lajotas.

A aplicação das cinzas também é observada na pavimentação de rodovias e aeroportos. Desde 1961, pesquisadores da Universidade de Illinois vêm estudando as misturas pozolânicas em laboratório e em pistas experimentais. Um dos grandes projetos já realizados foi a construção das pistas de pouso do aeroporto de Newark, nos Estados Unidos.

No Brasil, as experiências de laboratório comprovam as possibilidades desse tipo rejeito tanto como fíler, ou em estabilização de solos, em dosagens que atenderiam a uma gama bastante ampla de utilização em sub-bases e bases de pavimentos.

Provavelmente, devido à sua aplicabilidade, poderá caber à engenharia viária a futura solução de grande parte deste problema de poluição ambiental, seja com as vantagens decorrentes, geralmente, do uso misturado com um solo local, seja pela conveniência econômica e ecológica de consumir, em grande tonelagem esse rejeito industrial (NARDI, 1988).

Assim como fora exemplificado para o agregado siderúrgico, em outros países (desenvolvidos), o uso do rejeito de termoelétricas tem merecido grande atenção de seus governos e empresários, como pode ser observado no documento de patente EP 0102092, encontrado também na base de dados internacional do European Patent Office (EPO), publicado em 07/03/1984, intitulado "Pedra ou fíler artificial para a indústria da construção, a partir da cinza volante", sob titularidade de Mijster Anton da Holanda.

Neste documento, é divulgada a produção de um agregado leve com utilização em terraplenagem, misturas asfálticas para pavimentação, material para fundações, ou fíler, pela adição de hidróxido de sódio e um pó de alumínio à cinza volante que

origina uma reação química, e após secagem e aquecimento, o agregado já então indissolúvel é obtido.

A identificação do estado da arte representado por documentos de patentes de agregados artificiais, oriundos de resíduos industriais não se esgota nestes dois exemplos listados (escória e cinza), porém o que foi verificado em comum, e se pretende demonstrar é que considerando que uma termoelétrica é a responsável pela produção de cinzas volantes, e as siderúrgicas pela formação do agregado de escória, mesmo com o advento das pesquisas sobre estes agregados artificiais, é trivial compreender, que a viabilidade financeira da aplicação destes produtos é restrita às regiões próximas destes tipos de indústrias, ou seja, caso tenha que ser incorporado o item transporte deste agregado até as regiões mais distanciadas destas indústrias, ele perde sua vantagem para o agregado natural, mesmo que escasso na região.

2.4.3 CINZA DA CASCA DE ARROZ

A utilização da cinza de casca de arroz (CCA) como material pozolânico vem sendo intensamente investigada desde a década de 70, principalmente na Índia e nos EUA, mas só partir da década de 80, com o desenvolvimento da tecnologia do concreto de alto desempenho, que a preocupação em obter um máximo de pozolanicidade do material se tornou premente. A produção de CCA com elevada pozolanicidade possibilita sua utilização no lugar da sílica ativa no concreto de alto desempenho. A norma americana ASTM C 989 classifica a cinza de casca de arroz, produzida em condições especiais, como pozolana de alta reatividade, juntamente com a sílica ativa (DAFICO, 2001).

MEHTA (1992) foi o pesquisador que mais publicou trabalhos sobre a utilização da CCA no concreto. O autor chegou a desenvolver e patentear uma fornalha com a capacidade de controlar as condições de tempo e temperatura de queima da casca de arroz para que a sílica permaneça em estado amorfo e com elevada superfície específica, propiciando com isso a produção de uma cinza de altíssima reatividade, e com elevado teor de carbono.

A produção de casca de arroz no mundo chega a 80 milhões de toneladas por ano. No Brasil, somente no estado do Rio Grande do Sul, principalmente nas regiões

centro-oeste e litoral, são produzidas cerca de 5,137 milhões de toneladas de arroz por ano (Associação Brasileira do Arroz, safra 2000/2001, in: Pretz, 2001).

Sabendo que as cascas representam 20% desse total, a produção anual desse rejeito no Rio Grande do Sul é da ordem de 1.027.400 toneladas. Há alguns anos, quase todo esse material ia parar nas lavouras e fundo de rios, num descarte prejudicial e criminoso. Na indústria do arroz temos, como subproduto mais volumoso, as cascas, as quais podem ser aproveitadas de diversas maneiras.

A geração de energia através da queima da casca de arroz é uma alternativa praticável do ponto de vista tecnológico, viável do ponto de vista econômico e ético do ponto de vista ecológico, uma vez que existe tecnologia para a conversão, a matéria prima é abundante na região e todo CO₂ produzido na queima volta para o ciclo de carbono da biosfera terrestre (DAFICO, 2001).

Embora não tenham sido encontrados estudos que indiquem o uso deste resíduo mais especificamente como material para a pavimentação, apesar de seu elevado potencial de emprego como fíler, algumas pesquisas mostram que o cimento pode ser produzido a partir de cinza de casca de arroz com sucesso, devido o seu baixo custo em substituição à areia. Devido a granulometria deste resíduo, acredita-se que eventuais estudos futuros possam sugerir sua aplicação como fíler em misturas asfálticas.

A cinza de casca de arroz tem um grande potencial para uso no concreto e por isso vários centros de pesquisa têm se dedicado a aperfeiçoar os processos de queima visando a viabilização de seu uso comercial. Um processo de queima competitivo deve ser aquele que produza cinzas com baixos teores de carbono e altas reatividades, além do aproveitamento da energia gerada na combustão do material. Dentre os processos em desenvolvimento a queima em leito fixo com fluxo de ar invertido mostra um grande potencial de no futuro ter um importante papel na produção comercial de cinza de casca de arroz. Como todo processo em desenvolvimento, mais pesquisas devem ser feitas, com protótipos de maiores dimensões, para o estabelecimento dos parâmetros ideais do processo visando uma produção comercial em larga escala.

2.4.4 O AGREGADO RECICLADO DE TELHA CERÂMICA

Apesar de já terem sido relatadas algumas ocorrências sobre o emprego do agregado proveniente do resíduo e/ou entulho da construção e demolição (RCD), são feitas algumas considerações adicionais sobre o agregado cerâmico proveniente dos rejeitos da indústria de telhas cerâmicas (que sob determinada ótica, também poderia ser enquadrado como RCD), para que sejam analisados os resultados encontrados com pesquisas acerca deste tipo de agregado cerâmico.

Um estudo recente é apresentado por DIAS (2004), em sua tese de doutorado, intitulada “Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo”. Teve por objetivo principal mostrar que resíduos de telhas cerâmicas podem ser reciclados e empregados como materiais de baixo custo para pavimentos. Para isto, foi desenvolvido um procedimento baseado no conceito de porosidade do agregado, para otimizar misturas de agregado reciclado de telha (ART) com solos visando obter misturas com maior compacidade para bases de pavimentos.

Na verdade, apesar da aparente semelhança com o agregado de argila calcinada da presente dissertação, o fato do agregado ser proveniente de rejeitos da fabricação de telhas já evidencia que suas características físicas e conseqüentemente de resistência mecânica serão diferenciadas do agregado de argila calcinada, uma vez que o processo de fabricação não tem como preocupação as variáveis envolvidas no controle tecnológico da produção de um agregado artificial para utilização na engenharia.

Estas diversas variáveis são descritas durante a presente dissertação, inclusive com a comparação dos valores obtidos em ensaios de resistência mecânica dos dois tipos de agregados, onde se observa que praticamente para todos os resultados dos diversos ensaios efetuados, o agregado reciclado de telha apresenta-se com qualidade inferior aos valores atingidos pelo agregado de argila calcinada, tomando por base comparativa os limites admissíveis nas normas vigentes para os agregados.

Apesar do autor (DIAS, 2004) concluir que o ART apresentara elevados índices de degradação após compactação, e estaria inicialmente inviabilizado para utilização em camadas de pavimentação tomando por base as metodologias tradicionais, a

metodologia desenvolvida é de grande importância por levar em consideração principalmente as diferentes massas específicas dos grãos envolvidos nas misturas solo-agregado, e efetuar uma correção granulométrica buscando a otimização dos volumes dos materiais empregados na mistura, visando obter melhor ocupação do volume compactado, com conseqüente melhor distribuição das tensões nos grãos do ART e assim evitar a sua quebra.

A hipótese sugerida é a de que esta condição seria alcançada quando a quantidade de solo empregado fosse igual à porosidade do agregado, que é relativamente elevada, o que também é compreensível por se tratar de um produto que fora rejeitado devido a alguma falha durante seu processo produtivo.

Enfim, o trabalho mostra todas as particularidades do agregado reciclado de telha cerâmica, e de certa forma, evidencia a importância da reciclagem para a sustentabilidade do setor produtivo de cerâmica vermelha, permitindo vislumbrar ganhos ambientais, ganhos sociais, e até econômicos para a região. Como exemplo, cita-se uma região contemplada pelo estudo, onde se projeta a possibilidade de execução de 32 km de base de pavimentos por ano, empregando o ART em mistura com solo laterítico local (DIAS, 2004; DIAS et al. 2004).

2.5 O AGREGADO DE ARGILA EXPANDIDA

Em relevantes revisões bibliográficas que tratam sobre o agregado artificial de argila expandida, todas as considerações sobre a sua origem, os antecedentes históricos, a matéria-prima necessária, a forma de obtenção do agregado e as aplicações mais importantes já realizadas na pavimentação, foram descritas com muita propriedade em SOARES et al. (1998), COSTA et al. (2000), VIEIRA (2000) e mais recentemente em BATISTA (2004).

Estes relatos são fundamentados na experiência pioneira, no país, em tentar prover uma solução com o agregado de argila expandida para a pavimentação na região amazônica. Tal pesquisa foi efetuada no final da década de 70 e início da década de 80, sob a coordenação do IPR/DNER, onde se destaca resumidamente, a coleta de amostras de solos argilosos de diversos estados daquela região, estudos econômicos sobre a demanda de agregados, a construção e o acompanhamento de alguns trechos experimentais e a construção de uma usina para a fabricação dos

agregados de argila expandida.

Anteriormente, outros países já registravam emprego dos agregados de argila expandida em diversas obras de pavimentação e também na construção civil, onde houvesse a necessidade de se obter um concreto estrutural leve. Um dos países que mais desenvolveram esta tecnologia, desde a década de 50, foi os Estados Unidos, principalmente através de alguns de seus órgãos governamentais, nos estados do Texas e Louisiana, e que também serviram de base para a pesquisa elaborada no Brasil pelo DNER.

A intenção de abordar neste texto a tecnologia do agregado de argila expandida, é a de explorar com maior detalhamento os aspectos relativos à sua produção industrial, e da mesma forma, os equipamentos e processos envolvidos na fabricação deste agregado artificial. Tal abordagem visa expor as informações e experiências proporcionadas pelo desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao agregado de argila expandida, e devido à relativa semelhança que existe com o agregado de argila calcinada, que possam ser utilizadas na presente metodologia, mais especificamente na parte que envolve o seu processamento industrial.

2.5.1 ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO AGREGADO DE ARGILA EXPANDIDA

De forma resumida, os processos pelos quais os agregados de argila são fabricados no Brasil e em outros países, podem ser divididos em dois grupos principais: O primeiro baseia-se no fato de que certas argilas, folhelhos argilosos (*shales*) e ardósias (*slates*) incham ou borbulham quando aquecidos à temperatura de fusão incipiente. No segundo grupo, a baixa massa específica aparente é obtida pela sinterização de um material granular, de tal maneira que a estrutura sólida celular é obtida, na qual os vazios intersticiais são preservados como poros abertos ou fechados; o sólido original pode inchar ou expandir durante a queima, mas tal fato não é fundamental para a fabricação do agregado leve. A queima é realizada em fornos rotativos ou em fornos de sinterização de grelha móvel. Nos Estados Unidos, agregados leves feitos pela expansão pirolástica de argilas e folhelhos argilosos são comercializados sob os nomes de *Haydite*, *Rocklite*, *Gravelite*, *Cel-Seal*, *Nodulite* e outros.

Haydite é feita pelo aquecimento de fragmentos de argilas ou folhelhos em forno rotativo entre 1.000°C e 1.150°C até que o grau desejado de formação de vesículas seja obtido.

Rocklite é feita por processo semelhante a 1.200°C; durante a queima, os fragmentos irregulares amolecem, incham até adquirir a forma de pelotas ou esferas, desenvolvendo uma casta ou película superficial de cerca de 1 mm de espessura.

Gravelite é preparada pela queima de cilindros extrudados de argila úmida com óleo combustível, em fornos rotativos. Este agregado foi utilizado inclusive na construção da ponte San Francisco na Baía de Oakland.

Cel-Seal é fabricado pela mistura de pequenas proporções de óxidos de ferro e materiais combustíveis ricos em carbono com a argila bruta, extrudados, cobertos com argilas refratárias e queimados em temperatura adequada em forno rotativo.

Nodulite é preparada com terra *fuler* da Flórida, pelotizada, coberta com sílica moída e queimada a 1.100°C em fornos rotativos.

A produção de agregado leve por sinterização é idêntica em princípio à sinterização de minérios de zinco ou níquel: uma carga da matéria-prima é misturada intimamente com uma proporção adequada de combustível e depositada em forma não compactada em uma grelha móvel de um forno tipo “Dwight-Lloyd” e incendiada; a queima do combustível é assegurada pela sucção ou injeção de ar através da grelha; as partículas de argila fundem superficialmente e se ligam, formando uma camada ou leito sinterizado, que é depois britado e separado em frações de granulometrias adequadas. Lytag é um tipo de agregado leve feito nos Estados Unidos pela sinterização de folhelhos argilosos; produto análogo é fabricado na Inglaterra com o nome de Aglite pela sinterização de um folhelho contendo 43,1% de SiO₂, 39,0% de CaO, 3,51% de Fe, 11,55% de carbono fixo e 11,35% de combustíveis voláteis.

Agregados leves, segundo SOUZA SANTOS (1992a), podem ser feitos com uma variedade maior de argilas e folhelhos pelo processo de sinterização do que pelo processo do forno rotativo, porém os produtos obtidos pelos dois processos apresentam relativas diferenças: as partículas esféricas, recobertas com uma película protetora impermeável, dão para o mesmo volume de agregado uma maior resistência, melhor trabalhabilidade e menor absorção de água quando aplicado em concreto de cimento portland, do que os agregados de poros abertos.

De acordo com SOUZA SANTOS (1992a), o termo "estrutura celular" de um agregado leve é usado para indicar uma textura em que os vazios estão isolados entre si por paredes impermeáveis; o termo "estrutura porosa ou esponjosa" indica uma textura em que os vazios estão interconectados e com o meio, como em uma esponja.

As reações que ocorrem quando uma argila é aquecida em um forno rotativo para formar um agregado leve são as seguintes:

- a) Período da secagem (remoção da água de moldagem e de umidade);
- b) Período de remoção de água adsorvida e de matéria orgânica;
- c) Período de remoção de água de constituição (água de hidroxilas);
- d) Período de oxidação de enxofre, ferro, carbono e outros elementos;
- e) Período de dissociação-redução (carbonatos de Ca e Mg; sulfatos; óxidos férricos a óxidos ferrosos);
- f) Período de vitrificação (primeira formação de vidro ou fusão incipiente);
- g) Período pirolástico em que algumas argilas, folhelhos e ardósias incham ou expandem;
- h) Período de fusão total, em que há predominância de fase líquida de baixa viscosidade, havendo desaparecimento da estrutura celular e perda de forma do agregado.

As condições necessárias para que o inchamento ou expansão pirolástica de uma argila ou folhelho produza uma estrutura celular, essencial para um agregado leve de alta qualidade, são as seguintes:

- a) O material na condição pirolástica deve possuir um teor suficiente de vidro para tapar os poros e reter os gases formados;
- b) O material deve conter quantidade adequada de substâncias produtoras de gases para produzir o grau de inchamento suficiente para produzir a massa específica aparente desejada;
- c) As substâncias produtoras de gás devem liberar uma quantidade adequada, em uma velocidade adequada, dos componentes voláteis, numa temperatura e momento que coincidam com as condições pirolásticas ótimas do material;
- d) Nessas condições ótimas de tempo-temperatura-formação de vidro, o vidro deve possuir uma viscosidade adequada que permita a formação de um grande número de bolhas ou vesículas para dar uma baixa massa específica aparente a

partícula do agregado leve e dar a uma espessura de parede das vesículas que leve à máxima resistência ao esmagamento da partícula do agregado leve;

e) O material deve inchar em uma estrutura celular na temperatura a mais baixa possível, por razões econômicas. Por outro lado, essas temperaturas baixas de inchamento não devem ser devidas a presença de fundentes ou sais alcalinos, que posteriormente irão liberar compostos solúveis que irão enfraquecer o concreto leve;

f) A faixa ou intervalos de temperaturas em que ocorre o início do inchamento e a fusão total deve ser superior a 20°C, para evitar que os fragmentos de agregado leve se grudem e provoquem o entupimento do forno.

Se não existir um teor de fundentes adequados para formar uma fase vítrea ou se uma fase vítrea de baixa viscosidade é formada desde o início, os gases escapam e não há inchamento da partícula de argila; esses defeitos podem ser corrigidos pela adição de fundentes adequados, pelo deslocamento do período de liberação de gás para uma temperatura mais alta, por um aquecimento mais rápido com menor introdução de ar ou pela adição de substâncias que elevam a viscosidade da fase vítrea.

Quantidades exageradas de substâncias formadoras de gases produzindo uma liberação violenta de gases são prejudiciais especialmente em temperaturas muito baixas para a formação de vidro; a presença de enxofre ou carbono leva a necessidade de um aquecimento muito rápido e condições fortemente redutoras; forma-se então um agregado leve muito fraco, de estrutura porosa ou esponjosa grosseira e muito irregular. Essa produção violenta de gases pode ser diminuída pelo aquecimento mais lento (mais ar sendo introduzido) ou misturando materiais mais refratários à argila para contrabalançar com uma elevada viscosidade a pressão dos gases em temperaturas baixas.

Estudos do U.S. Bureau of Mines nos Estados Unidos em 1948, procurando correlacionar as propriedades de inchamento pirolástico com a composição química das argilas, levaram a conclusão de que a composição mineralógica, principalmente a das impurezas existentes nas argilas, folhelhos argilosos e ardósias é o fator predominante nas propriedades de inchamento. Portanto, uma correlação desse tipo deve levar em conta as temperaturas de fusão e de dissociação desses minerais, as

temperaturas de fusão dos eutéticos¹ dos vários minerais entre si, as diferentes reações de dissociação, a natureza dos gases formados e as viscosidades em função da temperatura das várias fases vítreas que se podem formar; assim, vê-se que o problema de estabelecer uma correlação entre as composições química e mineralógica de argilas com as propriedades de inchamento pirolástico não é simples de um ponto de vista teórico, o que leva a conclusão de que ensaios práticos, em laboratório e em escala piloto, são os mais práticos para determinar se uma argila, folhelho ou ardósia pode ser usada na manufatura de agregado leve.

Cabe ressaltar que estas conclusões são também de grande valia para a produção do agregado de argila calcinada e compõem uma etapa indispensável na fase de prospecção da matéria-prima argilosa, conforme será observado nos capítulos seguintes, com a vantagem de que para o agregado de argila calcinada as especificações são menos exigentes, proporcionando uma maior gama de matérias-primas capazes de gerar um agregado de qualidade satisfatória.

Assim como foi relatado para outros tipos de agregados artificiais, são mostrados outros 4 exemplos de que a tecnologia industrial do agregado leve de argila expandida não é recente, nem mesmo os fornos rotativos responsáveis por esta produção. Registra-se a primeira utilização no Brasil em meados da década de 60 e posteriormente teve o estudo para a região amazônica na década de 80, sendo melhor tratado nos próximos itens.

O documento de patente GB 429015, encontrado nas bases de dados do European Patent Office (EPO), publicado em 20/05/1935, e intitulado “Aperfeiçoamentos relacionados aos agregados para concretos ou outras misturas com cimento”, sob titularidade de William F. Macglashan dos Estados Unidos, pretende ser o primeiro registro a atender a necessidade de se obter peças estruturais leves, com a utilização de agregados leves cerâmicos de argila expandida. Cita que neste processo de expansão, deve existir um aquecimento que leve à fusão determinadas substâncias cerâmicas presentes na matéria-prima, que por sua vez liberam gases que expandem o material. Informa que a temperatura

¹ Mistura de componentes sólidos que, ao fundir-se, fica em equilíbrio com um líquido da mesma composição que a sua, e cuja temperatura de fusão é um mínimo na curva, ou na superfície de fusão do sistema

para a queima é em torno de 1.100°C e a granulometria do agregado pode variar desde a do grão de areia até a do agregado graúdo. São também sugeridos fornos rotativos para a produção dos agregados.

Percebe-se assim, que desde as primeiras tentativas, registra-se a necessidade de empregar fornos especiais, tais como os fornos rotativos, devido às altas temperaturas atingidas para a obtenção do agregado de argila expandida.

Conforme está descrito também neste documento, cuidados especiais devem existir para a aquisição da matéria-prima empregada, uma vez que a argila a ser utilizada deve conter minerais capazes de iniciar o processo de expansão das pelotas, ao atingir temperaturas superiores a 1.100°C. Cita-se ainda neste documento a necessidade de adição de outros materiais, tais como o carvão mineral, que propiciem a formação de bolhas e canais internos, e assim levarem o agregado à expansão.

Outro documento de patente muito interessante é o GB 465318, encontrado nas bases de dados do European Patent Office (EPO), publicado em 05/05/1937, e intitulado “Concreto com partículas de argila queimada como agregado”, sob titularidade de Hugo Schwartzkopff da Alemanha e pretende também registrar a utilização do agregado cerâmico, sem que este atinja o nível de expansão. De forma similar ao que foi descrito no item 2.4.4 para o ART, o agregado é obtido através do esmagamento de tijolos, fabricados com argilas livres de substâncias adversas, e queimadas em temperaturas em torno de 1.000°C.

Entretanto, isto traz algumas condicionantes assim como fora comentado para o ART, uma vez que o controle da produção (dos tijolos) não é inicialmente voltado para gerar um agregado que irá servir como material de pavimentação. Um exemplo disto, é que a tentativa de utilizá-lo para a pavimentação é feita somente com concreto de cimento Portland, ou ainda como camada de revestimento primário na construção de vias.

Ainda de acordo com este documento, já se observa desde esta época, a preocupação com a composição química da matéria-prima que irá produzir estes tijolos e que irão originar os agregados de “argila queimada”. É então sugerida uma composição preferencial, de acordo com a TAB. 2.1.

TAB.2.1 Composição química preferencial da argila para a “argila queimada” do documento de patente GB465318

SiO ₂	64,4%
Al ₂ O ₃	21,9%
Fe ₂ O	3,0%
MgO	1,4%
K ₂ O + Na ₂ O	3,0%
H ₂ O + compostos orgânicos	4,7%

Fonte: Schwartzkopff, 1937.

Julga-se ainda interessante citar mais dois documentos encontrados sobre o agregado de argila expandida, ambos da base de dados do European Patent Office (EPO): o terceiro vem a ser o documento GB 786500, publicado em 20/11/1957, “Um método e aparato para a produção de agregados leves”, sob titularidade de Southern Lightweight Aggregate Corporation e o quarto é o documento GB 862723, publicado em 15/03/1961, “Aperfeiçoamentos em relação à produção de argila expandida” sob titularidade de William Kinniburgh.

No terceiro, são descritos alguns tipos de matérias-primas adequadas à produção de agregados leves, e descreve também as etapas necessárias a esta produção. Neste caso, a novidade inventiva consiste da apresentação de um equipamento sofisticado sob a forma de usina, com tambores cilíndricos que atuam como fornos rotativos capazes de produzir o já conhecido agregado de argila expandida, através das elevadas temperaturas que se consegue atingir com este determinado equipamento (FIG. 2.2).

No último documento, a inovação é trazida através da substituição dos materiais que servem como aditivos para facilitar o processo de expansão do agregado, ou seja, ao invés da utilização de materiais como o carvão mineral, sugere-se a adição de turfa na matéria-prima de solo argiloso, sob alguns percentuais preferenciais para que haja uma queima facilitada internamente no agregado, e assim garantir a expansão a um custo mais baixo do que com a aquisição do carvão.

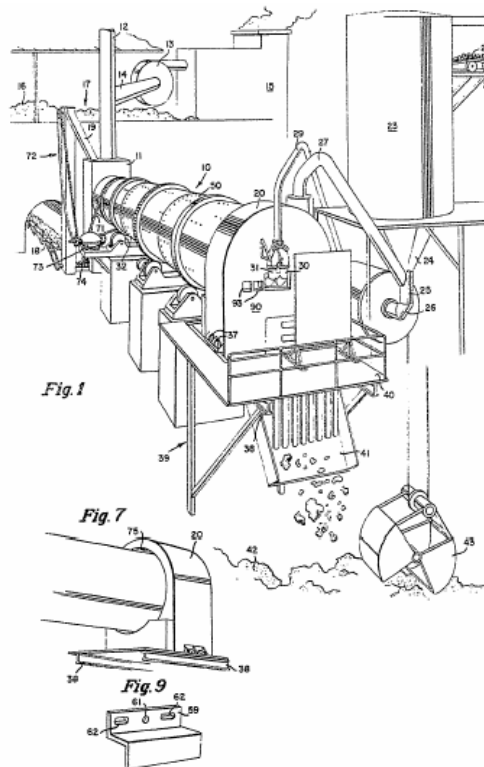


FIG.2.2 Detalhe do forno rotativo criado para a fabricação de argila expandida, conforme o documento de patente GB 786500 (SOUTHERN LIGHTWEIGHT AGGREGATE CORPORATION, 1957).

2.5.2 A USINA DE ARGILA EXPANDIDA DA CINASITA

A empresa CINASA, depois denominada CINASITA, e atualmente sob o grupo CINEXPAN foi constituída em 1964, com o objetivo de fornecer agregado leve, produto até então inexistente no Brasil, para a construção de conjuntos habitacionais em escala industrial, atendendo apelos governamentais da época.

A equipe de engenharia da então CINASA, em associação como Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e da empresa norte-americana Fuller, deram início à pesquisa de matérias primas, dimensionamento do projeto, construção e operação da usina de agregado leve.

A produção da CINASA iniciou seus primeiros testes em 1967 e a produção efetiva em janeiro de 1968, com uma produção de 7.500 m³ por mês.

Devido às necessidades da indústria de construção civil de São Paulo, o IPT realizou várias pesquisas visando encontrar argilas que pudessem ser utilizadas na

fabricação de agregados leves, pelo processo do forno rotativo. Foram estudadas trezentas argilas do Estado de São Paulo, cuja composição química e mineralógica as indicava como possíveis de inchamento pirolástico. Utilizando os ensaios de queima lenta e rápida (SOUZA SANTOS, 1992a), foram selecionadas dezesseis argilas; ensaios em escala piloto permitiram a seleção de quatro, tendo sido escolhida uma por condições econômicas para a industrialização.

Dessa forma, a Cinasa encarregou o IPT de realizar os trabalhos necessários para estabelecer a viabilidade técnica e econômica para o projeto da referida indústria. De posse de informações dos interesses específicos da firma, foram estabelecidos os seguintes critérios preliminares para orientação dos trabalhos de campo para estudos de matérias-primas e de laboratório do grupo de pesquisas constituído pelo pessoal da Cinasa e do IPT:

1^o) A usina de pré-fabricação da Cinasa estando em São Bernardo do Campo, a fábrica de agregado leve deveria se estabelecer, de preferência, dentro de um raio de 50 km, porém, no máximo, a 100 km de distância da usina, com vias de acesso adequadas para transporte rodoviário do agregado leve a São Bernardo do Campo (usina de pré-fabricados de concreto da Cinasa);

2^o) A fonte de matéria-prima deveria ser abundante e barata, de modo a fornecer agregado leve com um preço competitivo com granito britado;

3^o) O agregado leve deveria possuir as melhores qualidades técnicas para poder de um lado, justificar a introdução em competição com a brita de granito e, de outro, suportar a competição técnica de novos e futuros agregados leves que por ventura viesse a ser introduzida no mercado em São Paulo e em outras partes do Brasil.

A produção em escala piloto foi feita utilizando um forno rotativo piloto baseado no projeto do U.S. Bureau of Mines, adaptado e construído inteiramente em São Paulo. Esse forno piloto foi posto a operar dentro do seguinte fluxograma de processo (FIG 2.3): matéria-prima; extração, desagregação e umidificação; conformação por extrusão em maromba; corte de argila extrudada em cilindros de 1 cm de diâmetro e 1 cm de altura; rolamento e secagem superficial; queima no forno rotativo; resfriamento; separação; estocagem. O forno foi projetado de forma a permitir o controle de inclinação sobre o plano horizontal; o maçarico de óleo de chama direta permitia a obtenção de uma atmosfera oxidante e temperaturas máximas até 1350°C. Uma das matérias-primas era um argilito compacto, não

desagregável em água; assim, não foi estudado na forma plástica e sim britado em fragmentos de cerca de 1 cm de diâmetro.

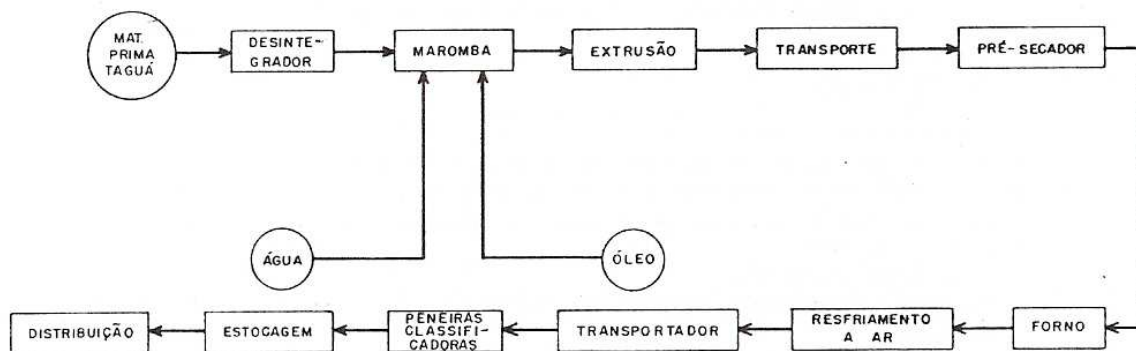


FIG.2.3 Fluxograma de fabricação de agregado leve de argila piroexpandida (SOUZA SANTOS, 1992a).

Em paralelo, foram realizados ensaios cerâmicos de avaliação para o uso industrial dessas argilas, visando determinar principalmente a curva de queima em função da temperatura, especialmente a faixa ou o patamar de queima, além da temperatura de “superqueima” (caracterizada pela expansão pirolástica e fusão).

Segundo informações da página eletrônica da CINASITA, em 1976, a mesma inaugurou um novo forno, com maior capacidade e com tecnologia própria, aumentando sua capacidade produtiva, para atender a demanda crescente.

2.5.3 OS PROJETOS DAS USINAS DE ARGILA EXPANDIDA DO DNER

De acordo com o relatório final da pesquisa voltada para a região amazônica (DNER, 1981), os estudos de engenharia foram subdivididos em três setores:

- Materiais;
- Aplicação;
- Indústria.

O setor de materiais teve como objetivo a localização e prospecção de jazidas de argila próprias para a fabricação de agregados, bem como a execução de ensaios tecnológicos das mesmas.

O setor de aplicação teve por objetivo informar a viabilidade técnica do emprego dos agregados fabricados com argila em construção civil e em pavimentos

rodoviários.

Foi realizada também viagem ao exterior com o objetivo de coletar informações sobre a fabricação e emprego de agregados de argila, especificamente em pavimentos rodoviários.

O setor de indústria teve como objetivo o estudo e a elaboração de anteprojetos de usinas para a fabricação de agregados de argila, atendendo a indicação de escalas de produção indicadas pelo mercado. Forneceu, também, os parâmetros necessários às conclusões sobre a viabilidade econômica.

Dentro deste setor indústria, foram elaborados quatro anteprojetos de unidades de usinas, sendo três anteprojetos de unidades fixas e um anteprojeto de unidade móvel, conforme listadas a seguir:

- Anteprojeto de Unidade Fixa – Instalação com silo;
- Anteprojeto de Unidade Fixa – Instalação sem silo;
- Anteprojeto de Unidade Fixa – Instalação tipo Fuller;
- Anteprojeto de Unidade Móvel.

Os critérios para a escolha do tipo (fixa ou móvel) foram decorrentes de informações provenientes dos estudos econômicos onde, por exemplo, para Manaus e Belém, determinaram escalas industriais que exigiam unidades fixas.

Segundo FABRÍCIO (1986), o motivo que levou o IPR a promover uma pesquisa para a fabricação de uma usina protótipo móvel adaptadas às necessidades rodoviárias, foi o fato de que os equipamentos conhecidos no mercado mundial eram na época em geral de grande porte e destinados a instalações fixas. Assim sendo, de conformidade com as conclusões obtidas, o protótipo da usina móvel foi concebido, e construído de acordo com as seguintes diretrizes:

- Apresentar condições de mobilidade e transporte de modo que pudesse ser levada para os locais das obras com certa facilidade;
- Utilizar um sistema de queima que propiciasse economia de combustíveis nobres que no caso são os derivados de petróleo;
- Utilizar na sua montagem o máximo possível de componentes já fabricados no mercado brasileiro;
- Propiciar uma certa flexibilidade de operação de fabricação para pesquisas de qualidade, custos e emprego dos agregados produzidos.

O protótipo da usina foi fabricado e montado em cima de duas carretas sendo

que uma delas é correspondente a "unidade de processamento da argila" (FIG. 2.4) e a outra a "unidade de queima" (FIG. 2.5).

O processo de combustão usado requer que no processamento da argila a mesma seja misturada com carvão vegetal, pulverizada antes de ser pelotizada por intermédio de uma maromba e lançado em um forno rotativo já aquecido por intermédio de maçaricos de óleo. O objetivo deste procedimento visa economizar o óleo, pois uma vez que se aqueça o forno, a temperatura seria mantida, em grande parte, pela queima do carvão vegetal incorporado à argila.

O fluxograma operacional do processo é o que está mostrado na FIG. 2.6 e descrito conforme as seguintes etapas:

- A argila é carregada por intermédio de uma pá carregadeira (1);
- Esse carregamento é feito para um caixão alimentador (2) passando daí para um dispositivo destorroador (3) onde é encaminhada por intermédio da esteira (4) para um misturador helicoidal (9);
- Ao misturador helicoidal chegam também carvão vegetal pulverizado obtido no moinho de martelos (6) e transportado pela correia (7) ao alimentador rotativo (5);
- A água é incorporada através do tanque (8);
- A mistura é extrudada pela maromba (10) e em forma de pelotas vai para o forno de queima (12) onde é aquecida na temperatura especificada pelos ensaios e por um período de 10 a 15 minutos;
- Após este aquecimento o material está pronto para ser usado.

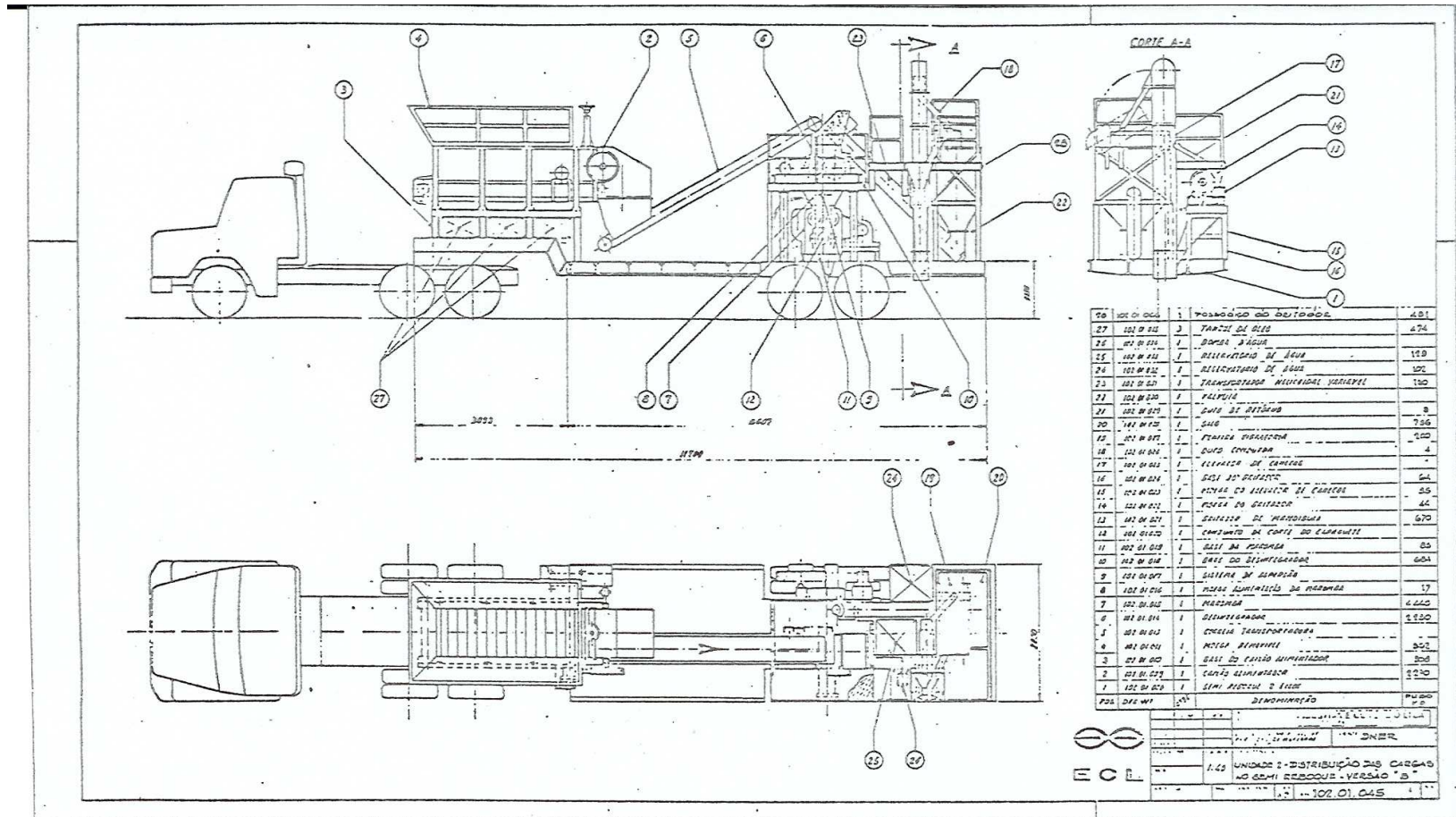


FIG.2.4 Usina protótipo móvel - Unidade de processamento da argila (FABRÍCIO, 1986).

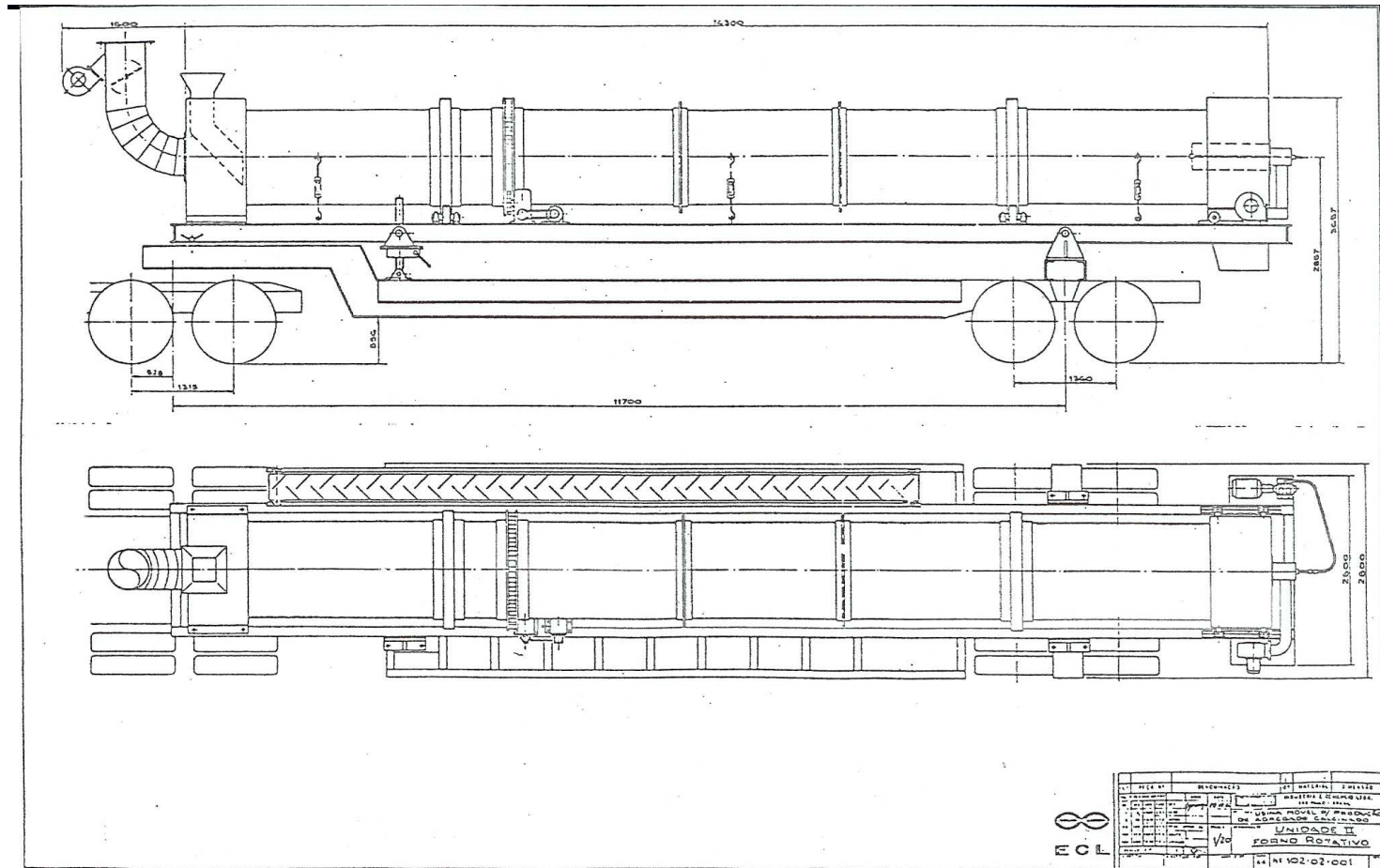


FIG.2.5 Usina protótipo móvel - Unidade de queima (FABRÍCIO, 1986).

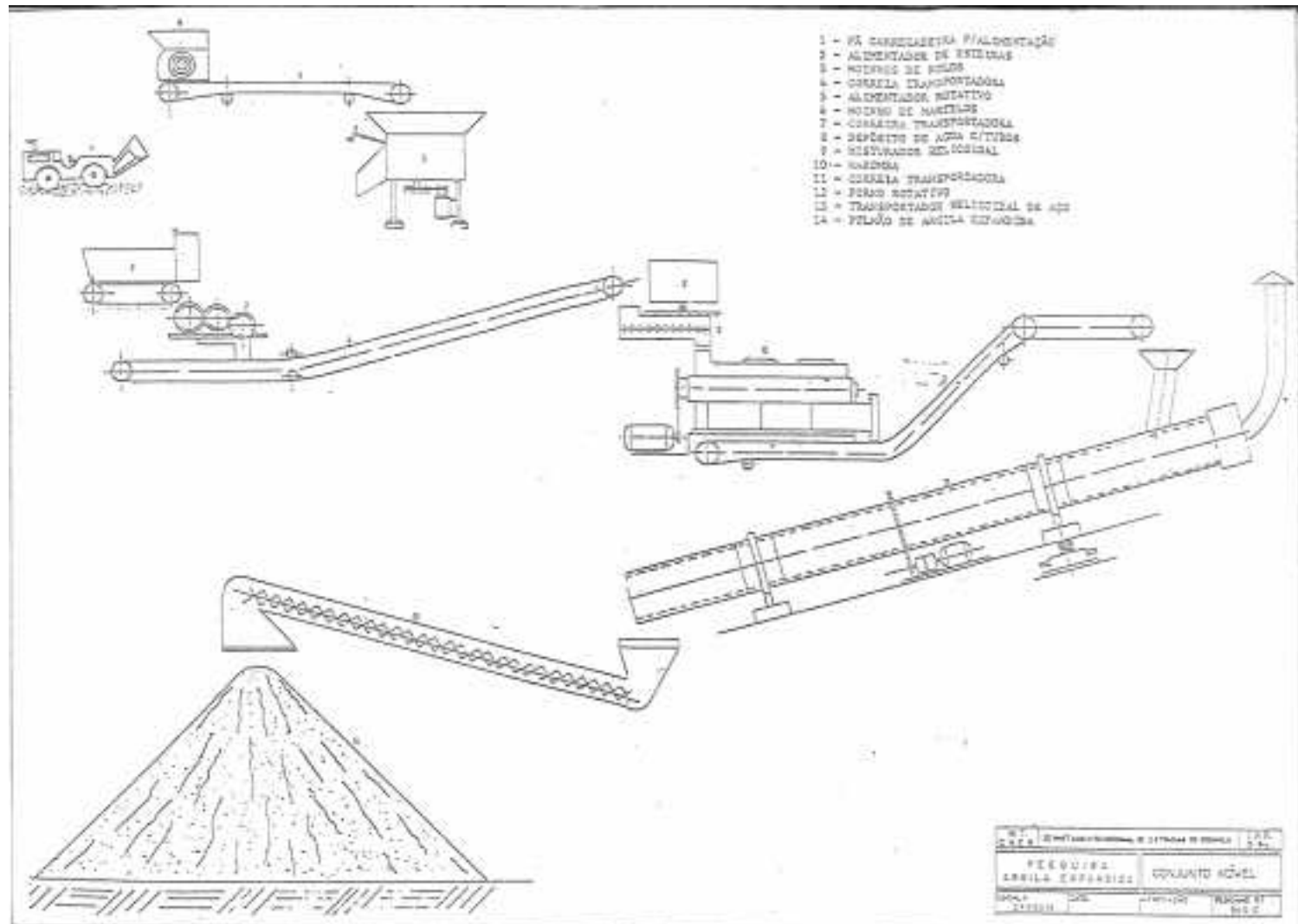


FIG.2.6 Fluxograma do processo de produção (FABRÍCIO, 1986).

2.5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS ACERCA DA USINA MÓVEL DO DNER

Conforme descrito no item anterior, o projeto da unidade móvel foi considerado em condições de ser operacionalizado em termos industriais, e após exame acurado, foi elaborada uma unidade protótipo, de forma a se averiguar a eficiência e economicidade da produção a nível industrial.

Sendo assim, a usina concebida, estava preparada para uma produção em média escala, com cerca de 40 a 50 m³ de agregado por dia, podendo ser facilmente removível e transportável com performance adequada para a produção de argila expandida nos locais necessários de consumo.

Presta-se ademais, para atendimento das necessidades de agregado exigidas por cidades de médio porte, em programas de implantação de unidades habitacionais e a outros segmentos da construção civil. Julgou-se também ser este tipo de usina, a mais aconselhável e adequada à região amazônica onde o volume de consumo não justifique a produção em uma instalação fixa, onde supõe-se um elevado porte de produção.

Conforme dados do estudo (DNER, 1981), o protótipo exigiria um período de 6 meses para a sua fabricação, em São Paulo, e contaria com uma produção máxima de 50 m³/dia. Estimou-se ainda, que seria necessário um período de 6 meses de operação para prováveis correções e ajustes, e que o protótipo já seria considerado uma unidade de produção de porte semelhante ao que seria então industrializado.

Debates regionais foram realizados, em virtude do interesse demonstrado por diversas organizações da região amazônica e a questão relativa ao combustível foi julgada passível de revisão por ocasião da implantação do projeto:

A sugestão de se usar madeira como combustível (gás de madeira) causou preocupação face aos aspectos ambientais; foi então considerada a hipótese de utilizar sobras de serrarias e madeiras de desmatamentos permissíveis de programas da região amazônica. Foi também considerada prioritária a questão da substituição do consumo de óleo combustível.

Passado este período da pesquisa, poucas informações foram disponibilizadas para o devido acompanhamento do projeto.

No intuito de efetuar coleta de dados regionais para a presente dissertação, inclusive sobre o estado atual da usina construída, foram realizadas algumas visitas

técnicas na região amazônica (que são aqui apresentadas no capítulo 5), e também à Universidade Federal do Amazonas (em 09 de julho de 2.004), onde havia a informação de que estaria localizada a usina móvel originária da pesquisa do DNER. Porém, de acordo com relatos pessoais de funcionários e professores, havia na ocasião, total desconhecimento desta usina na universidade.

Somente então, com alguns dados mais recentes (de junho de 2.004) a partir de um relatório sobre convênio de cooperação técnica entre o atual Ministério dos Transportes e a Universidade Federal do Amazonas para a realização de pesquisas sobre agregados de argila calcinada, confirmaram-se as primeiras informações.

Segundo o relatório, a usina que fora fabricada pela empresa ENAPLIC, em São Paulo e modificada pela empresa CIBER, no Rio Grande do Sul, foi instalada na cidade de Manaus dentro da 1ª Unidade de Infra-Estrutura Terrestre (1ª UNIT) e sofreu paralisação em outubro de 1.989, onde ficou sem funcionamento por mais de dez anos.

Em setembro de 2.000, a usina passou por delegação do DNIT, para a Universidade do Amazonas, que pretendia colocá-la em funcionamento no Estado com o propósito de complementar os trabalhos de pesquisas regionais executados, e em andamento.

Segundo ainda o relatório, em outubro de 2.000, por iniciativa do Prof. Nilton de Souza Campelo, que recebeu a usina protótipo cedida à Universidade Federal do Amazonas, foram efetuadas reuniões entre os técnicos da ECL – Engenharia, Consultoria e Economia S.A., e docentes da universidade, para elaborar um programa de novos estudos, e adicionalmente procurar uma parceria para recuperar, instalar e operacionalizar novamente a usina protótipo móvel do DNIT, porém desta vez voltada para a tecnologia do agregado de argila calcinada, em vez do agregado de argila expandida.

Como a usina fora instalada apenas para uma apresentação e demonstração às autoridades do DNER por ocasião de sua inauguração, havia a necessidade das seguintes providências (por intermédio desta provável parceria), para a mesma ser operacionalizada novamente:

- Revisão total e/ou substituição da parte elétrica e mecânica da usina que esteve parada por mais de 10 anos;
- Mudança do sistema de aquecimento do forno rotativo mediante a instalação

de queimadores para utilização de óleo industrial do tipo BPF - Baixo Ponto do Fulgor (mais barato do que o óleo diesel usado na demonstração). O sistema de aquecimento também pode ser modificado para queimar gás natural ou gás proveniente das destilarias de petróleo, de acordo com as conveniências econômicas do lugar da operação;

- Mudança e/ou aperfeiçoamento do sistema de pelotização da argila;
- Pesquisa de jazidas de argila adequados para fornecimento de material para a fabricação de agregados;
- Acompanhamento tecnológico desde a fabricação do produto ao emprego do material com pessoal especializado.

O relatório informa por último que desde janeiro de 2.001 até junho de 2.004, não havia sido possível o desenvolvimento do programa cujo objetivo mais importante era a recuperação da usina protótipo móvel do DNIT.

De maneira ilustrativa, são mostradas a seguir algumas fotos da usina protótipo móvel, quando esteve em operação, instalada em Manaus.



FIG.2.7 Detalhe do dispositivo destorroador e silo dosador (Relatório do Convênio MT/UFAM, 2004).



FIG.2.8 Carga da argila ao pelletizador (Relatório do Convênio MT/UFAM, 2004).



FIG.2.9 Saída da argila pelletizada para a correia que alimenta o forno rotativo (Relatório do Convênio MT/UFAM, 2004).

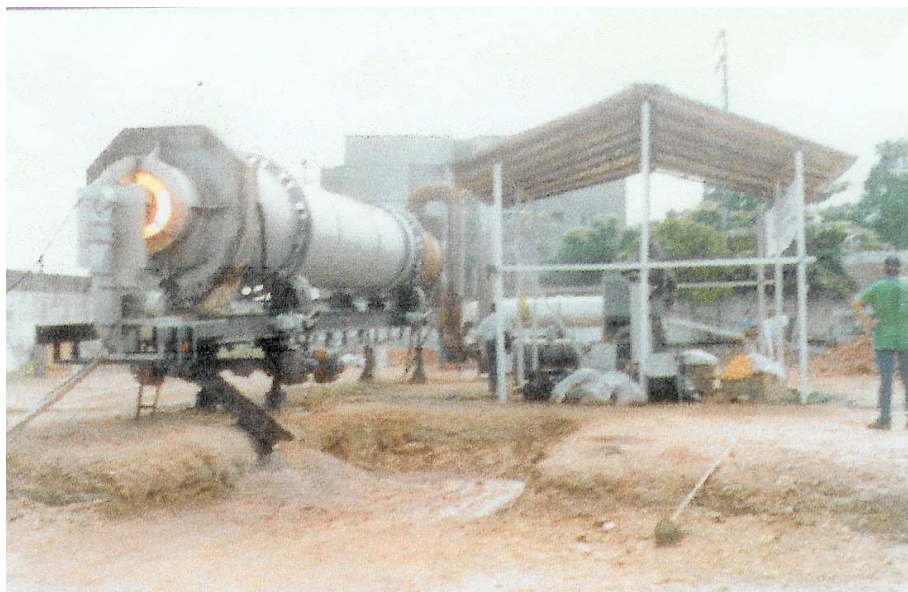


FIG.2.10 Forno rotativo em operação. À direita, o grupo gerador que forneceu energia à usina (Relatório do Convênio MT/UFAM, 2004).



FIG.2.11 Detalhe da saída do forno rotativo em operação, e do conjunto sobre o chassi de uma carreta (Relatório do Convênio MT/UFAM, 2004).

2.6 O AGREGADO DE ARGILA CALCINADA

Historicamente, pode-se estabelecer como a origem da pesquisa do agregado artificial de argila calcinada no Brasil, a experiência também proveniente do DNER (1980), onde foi estabelecido que uma das etapas desse estudo, seria uma visita técnica aos Estados Unidos, mais precisamente em outubro de 1.979, tendo sido visitados por um engenheiro da equipe, os estados do Texas e da Louisiana, cujas organizações rodoviárias utilizavam agregados fabricados com argila, ou conforme são chamados por estes órgãos os “agregados sintéticos”.

Dentre as conclusões obtidas desta visita, destacam-se as seguintes:

→ Estes “agregados sintéticos”, fabricados pela queima de argila a partir de 760°C, oferecem possibilidades bastante interessantes para o uso rodoviário pois a experiência do estado do Texas mostra que a argila queimada nesta temperatura se desidroxila, podendo fornecer agregados estáveis e aptos para serem usados em condições mais econômicas que o agregado sintético de argila expandida. De acordo ainda com esta experiência, é trazida a informação de que praticamente qualquer argila que depois de molhada e moldada em forma de pelotas, venha a formar grãos duros secos ao ar, pode servir para a fabricação de agregados de “argila queimada”.

→ O uso deste “agregados sintéticos” no Texas já havia sido estudado e pesquisado, gerando inclusive um relatório chamado “A recommended synthetic coarse aggregate classification system”, publicado em 1.969, que estabeleceu um sistema de classificação de agregados de argila “queimada” e expandida. Classificação esta que também iria especificar alguns testes que dariam o enquadramento no sistema citado.

Mais especificamente, foram originados na época, 6 ensaios (5 para os agregados e 1 para a escolha da matéria-prima) para as condições ambientais do Texas, e para o caso do Brasil, foram trazidos e adaptados 3 ensaios (DNER, 1980) para os agregados, e o ensaio para a avaliação da argila, mostrados a seguir, na TAB. 2.2:

TAB.2.2 Ensaios provenientes do Texas Highway Department

DNER-ME 222/94	Agregado sintético fabricado com argila - desgaste por abrasão
DNER-ME 223/94	Argilas para fabricação de agregado sintético de argila calcinada - seleção expedita pelo processo de fervura
DNER-ME 225/94	Agregado sintético de argila calcinada - determinação da perda de massa após fervura
DNER-ME 152/95	Agregado em estado solto – determinação da massa unitária

Tomando por base estes dados, é que surge no IME, sempre sob a orientação do Professor Álvaro Vieira, a pesquisa acadêmica voltada para esta alternativa do agregado de argila calcinada, até então não explorado pelos estudos do DNER (1981) e FABRÍCIO (1986) e sob a premissa inicial de tentar obter um agregado de argila mais econômico (sem chegar ao nível de expansão), com o intuito de propor uma alternativa à escassez de rochas da região norte do país.

Cabe aqui ressaltar, que com a evolução da pesquisa foi constatado que além dessa justificativa econômica inicial, pela relevante redução da temperatura de queima, pode-se perceber que o advento da tecnologia do agregado de argila calcinada iria reproduzir com maior fidelidade o agregado proveniente de rochas britadas em seus aspectos qualitativos.

Com esse novo enfoque, foram iniciados estudos comparativos a respeito do desempenho do agregado de argila calcinada, em relação aos resultados já conhecidos com os agregados rochosos, principalmente quando empregados em misturas asfálticas.

2.6.1 A EVOLUÇÃO DA PESQUISA

De forma resumida, porém elucidativa, está listado na TAB. 2.3 a seguir, um acompanhamento do estudo do agregado artificial de argila calcinada desenvolvido no IME, para melhor entendimento da sua evolução ao longo dos anos, desde a primeira iniciação `a pesquisa (IP), passando pelos projetos de fim de curso (PFC), até a presente dissertação de mestrado (DM):

TAB.2.3 Evolução da pesquisa sobre o agregado de argila calcinada no IME

Autor (es)	Ano	Tipo	Descrição das atividades realizadas
Soares et al.	1.997	IP	<p>1) Revisão bibliográfica com base no relatório do DNER (1981);</p> <p>2) Moldagem manual de pelotas para serem calcinadas em diversas temperaturas (900°C a 1.200°C) com 2 amostras de solos de Urucu (AM);</p> <p>3) Realização de alguns ensaios preconizados pelo THD e adotados pelo DNER.</p>
Soares et al.	1.998	PFC	<p>1) Revisão bibliográfica com base no relatório do DNER (1981) e Souza Santos (1989 e 1992);</p> <p>2) Caracterização geotécnica e moldagem manual de pelotas para serem calcinadas em diversas temperaturas (900°C a 1.300°C) com 1 amostra de solo de Urucu (AM);</p> <p>3) Definição da temperatura ideal de 900°C, após aprovação em ensaio de desgaste após fervura;</p> <p>4) Realização de ensaio de análise química da amostra de solo;</p> <p>5) Dosagem de mistura asfáltica pelo método Marshall, com agregados (pelotas) produzidos manualmente em 3 faixas granulométricas, areia, cimento (como fíler) e CAP-20;</p> <p>6) Devido a problemas relacionados à curva granulométrica e os teores de ligante escolhidos, o volume de vazios foi da ordem de 20%, com alguns valores de estabilidade insatisfatórios.</p>
Costa et al.	2.000	PFC	<p>1) Revisão das informações provenientes dos estudos anteriores;</p> <p>2) Revisão bibliográfica acerca do comportamento mecânico de misturas betuminosas;</p> <p>3) Confecção de barras prismáticas, com solo argiloso proveniente do estado do Acre, em formas de madeira previamente fabricadas;</p> <p>4) Secagem das barras em estufa, calcinação destas</p>

Autor (es)	Ano	Tipo	Descrição das atividades realizadas
			<p>barras à 900° C por 30 minutos e posterior quebra para enquadramento em uma granulometria selecionada;</p> <p>5) Dosagem de mistura asfáltica pelo método Marshall, com tentativas de teores de ligante (CAP-20) de 7,5%, 8,5% e 9,5%, agregado de argila, areia e cimento;</p> <p>6) Obtenção de um teor ótimo, através da curva “Estabilidade x Ligante”, em 8,8%, com volume de vazios de 12% e estabilidade em torno de 900 Kgf;</p> <p>7) Moldagem de corpos-de-prova neste teor, para verificação dos parâmetros de resistência à tração, módulo resiliente e fadiga;</p> <p>8) Valores médios encontrados: $R_T (25^\circ C) = 0,33 \text{ MPa}$ $M_R (25^\circ C) = 1.200 \text{ MPa}$ Estimativa de vida de fadiga de 20% da obtida com agregado natural, porém ressaltando-se que os módulos apresentaram-se bem diferentes.</p>
Batista	2.004	DM	<p>1) Revisão bibliográfica contemplando: as propriedades dos agregados mais relevantes para pavimentação (MARQUES, 2001; ROBERTS et al., 1996); a questão da escassez de agregados na Amazônia (DNER, 1981; VIEIRA, 2000); um levantamento histórico sobre o agregado de argila expandida e a matéria-prima necessária (DNER, 1981; FABRÍCIO, 1986; SOUZA SANTOS, 1989);</p> <p>2) Caracterização de 32 amostras de solos do subleito da rodovia BR-163/PA, e de 2 amostras de solos utilizados por olarias de Santarém (PA);</p> <p>3) Aquisição de máquina extrusora adaptada para uso em laboratório; confecção de barras prismáticas de seção hexagonal;</p> <p>4) Escolha das amostras de solos a serem calcinadas</p>

Autor (es)	Ano	Tipo	Descrição das atividades realizadas
			<p>pelo valor do índice de plasticidade (IP>20), resultando em 3 amostras do subleito da BR-163 e 1 amostra proveniente da mistura de dois solos utilizados por olarias de Santarém (PA);</p> <p>5) Secagem prévia dos agregados (proveniente do corte das barras, originando peças prismáticas com aproximadamente 2 cm de espessura) sob calor de lâmpada infravermelha ou unidade estufa;</p> <p>6) Lançamento destes agregados no forno, estando o mesmo já na temperatura final desejada (900°C), sendo calcinados por um período de 30 minutos;</p> <p>7) Reprovação das 3 amostras de solos do subleito da BR-163 e aprovação da amostra de olaria, depois de calcinadas, segundo ensaio de fervura e desgaste após fervura (DNER-ME 223/94 e DNER-ME 225/94);</p> <p>8) Realização de ensaio de tensão de ruptura por flexão (adaptado da NBR 6113) com a amostra de solo de olaria, mostrando um resultado satisfatório;</p> <p>9) Apresentação dos resultados dos ensaios de análise da composição química (pelo método EDS - <i>energy dispersive spectrometry</i>) e mineralógica (por difração de raios-X);</p> <p>10) Dosagem de mistura asfáltica do tipo concreto asfáltico usinado a quente pelo método Marshall (Faixa B), com agregados de argila calcinada produzidos com as amostras de solos de olaria, calcinados por 30 minutos à 900°C (com o forno pré-aquecido nesta temperatura), posteriormente quebrados e re-calcinados por mais 20 minutos, cimento portland como fíler e CAP-20;</p> <p>11) Determinação de uma densidade efetiva, sendo a mesma adotada para todos os agregados de argila (graúdos e miúdos) pelo método da Louisiana (LDH TR 312-69);</p>

Autor (es)	Ano	Tipo	Descrição das atividades realizadas
			<p>12) Avaliação satisfatória da adesividade do agregado de argila com o CAP-20, porém sendo apenas efetuado o aquecimento e envolvimento, sem o banho com temperatura controlada de 40°C por 72 horas em água destilada, conforme a norma DNER-ME 078/94;</p> <p>13) Tentativas de teores de ligante de 9%, 10% e 11%, sendo que para o teor de 9%, houve a perda dos corpos-de-prova por ocasião da desmoldagem;</p> <p>14) Cálculo da densidade teórica máxima da mistura através da fórmula ponderada, atingindo um teor ótimo de 9,7% de ligante, um volume de vazios de 4,0% (que é proveniente desta densidade teórica máxima da mistura calculada) e estabilidade Marshall em torno de 820 Kgf;</p> <p>15) Dosagem de mistura asfáltica do tipo pré-misturado a frio (Faixa C), com 100% de agregados de argila calcinada, emulsão asfáltica do tipo RM-1C nas tentativas de 12%, 14%, 16% e 18% de emulsão;</p> <p>16) Verificação dos parâmetros de resistência à tração, módulo resiliente (para o concreto asfáltico e PMF) e fadiga (para o concreto asfáltico);</p> <p>17) Valores médios encontrados (concreto asfáltico): $R_T (25^\circ\text{C}) = 0,65 \text{ MPa}$ $R_T (30^\circ\text{C}) = 0,33 \text{ MPa}$ $R_T (35^\circ\text{C}) = 0,22 \text{ MPa}$ $M_R (25^\circ\text{C}) = 2.086 \text{ MPa}$ $M_R (30^\circ\text{C}) = 1.068 \text{ MPa}$ $M_R (35^\circ\text{C}) = 780 \text{ MPa}$</p> <p>A estimativa da vida de fadiga mostra-se satisfatória, segundo o autor, em comparação a uma curva conhecida obtida com agregado natural, ressaltando-se que os módulos das misturas comparadas são significativamente diferentes.</p>

Autor (es)	Ano	Tipo	Descrição das atividades realizadas
			<p>18) Por último, são feitas simulações numéricas com o auxílio de programa computacional para dimensionamento de pavimentos (FEPAVE 2), aplicado ao projeto de pavimentação da BR-163, para verificar segundo os modelos mecanísticos, a possibilidade de emprego de camada de revestimento asfáltico utilizando o agregado de argila calcinada, em tentativas de espessuras de 5 cm, 7,5 cm e 10 cm.</p> <p>19) É constatado pelo autor, que todos os parâmetros são considerados admissíveis caso seja empregada uma espessura mínima de 7,5 cm, com os dados reais de solicitação de tráfego do projeto original.</p>

Legenda: IP = Iniciação à pesquisa; PFC = Projeto de fim de curso; DM = Dissertação de mestrado.

Considerações adicionais ainda são feitas a respeito destes estudos realizados em anos anteriores nos capítulos seguintes, principalmente dos resultados obtidos por BATISTA (2004), onde são comparados ensaios realizados com agregados produzidos em laboratório, e os com os agregados de argila calcinada produzidos em escala industrial de acordo com a metodologia da presente dissertação.

Relevantes estudos sobre o agregado artificial de argila calcinada estão sendo levados a efeito atualmente em outros centros de pesquisa, e são citados a seguir na TAB. 2.4 apenas a título de conhecimento:

TAB.2.4 Outras pesquisas sobre o agregado artificial de argila calcinada

Referência	Local	Título
FROTA et al. (2003)	UFAM	Estudo da substituição do seixo por agregados sintéticos de argila calcinada em misturas asfálticas
FROTA et al. (2004)	UFAM	Caracterização de solos para obtenção de agregado sintético de argila calcinada
NASCIMENTO (2005)	COPPE UFRJ	Soluções para pavimentação com o agregado de argila calcinada em Rio Branco (AC)

Sobre este último trabalho, cabe ressaltar que além de ser a primeira pesquisa de mestrado desenvolvida em outra instituição sobre o agregado de argila calcinada, foi de fundamental importância à presente dissertação, devido à simultaneidade em que ocorreram e pela disponibilização de informações e experiências.

2.6.2 PROBLEMAS ENCONTRADOS E AINDA NÃO SOLUCIONADOS

Face ao que foi exposto neste item 2.6 e tendo em mente a continuidade dos trabalhos realizados, estão listadas a seguir algumas questões que ainda denotam dúvidas para a obtenção do agregado de argila calcinada com qualidade satisfatória e o seu respectivo emprego na pavimentação. Questões estas que também compõem as recomendações realizadas por BATISTA (2004) e sua respectiva banca examinadora.

Esta listagem de questões ainda não tratadas visa de forma complementar, um melhor entendimento dos objetivos enumerados no capítulo 1.

→ Definição de uma metodologia que: possibilite identificar (preferencialmente através de ensaios de uso corrente) a matéria-prima capaz de produzir um agregado satisfatório, econômico e de qualidade próxima ou superior ao agregado natural; indicar os ensaios de verificação da resistência mecânica do agregado de argila calcinada que tenham maior relevância para a sua aplicação em pavimentação; permitir melhor avaliação e entendimento da composição química e mineralógica da matéria-prima e a sua relação com a qualidade final do agregado a ser obtido; proponha correções ou adições à matéria-prima para que a mesma possa servir à fabricação do agregado, uma vez que a mesma tenha sido julgada inservível em uma primeira análise;

→ Dentro ainda desta metodologia, propor sugestões para: a fabricação deste agregado em escala industrial, preferencialmente com opções de baixo investimento inicial, para atender localidades ou prefeituras que apresentem dificuldades financeiras, características estas que são freqüentemente observadas na região norte do país;

→ Definição de parâmetros mais característicos para a seleção da matéria-prima do agregado de argila calcinada, em detrimento dos parâmetros utilizados até então, frutos ainda da experiência do agregado de argila expandida, que necessita de uma

matéria-prima mais específica para atender os requisitos da piroexpansão;

→ Realização de um estudo minucioso sobre a porosidade e absorção do agregado de argila calcinada, e de prováveis aditivos para redução desta característica;

→ Variação do tempo e temperatura de queima, para verificação da influência destas variáveis na resistência mecânica e na porosidade do agregado;

→ Tentativa de uma produção experimental em larga escala, e/ou ainda algum trecho experimental com este tipo de agregado para conseqüente acompanhamento e análise;

→ Testar uma dosagem de mistura asfáltica do tipo concreto asfáltico usinado a quente com 100% de argila calcinada, sem a inclusão de fíler artificial;

→ Fazer as avaliações pertinentes para a utilização deste agregado em misturas solo-agregado para utilização em camadas de sub-base ou base de pavimentos, à luz dos métodos empíricos e mecânicos;

→ Previsão dos custos de fabricação deste tipo de agregado, até então desconhecidos, para comparação com os altos valores de aquisição e transporte dos agregados naturais na região norte do país;

→ Devido às características de alta absorção do agregado de argila calcinada, aferir a variação que ocorre no método de dosagem Marshall para a mistura asfáltica e as suas respectivas conseqüências, através da medição das densidades dos agregados e da mistura por diferentes métodos.

→ Propor de forma didática, um roteiro completo que habilite ao técnico da região amazônica, caso queira optar pela escolha desta alternativa, tomar conhecimento teórico da tecnologia do agregado de argila calcinada e dos equipamentos envolvidos na sua produção, possibilitando-o de executar todas as etapas necessárias à seleção da matéria-prima, produção do agregado e emprego como material de pavimentação.

3 A TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DOS MATERIAIS CERÂMICOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Durante os estudos relacionados aos agregados provenientes de matérias-primas argilosas, foi possível identificar uma grande similaridade com os processos metodológicos que são aplicados à indústria cerâmica.

De acordo com alguns autores tais como NORTON (1973) e de forma mais detalhada por SOUZA SANTOS (1992a), os agregados de argila expandida são considerados como um dos ramos da tecnologia dos materiais cerâmicos, inclusive com o desenvolvimento de uma metodologia de produção própria para a obtenção do agregado leve.

Com base nessas considerações, é que se pode notar diversos pontos em comum do desenvolvimento da pesquisa de agregados artificiais a partir da argila, com a produção de outros produtos cerâmicos, de diversos fins, principalmente quando se trata do controle tecnológico não somente do produto final obtido, mas também da prospecção e seleção da matéria-prima, dos fundamentos teórico-científicos envolvidos da engenharia química e de materiais, dos métodos de ensaios utilizados e de toda a aparelhagem necessária para a conformação e transformação de um determinado solo, com características completamente distintas do produto a ser originado.

Uma vez que a metodologia sugerida e tratada no capítulo seguinte, de forma análoga ao agregado de argila expandida, também está fundamentada na sua maior parte nestes conceitos citados, é que se faz necessária a apresentação de um capítulo voltado para a tecnologia de produção destes materiais cerâmicos, mais especificamente sobre o ramo desta ciência que trata da chamada “cerâmica vermelha”, para melhor entendimento da proposta metodológica formulada, principalmente pelo caráter multidisciplinar que envolve o assunto considerado.

Seguindo este raciocínio, são trazidas no presente capítulo, informações sobre um dos assuntos que ainda suscita dúvidas a respeito da caracterização da matéria-prima: quanto à sua mineralogia e composição química, os métodos de ensaios responsáveis por revelar estes resultados, e conseqüentemente a influência destas

propriedades na qualidade do agregado de argila calcinada a ser produzido.

Da mesma forma, é mostrado um estudo relativo à absorção do agregado artificial de argila calcinada, baseado nas propriedades características da porosidade e absorção inerentes aos produtos cerâmicos, paralelamente com o que é observado e admitido para os agregados naturais de origem rochosa.

Outro assunto tratado neste capítulo é a apresentação de metodologias empregadas em um processo de gestão de indústria cerâmica convencional, mostrando como é feito o estudo relativo à procura da matéria-prima a ser utilizada, os testes realizados, a avaliação e apresentação dos resultados.

Para melhor compreender na prática como é o funcionamento de todas estas etapas, foram realizadas visitas a alguns pólos cerâmicos dos estados do Rio de Janeiro e do Pará, encerrando-se o capítulo com o relato destas visitas.

3.2 OS MATERIAIS CERÂMICOS

3.2.1 DEFINIÇÕES

A palavra “cerâmica” é derivada da palavra grega *kerameikos*, que significa “feito de terra” ou “terroso”. Segundo a *American Ceramic Society*, os materiais cerâmicos compreendem todos os materiais de emprego em engenharia ou produtos químicos inorgânicos, excetuados os metais e suas ligas, que ficam utilizáveis geralmente pelo tratamento em temperaturas elevadas.

Utilizando o conceito de tecnologia desenvolvido pelo professor Ralph E. Grim (GRIM, 1962) da Universidade de Illinois, a tecnologia cerâmica pode ser definida como a aplicação dos conhecimentos fundamentais sobre a estrutura e as propriedades físico-químicas dos materiais cerâmicos às indústrias, artes e profissões, que fabricam, processam e utilizam os materiais cerâmicos.

Segundo SOUZA SANTOS (1989), estes materiais ditos cerâmicos são fabricados a partir de matérias-primas que incluem: matérias-primas naturais, matérias-primas beneficiadas; e matérias-primas sintéticas de características controladas.

De modo geral, as matérias-primas mais usadas em cerâmica são: argilas, feldspatos e sílica. Deve ser notado que o termo “argila” inclui uma variedade de

argilominerais e de materiais argilosos, tais como: caulins que contém caulinita e haloisita, argilominerais montmoriloníticos, ilíticos, *ball-clays*, argilas para louça, *flint clays*, argillitos, argilas refratárias, e outros. Os três argilominerais – caulinita, montmorilonita e illita – juntamente com hidróxidos de alumínio, óxidos e hidróxidos de ferro, sílica e feldspatos são os minerais mais freqüentemente encontrados em argilas.

O nome “argila”, também é dado a uma faixa de partículas de solo, cujas dimensões se encontram em um conjunto específico de valores. Podem-se citar algumas das escalas de classificação, conforme a TAB. 3.1:

TAB.3.1 Escalas granulométricas para a fração argila

Escala	Diâmetro máximo
<i>British Standards Institution</i>	2 µm
<i>International Society of Soil Science</i>	2 µm
<i>Massachusetts Institute of Technology</i>	
<i>US Department of Agriculture</i>	
Wentworth	4 µm
Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)	5 µm
<i>American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)</i>	
<i>American Society for Testing and Materials (ASTM)</i>	
<i>US Bureau of Soils</i>	
<i>US Public Roads Administration</i>	
Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)	75 µm

Fonte: ALEXANDRE, 2000; VIEIRA e LIMA, 1998.

Por meio de um processamento adequado, as propriedades dessas matérias-primas são alteradas em sua composição química, em estrutura cristalina e no arranjo das diversas fases componentes; geralmente pelo menos em uma das etapas do processamento, os materiais são submetidos a temperaturas elevadas para que as propriedades úteis desejadas sejam desenvolvidas.

Os materiais cerâmicos processados ou produtos cerâmicos são constituídos quer por uma fase vítrea, quer por uma fase cristalina que se apresenta como cristais únicos ou como aglomerados de cristais de diversas formas e dimensões,

quer por um sistema composto constituído por vidros e cristais, podendo também conter metais ou altos polímeros substituindo total ou parcialmente a fase vítrea; excepcionalmente podem conter uma fase amorfa ou não-cristalina, diferente da fase vítrea.

3.2.2 A INDÚSTRIA CERÂMICA

A indústria cerâmica brasileira tem grande importância para o país, tendo participação no PIB – Produto Interno Bruto – da ordem de 1,0%.

O Brasil conta com uma população em torno de 180 milhões de habitantes que geograficamente estão mais concentrados nas regiões sul/sudeste. Essas regiões também têm maior número de habitantes nas zonas urbanas, fator importante na análise da distribuição das empresas do setor cerâmico, no estudo dos hábitos de consumo e necessidades da população (BUSTAMANTE e BRESSIANI, 2000).

No Brasil convencionou-se definir o setor cerâmico em segmentos que se diferenciam pelos produtos obtidos e mais precisamente pelos mercados que estão inseridos. A seguir são listados os principais segmentos (TAB. 3.2), classificados pelo valor anual de sua produção, e na FIG. 3.1 são mostradas as localizações no Brasil da produção de alguns segmentos:

TAB.3.2 Produção anual dos segmentos do setor cerâmico

Segmento	Valor da Produção (1.000 US\$ / Ano)
Cerâmica estrutural (vermelha)	2.500.000
Revestimentos (pisos e azulejos)	1.700.000
Matérias-primas naturais	750.000
Refratários	380.000
Cerâmica técnica, especiais, outras	300.000
Sanitários	200.000
Louça de mesa e adornos	148.000
Fritas, vidrados e corantes	140.000
Matérias-primas sintéticas	70.000
Cerâmica elétrica	60.000
Equipamentos para cerâmica	25.000
Abrasivos	20.000
Total do Setor	6.293.000

Fonte: BUSTAMANTE e BRESSIANI, 2000.

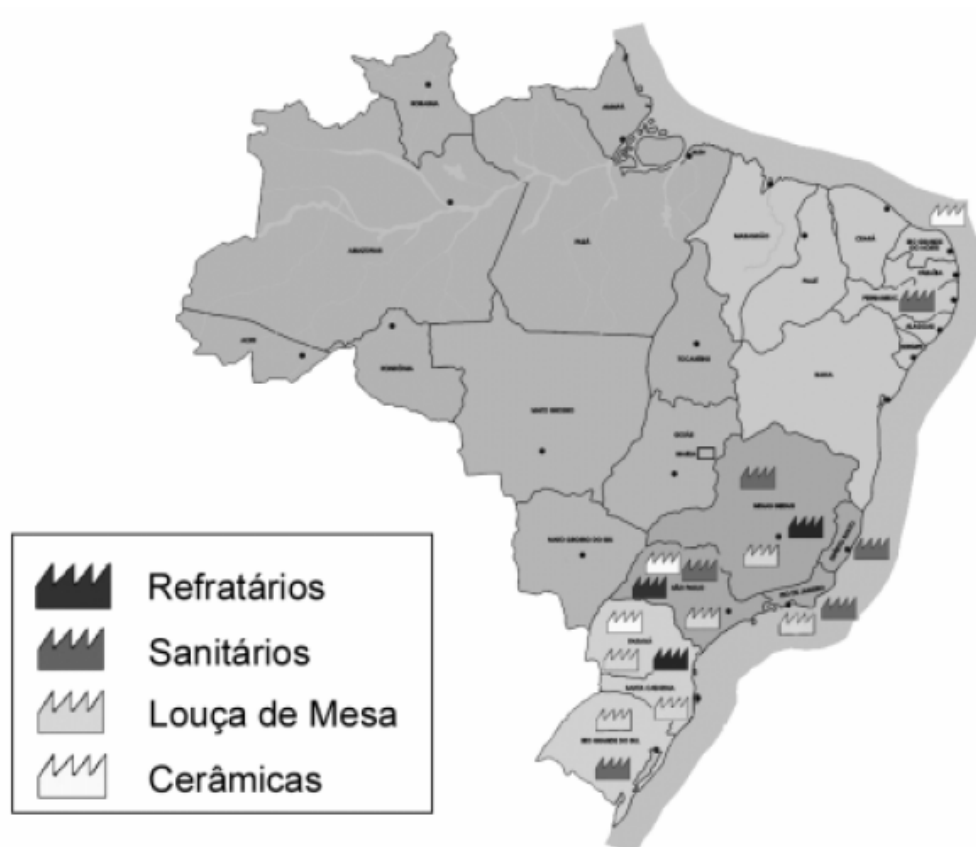


FIG.3.1 Localização de alguns segmentos do setor cerâmico brasileiro (BUSTAMANTE e BRESSIANI, 2000).

Como pode ser verificado, existe uma grande diversidade de segmentos, e para o presente estudo, está sendo verificado com maior detalhamento o segmento relativo à cerâmica vermelha. Não apenas pelo fato deste segmento ser o responsável por movimentar a maior e principal demanda do setor cerâmico, mais especificamente, como está mostrado nos itens seguintes, este é o segmento que mais se assemelha e o que proporcionou informações indispensáveis à pesquisa do agregado artificial de argila calcinada.

3.2.3 A CERÂMICA VERMELHA

Este segmento produz tijolos furados, tijolos maciços, lajes, blocos de vedação e estruturais, telhas, manilhas e pisos rústicos.

É uma atividade de base ao possibilitar a construção civil, em geral, desde a mais simples à mais sofisticada. Distribui-se por todo país, muito pulverizada, em

micro e pequenas empresas, quase sempre de organização simples e familiar.

Movimenta ao redor de 60.000.000 de toneladas de matérias primas ao ano, com reflexos nas vias de transportes, e no meio ambiente de lavra de argila.

Seu raio médio de ação quanto ao envio dos produtos está em torno de 250 km, a partir do qual o transporte é inviabilizado. Para as telhas o alcance é maior podendo estar em torno de 500 km havendo casos de 700 km para telhas especiais.

Segundo estudos específicos, na região sudeste localizam-se cerca de 3.600 empresas – 1.600 cerâmicas e 2.000 olarias -, sendo que as cerâmicas produzem uma média de 500.000 peças/mês, com 40 funcionários cada, e as unidades oleiras 75.000 peças/mês, com 8 funcionários cada. Ao todo, são estimadas cerca de 11.000 empresas no Brasil, com faturamento da ordem de R\$ 2,8 bilhões.

Essa renda fica nos locais de produção, com alto significado social na criação de emprego ao propiciar a construção em geral, principalmente de moradias (MOTTA et al., 2001; BUSTAMANTE e BRESSIANI, 2000).

Apesar da expressiva produção apontada, a tecnologia das cerâmicas ainda é antiga, desenvolvida há mais de 50 anos. A necessidade de investimento na melhoria de qualidade e produtividade é uma preocupação do setor. A materialização desta tendência vem sendo realizada lentamente, através de novas técnicas de gestão e, principalmente, pela introdução de plantas mais atualizadas, observadas em algumas fábricas de blocos cerâmicos estruturais e de telhas. Esses e outros produtos da cerâmica vermelha apresentam demanda reprimida no Brasil, devido ao déficit habitacional, e está sempre prestes a um crescimento significativo.

Do ponto de vista da matéria-prima, o setor utiliza argila comum, em que a massa é composta somente de argila, e pode ser denominada de simples ou natural.

Essa formulação de massa busca, em geral de forma empírica, uma composição ideal de plasticidade e fusibilidade, para propiciar trabalhabilidade e resistência mecânica na queima. A preparação da massa é feita geralmente através da mistura de uma argila “gorda“, que é caracterizada pela alta plasticidade, granulometria fina, e composição essencialmente de argilominerais; com uma argila “magra“, esta rica em quartzo e menos plástica, podendo ser caracterizada também como material redutor de plasticidade (MOTTA et al.,2001).

A composição granulométrica das massas e seus respectivos campos de aplicação são previstos no Diagrama de Winkler (FIG. 3.2 e TAB. 3.3).

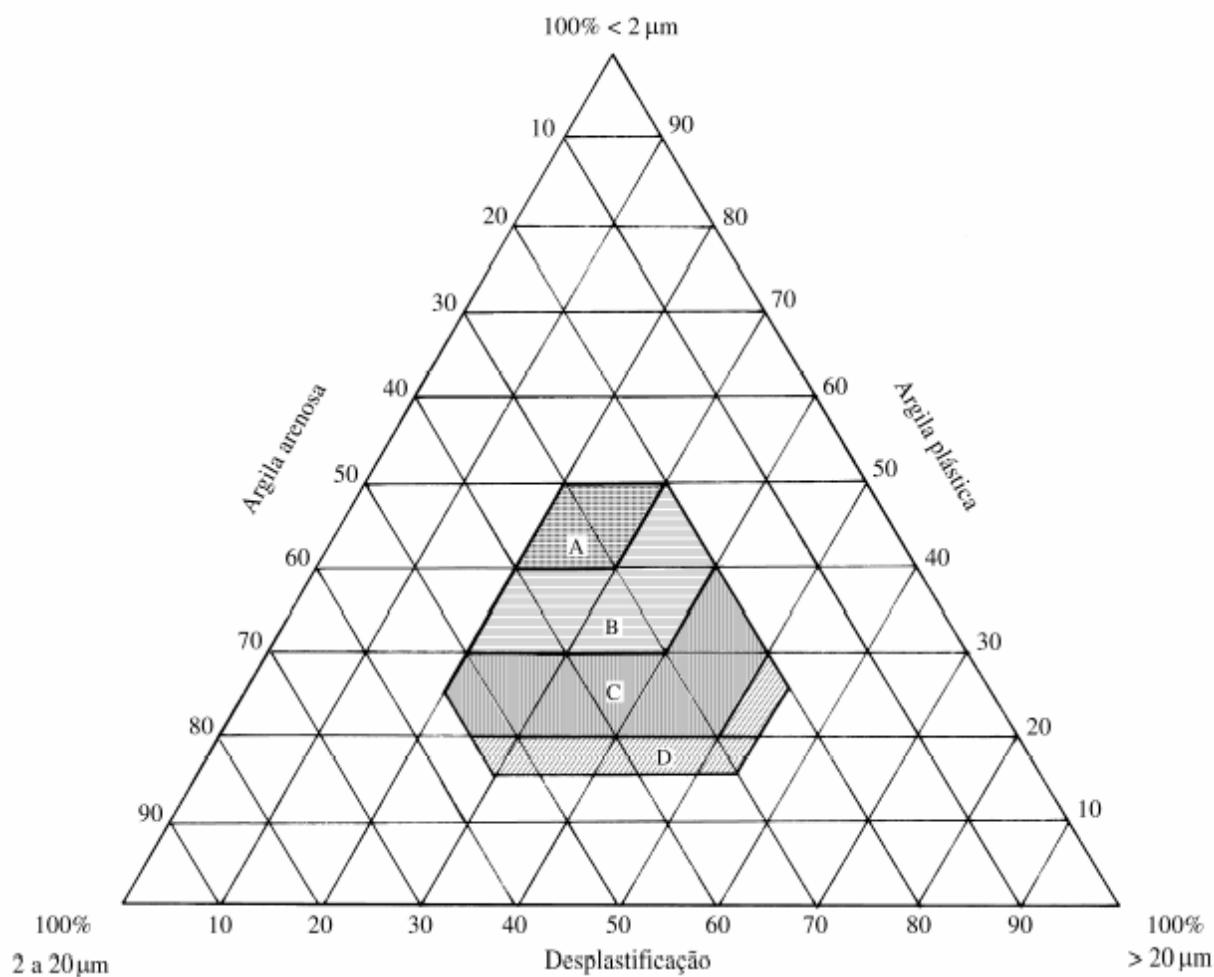


FIG.3.2 Diagrama granulométrico de Winkler (PRACIDELLI e MELCHIADES, 1997).

TAB.3.3 Composição granulométrica dos produtos de cerâmica vermelha, de acordo com o Diagrama de Winkler.

Regiões	Composição granulométrica		
	2 μm	2 a 20 μm	20 μm
A - Materiais de qualidade	40 a 50	20 a 40	20 a 30
B - Telhas, capas	30 a 40	20 a 50	20 a 40
C - Tijolos furados	20 a 30	20 a 55	20 a 50
D - Tijolos maciços	15 a 20	20 a 55	20 a 55

Fonte: PRACIDELLI e MELCHIADES, 1997; MOTTA et al., 2001.

PRACIDELLI e MELCHIADES (1997), apresentam um estudo experimental e

minucioso a respeito da influência dessa composição granulométrica e da utilização deste diagrama como ferramenta para a cerâmica vermelha:

“A composição granulométrica de massas de cerâmica vermelha exerce papel fundamental no processamento e nas propriedades dos diversos tipos de produtos. Para cada produto, há uma distribuição granulométrica que parece ser a mais adequada, sendo que o Diagrama de Winkler atua como uma ferramenta poderosa para a determinação destas composições.

A introdução de materiais não-plásticos (areia, chamota², pó-de-carvão, etc.) altera a granulometria das massas, visto que suas partículas constituintes apresentam tamanhos consideravelmente maiores que as argilas. A variação da distribuição granulométrica e da plasticidade da massa provoca alterações no comportamento das mesmas durante o processamento. O grau de compactação torna-se menor, facilitando o processo de secagem. Porém, a quantidade de água a ser introduzida na mistura deve ser determinada convenientemente, a fim de se facilitar o processo de extrusão, evitando danos na extrusora.”

Observa-se que, na prática ceramista, a utilização da classificação granulométrica da massa é empírica, baseada na experiência, o que dificulta a padronização. Outra observação é que os limites entre as classes de argila não são rígidos, notadamente entre as classes C e D, pois vários ceramistas usam a mesma massa para a confecção de telhas e blocos cerâmicos. Adicionalmente à composição granulométrica, que reflete o conteúdo de argilominerais e quartzo, as argilas contêm também proporções variadas de matéria orgânica, material que contribui para maior plasticidade e resistência mecânica a cru das peças.

Na seqüência do processo de fabricação, a massa é umidificada acima do limite de plasticidade e processada em misturadores e homogeneizadores, sendo conformada a seguir em extrusoras, quando adquirem as suas formas finais (blocos, lajes, lajotas, tubos) ou seguem para prensagem (telhas) ou tornearia (vasos).

Com exceção do agregado leve, a maioria dos produtos apresenta alta porosidade aberta, com pouca fase vítrea, decorrente da baixa temperatura de

² Mistura de alumina e sílica, aquecida a alta temperatura, e que é adicionada, depois de arrefecida, à massa de argila cerâmica que irá ser submetida à ação do calor para constituir material refratário

queima (800 a 900°C). Mesmo assim, mostram resistência mecânica suficiente para os usos a que são propostos. Os fundentes presentes estão contidos nas estruturas das argilas ilíticas e esmectíticas presentes ou adsorvidos nos argilominerais, tais como complexos ferruginosos e sais solúveis, que podem reagir durante os longos períodos de queima. A FIG. 3.3 ilustra o processo de fabricação de peças de cerâmica vermelha.

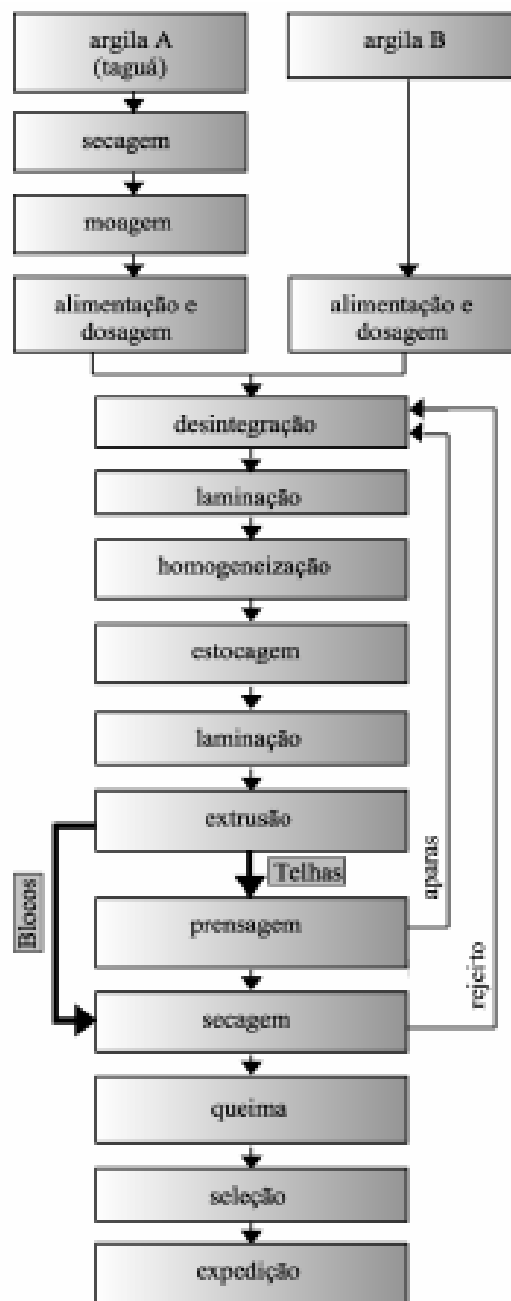


FIG.3.3 Fluxograma do processo de fabricação de blocos e telhas (MOTTA et al., 2001).

A exigência técnica dos produtos de cerâmica vermelha é mais rigorosa para

telhas e blocos estruturais, requerendo maior sinterização das peças. Nesses materiais, as argilas devem ser mais ilíticas ou conter a mistura destas ou de outros fundentes como filitos, como já vem sendo experimentado em algumas regiões, tal como em Monte Carmelo (MG) (MOTTA et al., 2001).

As argilas empregadas em cerâmica vermelha, como recursos minerais apresentam alto valor locacional, ou seja, devem necessariamente estar situada nas proximidades das cerâmicas. Desta forma, as distribuições das unidades produtoras são controladas pelas ocorrências dos depósitos de argila. A FIG 3.4 traz a localização dos principais pólos cerâmicos em alguns estados do sul/sudeste.

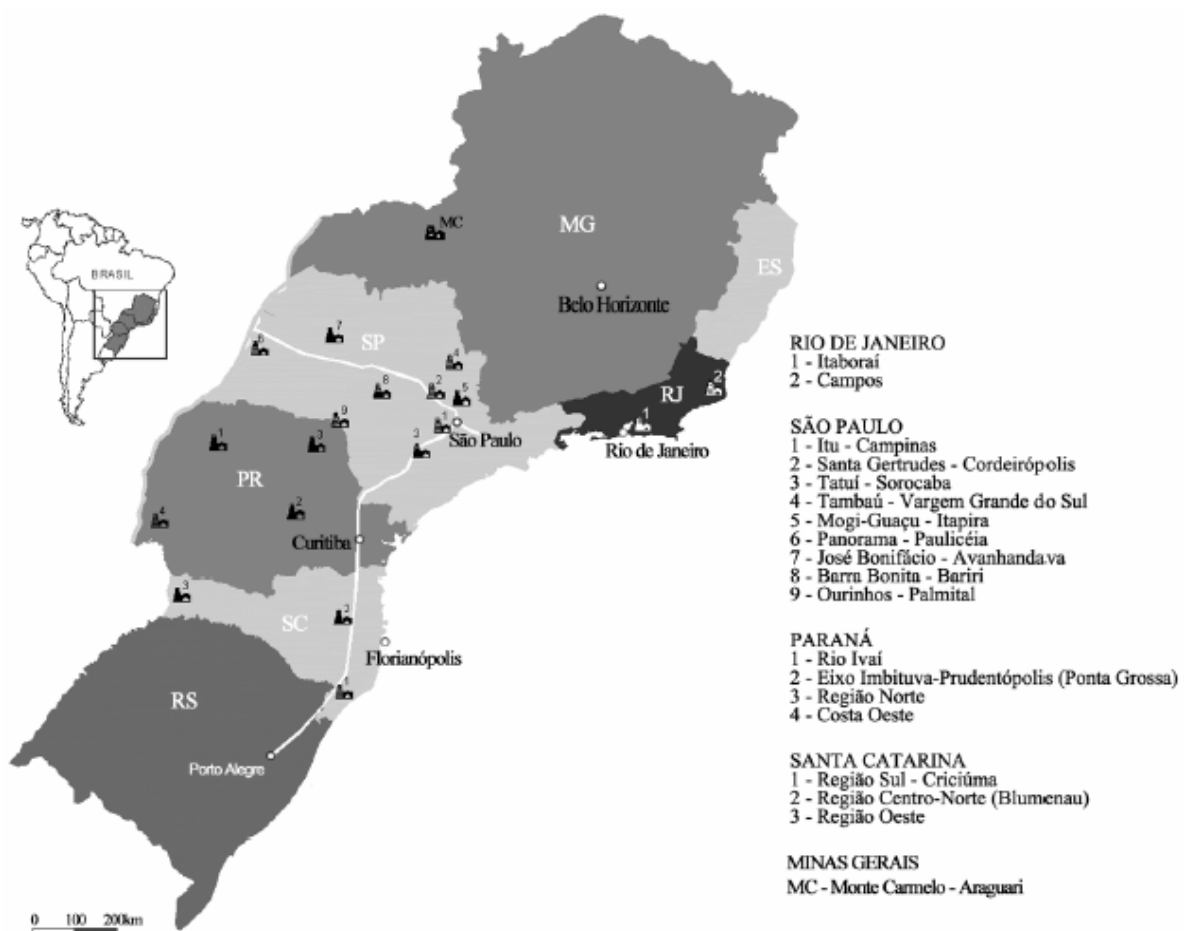


FIG.3.4 Localização dos principais pólos de cerâmica vermelha em alguns estados do sul/sudeste do país (MOTTA et al., 2001).

3.3 METODOLOGIAS UTILIZADAS NA OBTENÇÃO DE PEÇAS DE CERÂMICA VERMELHA

Face ao que é encontrado na literatura especializada sobre a fabricação de peças do segmento cerâmica vermelha, pode-se notar uma determinada divisão, que é também “proposta” nesta revisão bibliográfica apenas a título conceitual, sob o intuito de comparar com a metodologia empregada pela pesquisa do agregado de argila expandida do DNER (1980 e 1981) bem como, com a metodologia sugerida no capítulo seguinte. Considera-se então a seguinte divisão:

- 1ª Fase: Pesquisa e seleção da matéria-prima;
- 2ª Fase: Desenvolvimento operacional industrial;
- 3ª Fase: Controle tecnológico do produto e expedição para o mercado.

Lembrando as etapas do desenvolvimento da pesquisa do DNER (1981), revista no item 2.5.3 percebe-se a semelhança:

- Materiais;
- Indústria;
- Aplicação.

Cabe lembrar o que foi exposto no item anterior, em que a tecnologia utilizada para este segmento em particular no Brasil, de forma geral, ainda é antiquada, sendo observadas diversas unidades que operam praticamente de forma artesanal. Tal fato foi também constatado na prática segundo algumas visitas realizadas em pólos cerâmicos e está apresentado ainda neste capítulo. Sendo assim, nem sempre estas etapas aqui listadas estão presentes por completo em processos de gestão de grande parte das unidades cerâmicas do país.

Está sendo apresentada então uma seqüência de procedimentos que seria considerada otimizada em um processo de gestão, uma vez que algumas indústrias de vanguarda em particular praticam esta administração. Outro fato observado, particularmente para estas unidades industriais avançadas tecnologicamente, é o suporte técnico-científico de pesquisas acadêmicas principalmente na 1ª e 3ª Fase do processo aqui apresentado.

Estas observações foram também constatadas pessoalmente, e cita-se como exemplo desta parceria, o que ocorre no pólo cerâmico de Campos dos Goytacazes (RJ), um dos maiores pólos cerâmicos do país, por intermédio do Dr. Jonas

Alexandre, professor da Universidade do Norte Fluminense (UENF).

3.3.1 PESQUISA E SELEÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

Os laboratórios que estudam argilas são freqüentemente solicitados para estudar jazidas ainda não exploradas, visando prever se podem ter usos industriais e/ou classificadas como “argilas industriais”.

A partir do conhecimento das características do material torna-se possível obter parâmetros básicos em termos de produtos e processos.

Sendo assim, estudos sobre a caracterização das matérias-primas, visam um melhor aproveitamento tecnológico de suas propriedades, como a fabricação de produtos com maior valor agregado.

De acordo com SOUZA SANTOS (1989), uma seqüência de ensaios foi desenvolvida no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), e foi denominada "Ensaio Preliminares para Fins Cerâmicos", a qual visa prever os usos industriais de argilas (cerâmicos e não cerâmicos) a partir de ensaios cerâmicos simples. Esse ensaio preliminar, obviamente, não exclui a identificação dos argilominerais nem os ensaios mais completos visando os usos industriais específicos, mas usa a abordagem cerâmica, mais comum e equipamento não sofisticado.

Esse esquema segue três etapas, que são as seguintes:

I) Classificação da argila em três grupos cerâmicos pela cor apresentada por corpos de prova após secagem a 110°C e após a queima (*firing*) em três temperaturas;

II) Classificação da argila em subgrupos pelas propriedades físicas e mecânicas ou propriedades cerâmicas;

III) classificação em um dos tipos de "argilas industriais".

Essa seqüência, já em uso corrente há vários anos, foi desenvolvida procurando satisfazer aos seguintes requisitos:

→ Utilizar a menor quantidade possível de argila, uma vez que as amostras trazidas, via de regra, não excedem a 100 g;

→ Utilizar um corpo de prova moldado em condições de forma e dimensões tais que possa ser submetido ao maior número possível de ensaios;

→ Permitir o ensaio simultâneo de um grande número de amostras; ser de fácil

interpretação, mesmo quando utilizado por pessoas inexperientes.

A escolha da cor após queima como critério de classificação preliminar esta baseada não somente nas condições de uso prático como também no fato de a cor, após queima em várias temperaturas, de uma argila ser consequência principalmente da composição mineralógica e química da mesma; a queima, sendo feita em condições oxidantes, elimina a influência escurecedora das atmosferas reductoras na cor após queima.

Com esse método preliminar de classificação, não se pretendeu eliminar a possibilidade de uso de argilas que queimam, por exemplo, com cores claras ou diferentes da vermelha em cerâmica vermelha ou estrutural, desde que tenham características tecnológicas satisfatórias.

Com esse objetivo em vista procurou-se na segunda etapa complementar desses ensaios de cor após queima, a medida de características cerâmicas de argilas utilizadas na indústria cerâmica de São Paulo para várias finalidades, medindo-se as seguintes grandezas:

- módulo ou tensão de ruptura à flexão;
- retração na secagem e queima;
- porosidade, massa específica aparentes e absorção de água;
- previsão quanto a um uso cerâmico mais específico, previsão essa que pode compreender um ou mais usos prováveis para a argila.

Assim, uma argila de cor considerada inadequada, se tiver características cerâmicas semelhantes às de uma “argila padrão” utilizada para uma finalidade específica, poderá então ser recomendada para ensaios mais completos.

Por outro lado, materiais que, por exemplo, podem queimar com cores claras, como certas areias com pequenos teores de argila ou argilas ricas em turfa, são eliminados nos ensaios preliminares por terem resistência mecânica muito baixa.

Materiais de textura argilosa, que podem ter uso cerâmico ou outros usos tecnológicos, podem ser tomados como argilas usuais e ensaiados segundo o método acima; esses materiais podem ser talcos, bauxitos, paligorsquitas, sepiolitas, bentonitas, trípolis, diatomitas e espongiolitos.

Os resultados obtidos podem indicar a rejeição dos mesmos quanto ao uso cerâmico; nos casos de rejeição, para evitar a perda de materiais de valor tecnológico, é sempre conveniente executar ensaios, como a análise térmica

diferencial, difração de raios X (DRX), microscopia óptica ou eletrônica ou então a comparação com corpos de prova desses tipos de materiais, quando não se têm os aparelhos físicos à disposição ou o operador não tem experiência suficiente no campo (SOUZA SANTOS, 1989).

SOUZA SANTOS (1989) e MINEROPAR (2004) relatam, confirmado pela prática observada nos laboratórios de tecnologia cerâmica, inclusive nos departamentos regionais do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI (SENAI, 1999), o que é, em resumo, o fundamento da seqüência dos métodos de ensaio utilizados no IPT para o estudo da aplicação tecnológica de uma argila.

Para uma síntese do sistema de ensaios, apresentam-se a seguir os estágios a serem seguidos, estágios estes que são listados minuciosamente, pois em sua maioria estão também compondo a metodologia proposta para o desenvolvimento do agregado de argila calcinada:

A) Amostragem

O material a ser ensaiado deve ser coletado no local do jazimento, após limpeza prévia de uma área de aproximadamente 1m², retirando-se a vegetação, folhas e todo o solo arado, até se encontrar a argila que será extraída por meio de trados ou sondas adequadas. Os testemunhos assim obtidos, encerram porções de diversas profundidades do material em teste. Os diversos intervalos devem ser precisamente registrados, sendo as amostras acondicionadas em sacos plásticos resistentes e etiquetados.

B) Ensaio de caracterização

São vários os ensaios usados para caracterizar materiais de interesse para cerâmica vermelha e estrutural. A metodologia desenvolvida pelo IPT, prevê ensaios de caracterização em vários níveis:

B.1) Na matéria-prima

- análise granulométrica em peneiras;
- identificação do resíduo nas peneiras;
- determinação da umidade natural;
- determinação da umidade após moagem em moinho de disco;
- determinação do limite de plasticidade.

B.2) Em corpos de prova 20,0 x 2,0 x 1,0 cm moldados por extrusão

B.2.1) Caracterização dos corpos de prova secados a 110°C:

- água de amassamento (%)
- retração linear de secagem (%)
- tensão ou módulo de ruptura à flexão (kgf/cm²)
- cor

B.2.2) Caracterização cerâmica dos corpos de prova após queima a 950°C, 1050°C, 1150°C e 1250°C:

- retração linear (%)
- tensão de ruptura (kgf/cm²)
- absorção d'água (%)
- porosidade aparente (%)
- massa específica aparente (g/cm³)
- cor

B.3) Em corpos de prova de 20,0 x 2,0 x 10,0 cm moldados manualmente

• Procede-se aos mesmos testes realizados para os corpos de prova moldados por extrusão.

B.4) Em corpos de prova de 6,0 x 2,0 x 0,5 cm moldados por prensagem sob pressão de 200 kgf/cm²

B.4.1) Caracterização dos corpos de prova secos a 110°C

- umidade natural de secagem ao ar (%)
- umidade de prensagem (%)
- retração linear de secagem (%)
- tensão ou módulo de ruptura à flexão (kgf/cm²)
- cor

B.4.2) Caracterização dos corpos-de-prova após queima a 950°C, 1150°C e 1250°C. Mesmos testes para os corpos de prova moldados por extrusão.

C) Parâmetros avaliados

C.1) Na argila crua

C.1.1) Plasticidade:

Entende-se a plasticidade como sendo a propriedade que um corpo sólido tem quando sofre uma deformação por aplicação de uma carga qualquer, permanecendo deformado mesmo após a retirada de carga.

O limite de plasticidade é definido como a quantidade mínima de água, onde a massa plástica perde sua plasticidade tornando-se esfarelada, ou, em outras

palavras, é a quantidade mínima de água necessária para que a argila adquira plasticidade para ser moldada. O procedimento de ensaio é normalizado pela NBR 7180-84. Determina-se este parâmetro visando:

- verificar se as argilas são suficientemente plásticas para serem usadas na fabricação de produtos pelo processo de extrusão;
- verificar se as argilas são suficientemente plásticas para serem usadas como barbotinas³ empregadas na produção cerâmica por processo de colagem;
- comparar os resultados com os de uma argila padrão.

C.1.2) Granulometria:

O ensaio granulométrico permite a avaliação da variação dos tamanhos de grãos e a quantidade de partículas de cada intervalo definido pela seqüência de peneiras empregada. O método de ensaio é normalizado pela NBR 7181.

Teoricamente, uma argila que possua 60% de partículas na fração argila, 20% na fração silte e 20% na fração areia, terá alta plasticidade e boa resistência à flexão após secagem.

C.2) Após secagem

C.2.1) Umidade de conformação:

O conhecimento da umidade de conformação é importante para que se tenha uma indicação da quantidade de água a ser incorporada no processo de fabricação, para prever que tipo de processo de secagem deve ser utilizado para evaporar uma determinada quantidade de água, bem como para evitar trincas e lascamentos das peças cerâmicas cruas. A argila deve ser moldada com o mínimo possível de água.

A umidade de conformação depende diretamente do tamanho e tipo de partícula mineral. Por tipo, entende-se composição química, morfologia e estrutura da partícula.

C.2.2) Retração nas argilas:

A retração de secagem da argila varia em função de sua plasticidade. A retração de secagem não deve ser muito elevada (acima de 6%) para não apresentar dificuldades no processo de fabricação.

C.2.3) Resistência à flexão:

As argilas devem apresentar uma boa resistência mecânica após secagem, pois

³ Mistura fluida de pasta cerâmica

devem suportar o manuseio e o transporte nas linhas de produção.

A resistência da argila no estado seco está intimamente ligada à composição granulométrica. A mais adequada é aquela que tem em torno de 60% de substâncias argilosas, estando o restante do material, dividido igualmente em silte, areia fina e areia média. Esse método de ensaio para avaliar a resistência à flexão é normalizado pela NBR 6113-97.

C.3) Após queima

C.3.1) Retração:

A retração é a tendência que a argila tem em diminuir de volume pela perda de umidade por secagem e queima. Se uma massa cerâmica retrai 8% após secagem e queima, pode-se calcular o tamanho que a peça deve ser moldada e cortada para que o produto final atinja o tamanho adequado para venda.

No total, a retração linear (secagem e queima) não deve exceder a 12%, sob o risco de aparecimento de deformações ou trincas no produto final.

C.3.2) Absorção e porosidade:

Estes ensaios são bons indicadores da qualidade final do produto cerâmico. Medem o grau de vitrificação obtido na temperatura em que este foi queimado, visto que para uma mesma massa, à medida que aumenta a temperatura de queima, diminui firmemente a porosidade, melhora grandemente a resistência mecânica e outras características como, por exemplo, resistência à abrasão e ao choque. Quanto maior o grau de vitrificação na peça, menor a porosidade e maior a resistência à flexão. Tal método de ensaio para avaliar a absorção, porosidade e alguns outros parâmetros (massa específica e densidade) é normalizado pela NBR 6220-97.

C.3.3) Resistência à flexão:

O conhecimento da resistência mecânica após queima é importante para verificar se o produto final atenderá as especificações requeridas e também a temperatura de queima ideal.

D) Outros ensaios

O professor Georges Millot da Universidade de Strasbourg (extremo leste da França), faz uma citação (MILLOT, 1964) sobre o histórico da pesquisa relacionada aos argilominerais, em que recomenda a leitura de GRIM (1962); relata e separa por períodos como eram realizadas estas pesquisas; e basicamente ratifica a

importância do advento da técnica de difração por raios X, entre as décadas de 30 e 50.

A identificação dos argilominerais presentes em uma argila é relativamente simples, quando se trata de uma amostra que contém apenas um argilomineral. Quando se trata de uma amostra de argila que apresente uma mistura de argilominerais de grupos diferentes, o processo de identificação é mais complexo. Os métodos de estudo mais usuais são: análise química, capacidade de troca de cátions (CTC), análise térmica diferencial (ATD), análise termogravimétrica (ATG), ensaio de difração de raios X (para identificação mineralógica), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de transmissão e espectrometria de raios X (ALEXANDRE, 2000).

Para um primeiro entendimento destes ensaios, torna-se interessante a visualização da TAB. 3.4, mesmo sabendo que esta análise é relacionada à avaliação da escória de aciaria a ser utilizada como agregado (MACHADO, 2000). Na seqüência, ilustra-se na FIG. 3.5 e na TAB. 3.5, respectivamente, um certificado em que são apresentados alguns resultados de uma amostra de argila visando a sua utilização cerâmica e um quadro resumo das normas da ABNT utilizadas para esta fase de análise e seleção da matéria-prima.



INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS

CIDADE UNIVERSITÁRIA "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"
CAIXA POSTAL, 7141 - SÃO PAULO - BRASIL

Certificado N.º

Material: Argila

Natureza do trabalho: Ensaio preliminar da argila visando sua utilização na indústria cerâmica

Interessado: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal do Paraná

Amostra: Fornecida pelo interessado com a indicação IPQ-5

RESULTADOS

Ensaaios cerâmicos realizados com corpos de prova de 6,0 cm x 2,0 cm x 0,5 cm, moldados por prensagem, sob pressão de 200 kgf/cm², com argila moída:

a) Características dos corpos de prova secos a 110 °C:

Umidade de prensagem..... 2,1 %
Retração linear de secagem..... 2,1 %
Tensão de ruptura a flexão (módulo de ruptura).30
Cor.....marrom(2,544)

b) Características cerâmicas dos corpos de prova após a queima:

Temperatura de queima	Perda ao fogo (%)	Tensão de ruptura (kgf/cm ²)	Retração linear (%)	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Cor após a queima
950 °C	13,7	101	2,5	2,0	33,5	1,52	Vermelha
1 250 °C	14,1	347	14,6	2,3	4,9	2,12	Marrom
1 450 °C	N.det.	S.Q.*	S.Q.	S.Q.	S.Q.	S.Q.	Preta

*Superqueimou com fusão e perda de forma

Uso provável (dependendo de ensaios completos): cerâmica vermelha ou estrutural (tijolos de alvenaria; tijolos furados; e telhas)

FIG.3.5 Certificado de ensaio preliminar para emprego da argila como matéria-prima cerâmica (SOUZA SANTOS, 1989).

TAB.3.4 Caracterização da escória de aciaria através da análise química, ATD, ATG e difração de raios X.

Técnica analítica	Mecanismo de análise	Resultado obtido
Análise química por fluorescência de raios X	Análise quantitativa total expressa em porcentagem de óxidos (em peso)	Análise quantitativa total das espécies químicas presentes na escória
Análise química pelo Etilenoglicol (NBR 7227/89)	Dissolução da amostra em etilenoglicol seguida de titulação em solução padrão de HCl	Determinação do teor de $\text{CaO}_{\text{livre}}$
Gasometria (MB 3377/90)	Determinação do anidrido carbônico (CO_2) pela absorção do CO_2 pelo $\text{Ba}(\text{OH})_2$	Determinação do teor de carbonatos em função do teor de CO_2 presente na amostra
Análise térmica (ATD e ATG)	Estabilidade e decomposição térmica dos compostos presentes na amostra de escória	Determinação do teor das espécies químicas a partir da decomposição térmica do material
Difração de raios X (DRX)	Determinação da composição mineralógica em função das distâncias interplanares das estruturas cristalinas	Determinação qualitativa da composição mineralógica

Fonte: MACHADO, 2000.

TAB.3.5 Normas preconizadas para a 1ª Fase (item 3.3.1).

Norma	Título
NBR6113	Materiais refratários densos conformados - Determinação da resistência à flexão à temperatura ambiente
NBR6220	Materiais refratários densos conformados - Determinação da densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida
NBR7180	Solo - Determinação do limite de plasticidade
NBR7181	Solo - Análise granulométrica

3.3.1.1 ANÁLISE QUÍMICA E CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIONS

Apesar da análise química não permitir uma avaliação completa da composição mineralógica e das propriedades físico-químicas e tecnológicas da argila, mesmo assim ela fornece dados fundamentais que são de grande utilidade industrial e científica.

Segundo NORTON (1973), o conhecimento da composição química de argilas propicia informações para a avaliação de seus usos específicos em cerâmica, quando usada em combinação com as propriedades físicas.

A análise química costumava ser executada segundo o chamado método clássico, que embora fosse demorado, permitia a obtenção de resultados bastante exatos. Com o desenvolvimento de técnicas modernas pode-se fazer a análise de argilas usando-se métodos complexométricos e instrumentais. As determinações usuais são:

Umidade; Perda ao fogo; SiO₂; Al₂O₃; TiO₂; Fe₂O₃; FeO; CaO; MgO; Na₂O; K₂O; Cu; Mn; Matéria orgânica, Capacidade de troca de cátions e identificação de cátions trocáveis; excepcionalmente determina-se lítio, crômio, cobalto, níquel e zinco.

Procura-se conseguir a análise química completa unicamente por métodos instrumentais que evitem a etapa longa e trabalhosa da fusão e insolubilização da sílica, seguida por separação dos elementos; utiliza-se então a espectrografia ou fluorescência dos raios X, ou ainda por espectrometria de absorção atômica.

Está apresentado a seguir um breve resumo, de como é realizada a interpretação dos resultados de ensaios de análise química, de acordo com SOUZA SANTOS (1989):

→ Umidade

As argilas normalmente contêm um teor variável de umidade, porém a apreciação dos resultados da análise química deve sempre ser feita sobre o material seco, daí a importância dessa determinação.

Por outro lado, as argilas contendo argilominerais dos grupos da montmorilonita e da sepiolita-paligorsquita não perdem totalmente a água intercalada entre camadas (*interlayer water*) e de coordenação, e também a água adsorvida nos poros estruturais (*zeolitic water*), a não ser entre 200°C e 250°C; desta forma, dificilmente se conseguem valores constantes para a umidade dessas argilas, sendo conveniente determinações até peso constante em várias temperaturas até 250°C, se for necessário.

Outro tipo de umidade que costuma ser determinado em argilas é a água higroscópica ou a higroscopicidade: é a umidade que a argila adquire em equilíbrio em ambientes saturados de vapor de água em temperaturas entre 15°C e 25°C; nessas condições, argilas cauliníticas e haloisíticas apresentam até 5% de umidade de higroscopicidade enquanto argilas esmectíticas atingem até 30% de umidade higroscópica.

→ Perda ao fogo:

A perda ao fogo é principalmente, devido à água intercalada, de coordenação e zeolítica, a água de hidroxilas dos argilominerais e também de hidróxidos existentes, tais como $\text{Al}(\text{OH})_3$ e $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Todavia, os componentes voláteis de matéria orgânica, sulfetos, sulfatos e carbonatos, quando presentes, são incluídos nesta determinação.

A perda ao fogo é muito importante para as argilas refratárias, onde a porcentagem dos óxidos deve ser referida ao material queimado para o cálculo da composição química da argila queimada.

A partir de ábacos ou gráficos (NORTON, 1973), é possível calcular aproximadamente o "ponto de fusão" de uma argila conhecendo-se a composição química; como as argilas apresentam pontos de fusão incongruentes, isto é, a composição da fase líquida (vidro) é diferente da composição da fase sólida

(geralmente mulita), a argila não apresenta uma temperatura única de amolecimento e sim uma faixa de temperaturas de amolecimento ou de redução da viscosidade.

→ SiO_2 :

O conteúdo de SiO_2 obtido através da análise química é devido a silicatos e a sílica livre. Os silicatos são os argilominerais, as micas e os feldspatos. A sílica livre é proveniente de quartzo (variedade cristalina), opala (variedade amorfa), ágata e calcedônia (variedades criptocristalinas), e ácidos silícicos amorfos.

Nas argilas residuais, a sílica livre é devida principalmente ao quartzo macroscópico, que é um constituinte comum das rochas ígneas; nas argilas sedimentares, além de quartzo microscópico, podem-se encontrar as formas amorfas e criptocristalinas de sílica.

A sílica livre numa argila causa redução, não somente da plasticidade, como também leva a uma baixa retração linear. Quanto a refratariedade, o efeito da sílica livre é variável. Argilas que contenham alta porcentagem de agentes fundentes (Fe_2O_3 , FeO , CaO , MgO , Na_2O e K_2O) e também de sílica livre, tem seu ponto de fusão mais alto em comparação às argilas de mesma composição química, porém tendo sílica combinada.

Se a argila for altamente aluminosa e com porcentagem baixa de agentes fundentes, o efeito da sílica livre é o de reduzir a refratariedade, além de produzir efeitos nocivos, devido às mudanças de fase cristalina da sílica com a temperatura.

→ Al_2O_3 :

O alumínio existente numa argila é em sua maior parte combinado formando os argilominerais, geralmente caulinita. Algumas argilas apresentam teor de Al_2O_3 superior ao da caulinita "teórica" que é de 39,8% provenientes também de boemita, gibsite, diásporo ou claquita (hidróxido de alumínio amorfo), sendo, portanto, altamente aluminosas e de interesse na fabricação de materiais refratários. Alguns caulins primários costumam ter teores de Al_2O_3 superior a 39,8% devido à remoção de sílica da caulinita por águas alcalinas de intemperismo; hidróxidos de alumínio podem ser detectados nesses caulins por análise térmica diferencial ou por difração de raios X.

Neste ponto é interessante ser mencionado que o teor de Al_2O_3 de um material refratário sílico-aluminoso, quando é superior a 46,0%, o classifica segundo as normas da ABNT como aluminoso ou altamente aluminoso; se inferior a 46,0%, é

chamado sílico-aluminoso. Essa classificação se baseia no fato de a caulinita ser o argilomineral mais rico em Al_2O_3 e é o constituinte essencial de argilas refratárias; o maior teor de Al_2O_3 possível de ser obtido em um refratário feito apenas de caulinita é de 46,0%, o que justifica o nome de sílico-aluminoso para refratários feitos com argilas contendo teores de Al_2O_3 inferiores a 39,80% no estado cru.

→ TiO_2 :

O óxido de titânio ocorre em quase todas as argilas, sendo rutilo, ilmenita e anatásio os minerais mais comuns. O último é um mineral que figura como o mais resistente ao intemperismo, e quando sua presença ou alguma porcentagem é assinalada numa argila, indica geralmente origem sedimentar. O rutilo se comporta de maneira semelhante quanto aos agentes de intemperismo e de transporte, sendo também freqüente nas argilas sedimentares, especialmente argilas refratárias e caulins sedimentares; disso resulta terem essas argilas um teor mais elevado de TiO_2 do que as argilas residuais.

Muitas vezes o TiO_2 não é dosado e um analista inexperiente pode não saber que ele se encontra incluído no teor de Al_2O_3 experimental da argila. Para quantidades baixas de TiO_2 (abaixo de 1%) não há praticamente alteração nas propriedades tecnológicas da argila; porém, quando os teores são elevados, a porcentagem de Al_2O_3 indicada na análise química deixa de ter exatidão e problemas, como, por exemplo, de cor cinzenta na argila, podem ser devidos a óxidos de titânio. Para evitar dúvidas convém sempre indicar a soma ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$) toda vez que o TiO_2 não for dosado individualmente.

Nem sempre esses teores elevados de TiO_2 ocorrem apenas nas argilas sedimentares: na análise química de uma argila residual verde nontronítica, que ocorre na região de Sacramento (MG), são encontrados teores elevados de TiO_2 .

→ Fe_2O_3 e FeO :

Hematita, magnetita, limonita, lepidocrocita, goetita e pirita são os minerais de ferro mais freqüentemente encontrados nas argilas e seus efeitos se fazem sentir principalmente na alteração da cor da argila queimada e na redução da refratariedade. Argilas livres de óxidos de ferro, quando calcinadas, geram um produto de cor branca; com 1% de óxidos, a argila se torna amarela e a cor tende a se intensificar com porcentagens maiores. Entretanto, deve-se notar que nem sempre há proporcionalidade entre a cor e a quantidade de óxidos de ferro indicados

pela análise química, devido ao fato de o ferro poder entrar em combinação com outros componentes da argila, formando vidros.

É o caso de argilas ricas em ilita ou nontronita, em que o ferro faz parte do reticulado cristalino, formando vidros com mais facilidade e dando origem a cores vermelhas de tonalidades vivas ou brilhantes, de interesse nos ladrilhos para pisos de cor vermelha, ou a cores escuras, quando a queima é feita em atmosfera redutora. Teores elevados de ferro e baixos teores de sílica levam a cores negras porque principalmente se forma magnetita e não há formação de vidros na queima.

Esses tipos de argilas ricas em ferro são geralmente utilizadas em cerâmica vermelha ou estrutural (tijolos, telhas, ladrilhos de piso, agregados leves para concreto).

Convém ressaltar novamente o problema que ocorre durante a operação de fusão da argila com carbonato de sódio, problema esse que pode conduzir a resultados baixos para o Fe_2O_3 . É observado também que, se a fusão é realizada em maçarico, se tem uma perda de ferro da ordem de até 50% nessas condições; isso é decorrente da redução do ferro que adere ao cadinho de platina e que só é removido por meio de fusão com pirossulfato de potássio ou com sucessivos tratamentos com ácido clorídrico. Isto é evitado fazendo-se a fusão em mufla em atmosfera oxidante.

→ CaO e MgO:

Óxidos de cálcio e de magnésio são agentes fundentes e tendem a baixar a refratariedade das argilas. São geralmente provenientes de calcita, dolomita, gipsita e são raramente encontrados nas argilas caulínicas do tipo refratário. A presença de cálcio, principalmente em argilas classificadas como montmoriloníticas, é, geralmente, na forma de cátion trocável, se não estiverem presentes os minerais mencionados anteriormente.

Se a argila não contiver calcário, dolomita, magnesita, serpentina, talco, e a análise química indicar teores de MgO não-trocável como cátion até 10%, deve-se sempre pensar em grande possibilidade da presença de argilomineral montmorilonítico ou do grupo sepiolita-paligorskita.

→ Na_2O e K_2O :

Os álcalis encontrados nas argilas são quase que totalmente devido a feldspatos, micas ou cátions trocáveis. São agentes fundentes e, portanto,

indesejáveis para materiais refratários, porém são fundamentais para a vitrificação de porcelanas e outros produtos de cerâmica branca. Geralmente, o teor de K_2O nas argilas é bem mais elevado que o de Na_2O , porque minerais micáceos são mais resistentes ao intemperismo.

Em caulins lavados, tem-se um teor de K_2O da ordem de cinco a dez vezes mais elevado que o teor de Na_2O . Certas argilas untuosas ao tato, de textura lamelar ou folhada e com teores elevados de potássio (até 9% a 10%) são chamadas "filitos cerâmicos" na nomenclatura usual da indústria de cerâmica branca de São Paulo. Essas argilas residuais são uma mistura natural de mica moscovita finamente dividida (sericita), quartzo e caulinita em proporções diversas. Os "filitos cerâmicos" são argilas claras, de cores brancas, rósea ou cinza-clara, com teores variáveis de Fe_2O_3 e quando queimadas a $1250^\circ C$, vitrificam totalmente, adquirindo cores claras, geralmente de tonalidade cinza; teores pouco acima de 1% de Fe_2O_3 em "filitos cerâmicos" provocam cores tão escuras que os tornam inutilizáveis em cerâmica branca.

Os taguás⁴, argilas ou folhelhos argilosos de origem sedimentar, também apresentam teores elevados de K_2O , além de Fe_2O_3 porque têm em sua composição argilominerais ilíticos e de camadas mistas illita-montmorilonita. Os taguás apresentam cores verde, vermelha e marrom, e têm alto teor de Fe_2O_3 ; queimam entre $1000^\circ C$ – $1100^\circ C$, vitrificando totalmente e adquirindo cores vermelho-brilhantes.

Cabe aqui ressaltar que esta descrição será exatamente confirmada no capítulo de aplicação da metodologia proposta, por ocasião da análise química elaborada com amostra de argila proveniente da região amazônica, empregada na produção dos agregados de argila calcinada. Tal denominação "taguá", ou ainda "tabatinga", são ambas conhecidas na região.

→ Matéria orgânica:

A matéria orgânica contida em muitas argilas lhes confere um caráter plástico muito desejável devido ao fato dos ácidos úmicos agirem como colóide protetor hidrofílico das partículas de argilominerais. Deve-se notar também que a matéria orgânica tem grande influência sobre a capacidade de troca de cátions, uma vez que

⁴ Termo regional referente a uma argila aluvional colorida por óxido de ferro.

100g de matéria orgânica apresentam uma capacidade de troca de cátions de ordem de 150 a 200 meq., resultados estes semelhantes aos obtidos com uma montmorilonita ou uma vermiculita.

A matéria orgânica encontrada nas argilas ocorre na forma de linhito, ceras e derivados do ácido úmico. Sua determinação pode ser feita por três processos: combustão a seco, oxidação com água oxigenada e oxidação com solução ácida de dicromato de potássio.

No primeiro caso, o material é aquecido a 1050°C em um forno elétrico e o CO₂ libertado é recolhido num aparelho de absorção e dosado. O CO₂ proveniente de carbonatos deve ser dosado à parte e subtraído. No IPT este processo vem sendo usado, utilizando um aparelho de dosagem de carbono em aço, mas a temperatura de aquecimento normalmente usada é de 600°C, o que evita decomposição de carbonatos e permite eliminar a operação de dosagem dos mesmos para posterior correção dos resultados.

Os outros processos indicados pela literatura são mais antiquados e envolvem métodos mais demorados e não estão sendo considerados neste trabalho.

→ Capacidade de troca de cátions - CTC:

As argilas têm a propriedade de reagir química e reversivelmente com cátions devido ao fato de apresentarem uma carga negativa em sua superfície externa, devido a substituições isomórficas dentro do cristal dos argilominerais de Al³⁺ por Mg²⁺ e de Si⁴⁺ por Al³⁺ e também devido a ligações partidas (*broken bonds*) dos íons superficiais do cristal, além da substituição do hidrogênio das hidroxilas. As argilas do grupo da caulinita apresentam CTC menor que as do grupo da montmorilonita, pois além de trocarem cátions em sua superfície externa, também adsorvem cátions entre as camadas estruturais. Os cátions naturalmente fixados são H⁺ ou H₃O⁺, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺, podendo ser trocáveis por outro cátion, como por exemplo, NH₄⁺, Na⁺, Mg²⁺, Sr²⁺, Ba²⁺; o íon Na⁺ troca totalmente o Ca²⁺ natural.

A capacidade de troca de cátions de um argilomineral é geralmente expressa em miliequivalentes por 100g do argilomineral secado a 110°C. O problema da secagem a 110°C dá uma faixa larga de valores para argilominerais dos grupos da montmorilonita e da sepiolita, porque estes argilominerais não perdem toda a água intercalada ou zeolítica a 110°C.

A faixa usual de valores da capacidade de troca de cátions dos vários

argilominerais é apresentada na TAB. 3.6.

TAB.3.6 Valores usuais da CTC de alguns argilominerais.

Argilomineral	Capacidade de troca de cátions – CTC
Caulinita	3 a 15 meq/100g
Haloisita–2H ₂ O(-7Å)	5 a 10 meq/100g
Endelita ou haloisita–4H ₂ O(-10Å)	10 a 40 meq/100g
Montmorilonita	80 a 150 meq/100g
Ilita	10 a 40 meq/100g
Vermiculita	100 a 150 meq/100g
Clorita	10 a 40 meq/100g
Sepiolita-paligorsquita	20 a 30 meq/100g

Fonte: SOUZA SANTOS, 1989.

Como método de identificação, ou de pesquisa de argilominerais, a determinação da capacidade de troca de cátions é muito útil para o caso de montmorilonitas e vermiculitas; nos outros grupos de argilominerais, isolados ou de mistura com minerais inertes, a determinação da capacidade de troca de cátions não tem valor elucidativo apreciável porque não permite identificar univocamente o tipo de argilomineral presente. Componentes, como ácidos silícicos coloidais, zeólitas, ácidos úmicos e seus derivados podem interferir também, pois podem ter CTC elevada, entre 100 a 500 meq/100g (SOUZA SANTOS, 1989).

Para concluir este item, considera-se importante listar alguns exemplos de análises elaboradas em amostras de argilas encontradas na bibliografia pesquisada, fato este que serve também para elucidar os parâmetros estabelecidos para a matéria-prima capaz de fornecer o agregado de argila calcinada.

Houve ainda a preocupação de encontrar exemplos de amostras que estivessem caracterizadas assim como está ilustrado na TAB. 3.4, ou seja, contendo resultados da análise química, ATD, ATG e DRX (exceto para a primeira e as duas últimas amostras em que não constam os resultados de DRX, e a terceira e quarta que não apresentam a curva ATD/ATG).

Para melhor entendimento dessa base de dados, está sendo mostrada (TAB. 3.7) para cada amostra: a sua referência, origem da amostra, e denominação

adotada (convencionada pela sigla Am RB-XX de Amostra da Revisão Bibliográfica).

Apresentam-se na TAB. 3.8 as informações provenientes dos ensaios de análise química para as diversas amostras.

TAB.3.7 Base de dados com amostras de argilas caracterizadas encontradas na bibliografia.

Referência	Origem	Denominação
ALEXANDRE et al. (2004b)	Campos dos Goytacazes (RJ)	Am RB-01
VIEIRA et al. (2000)	Campos dos Goytacazes (RJ)	Am RB-02
VIEIRA et al. (2004a)	Campos dos Goytacazes (RJ)	Am RB-03
VIEIRA et al. (2004a)	Santa Gertrudes (SP)	Am RB-04
VIEIRA et al. (2003b)	Campos dos Goytacazes (RJ)	Am RB-05
VIEIRA et al. (2003b)	Morro da Fumaça (SC)	Am RB-06
VIEIRA et al. (2003b)	Teresina (PI)	Am RB-07
VIEIRA et al. (2003b)	Coimbra (Portugal)	Am RB-08
MENEZES et al. (2003)	Alhandra (PB) – Amostra “A”	Am RB-09
MENEZES et al. (2003)	Alhandra (PB) – Amostra “B”	Am RB-10
MENEZES et al. (2003)	Alhandra (PB) – Amostra “C”	Am RB-11
MENEZES et al. (2003)	Alhandra (PB) – Amostra “D”	Am RB-12
NASCIMENTO (2005)	Rio Branco (AC) – Amostra 2	Am RB-13
NASCIMENTO (2005)	Rio Branco (AC) – Amostra 3	Am RB-14

TAB.3.8 Composição química das argilas pesquisadas

	P.F. (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	CTC (meq/100g)
Am RB-01	11,88	56,40	22,39	6,38	0,51	-	1,32	0,33	1,20	-
Am RB-02	11,50	51,67	25,78	7,81	0,13	1,37	0,59	0,39	1,33	-
Am RB-03	14,08	42,49	29,24	9,21	0,24	1,44	1,10	0,51	1,41	-
Am RB-04	5,02	67,34	15,10	0,63	0,41	0,63	1,48	0,59	3,61	-
Am RB-05	11,43	44,56	29,64	9,21	0,24	1,44	1,10	0,51	1,41	-
Am RB-06	5,83	68,35	15,60	5,96	0,14	1,17	0,71	0,23	1,36	-
Am RB-07	6,91	61,39	19,74	6,93	0,31	1,11	0,91	0,23	2,20	-
Am RB-08	5,57	63,94	18,68	6,05	0,09	0,76	1,56	0,32	2,82	-
Am RB-09	12,60	49,34	20,50	6,87	3,50	-	-	2,40	3,00	14,00
Am RB-10	13,95	51,02	32,12	1,35	-	-	0,73	-	-	13,30
Am RB-11	13,17	57,20	27,68	1,6	-	-	-	-	-	12,00
Am RB-12	11,97	52,27	31,44	3,11	-	-	-	-	-	12,00
Am RB-13	6,77	65,52	16,65	5,81	-	0,99	0,60	-	1,64	-
Am RB-14	7,45	63,36	19,15	6,61	-	1,06	0,66	-	1,64	-

Deve-se ressaltar a diversidade de dados sobre a composição química das

argilas de diversos estados, inclusive de outros países, em SOUZA SANTOS (1989), tornando-se indispensável a sua consulta para efeitos comparativos.

3.3.1.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X – DRX

Uma das técnicas mais importantes utilizadas para o estudo dos argilominerais é a difração de raios X. O equipamento utilizado para esse fim é o difratômetro, que registra a intensidade difratada por meio de contadores acoplados a um mecanismo de registro.

A difração de raios X é uma técnica de pesquisa de amplo campo de aplicação como: física de estados sólidos e pesquisa de materiais, metalurgia e indústrias metalúrgicas, geologia e mineralogia, indústrias de vidro, cerâmica e de cimento, indústrias químicas e farmacêuticas.

A difração de raios X, permite: identificar materiais com estrutura cristalina definida, comparando os difratogramas obtidos com padrões conhecidos. Também é possível analisar misturas de materiais ou verificar fases de cristalização entre outras aplicações.

O método da difração de raios X, em relação a outros métodos, como análise térmica diferencial, análise química ou capacidade de troca catiônica, oferece a vantagem do difratograma apresentar grande número de picos, facilitando assim a identificação, principalmente de misturas, onde pode haver superposição de alguns picos, mas não de todos. No entanto esse método não identifica as substâncias amorfas, sendo necessário a utilização de outros complementares de identificação.

A identificação dos grupos dos argilominerais de modo geral pode ser obtida pela difração de raios X em função da distância interplanar do mineral, combinada com propriedades específicas de expansão da distância interplanar basal pela adição de substâncias orgânicas, como etilenoglicol e de transformações térmicas que permitem uma identificação satisfatória dos minerais (ALEXANDRE, 2000).

Estão apresentados na seqüência, os difratogramas da Am RB-02 (FIG. 3.6); Am RB-03, Am RB-04 (FIG. 3.7); Am RB-05, Am RB-06, Am RB-07, Am RB-08 (FIG. 3.8); Am RB-09, Am RB-10, Am RB-11, Am RB-12 (FIG. 3.9).

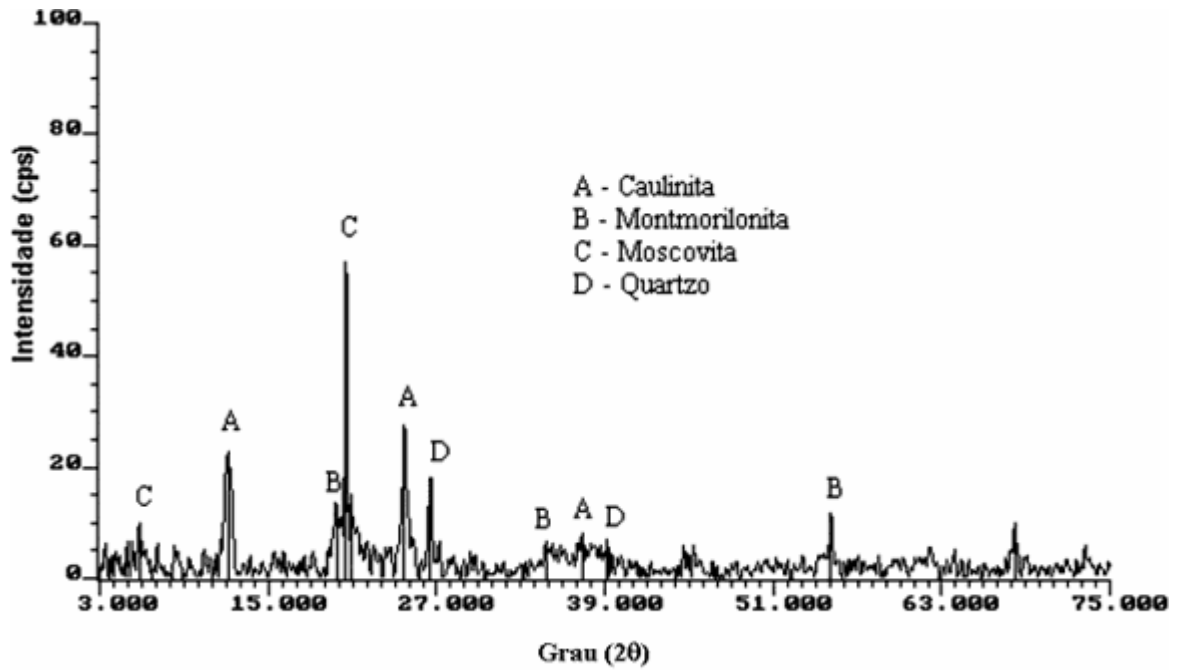
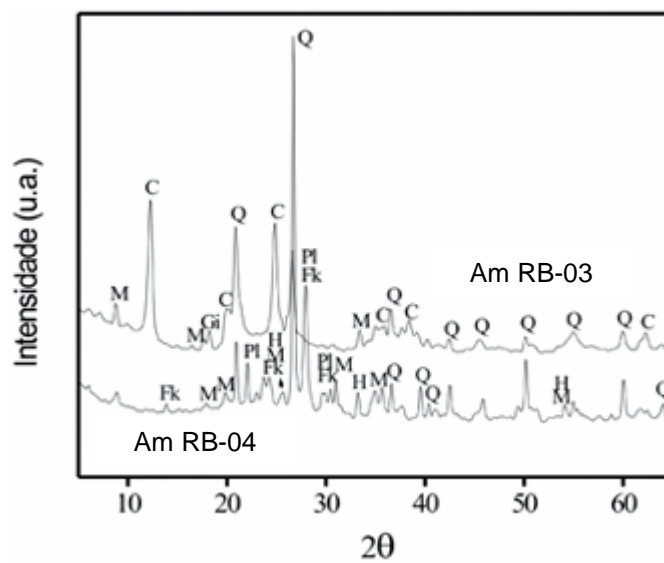


FIG.3.6 Difratoograma da Am RB-02 (VIEIRA et al., 2000).



Legenda: C = Caulinita; Fk = Feldspato potássico; Gi = Gibsitita; H = Hematita; M = Mineral micáceo; PI = Feldspato plagioclásio; Q = Quartzo

FIG.3.7 Difratoograma da Am RB-03 e Am RB-04 (VIEIRA et al., 2004a).

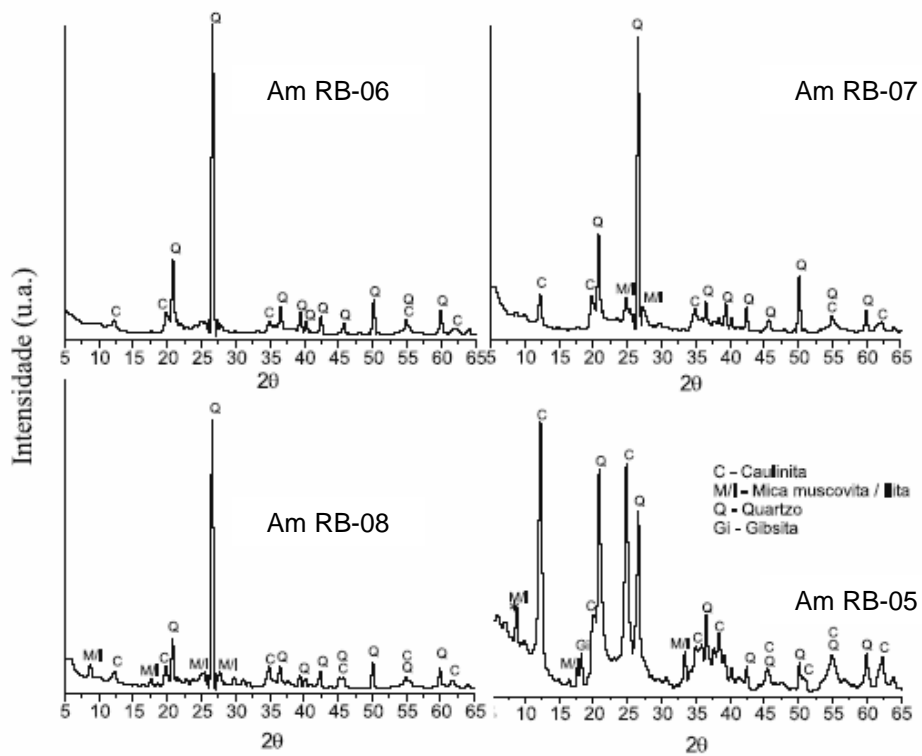


FIG.3.8 Difratoograma da Am RB-05, Am RB-06, Am RB-07, Am RB-08 (VIEIRA et al., 2003b).

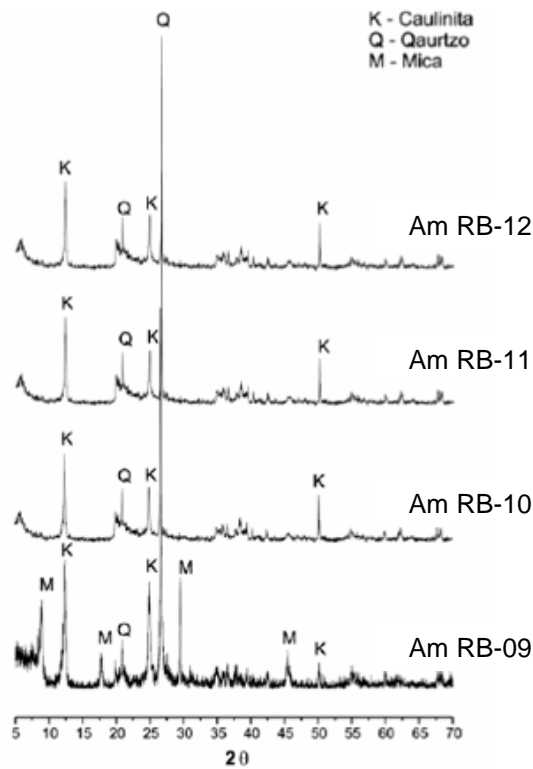


FIG.3.9 Difratoograma da Am RB-09, Am RB-10, Am RB-11, Am RB-12 (MENEZES et al., 2003).

3.3.1.3 ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL (ATD) E ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (ATG)

As análises térmica diferencial e termogravimétrica são instrumentos de grande aplicação no estudo de argilas como método de identificação de argilominerais e suas misturas. A ATD é feita com o aquecimento de uma amostra de argila em uma taxa constante, juntamente com uma substância termicamente inerte, registrando-se as diferenças de temperatura entre o padrão inerte e a amostra de argila.

As transformações endotérmicas ou exotérmicas quando ocorrem, aparecem como deflexões em sentidos opostos na curva termodiferencial.

A ATG consiste também no aquecimento da argila sob taxa constante, porém, neste caso, está ligada a uma balança na qual são registradas variações de sua massa em função da temperatura. É um instrumento de pesquisa importante quando trabalhado em paralelo com análise térmica diferencial (SOUZA SANTOS, 1989; ALEXANDRE, 2000).

Pela posição, forma e intensidade dos picos endotérmicos e exotérmicos dos termogramas, é possível fazer-se uma identificação bastante precisa de argilominerais puros.

Existem padrões para comparação e identificação da maioria dos argilominerais e minerais conhecidos. Entretanto existem restrições ao uso dessas análises em misturas de argilominerais, tendo em vista que a posição e também a intensidade dos picos de transformações endotérmicas e/ou exotérmicas são alteradas pelas misturas.

Na identificação de substâncias amorfas e de matéria orgânica em argilas, a ATD e a ATG fornecem mais informações do que a difração de raios X, sendo técnicas de grande importância no estudo dos processos de queima em massas cerâmicas (SOUZA SANTOS, 1989; ALEXANDRE, 2000).

Da mesma forma que foi mencionada para a análise química, deve-se citar a grande quantidade de dados para comparação (facilitando a identificação dos argilominerais), nas publicações de Ralph E. GRIM (1962), SOUZA SANTOS (1989) e suas próprias indicações bibliográficas sobre catálogos de curvas ATD/ATG. Um exemplo está mostrado na FIG. 3.10. Na seqüência, as curvas ATD/TG da TAB. 3.7.

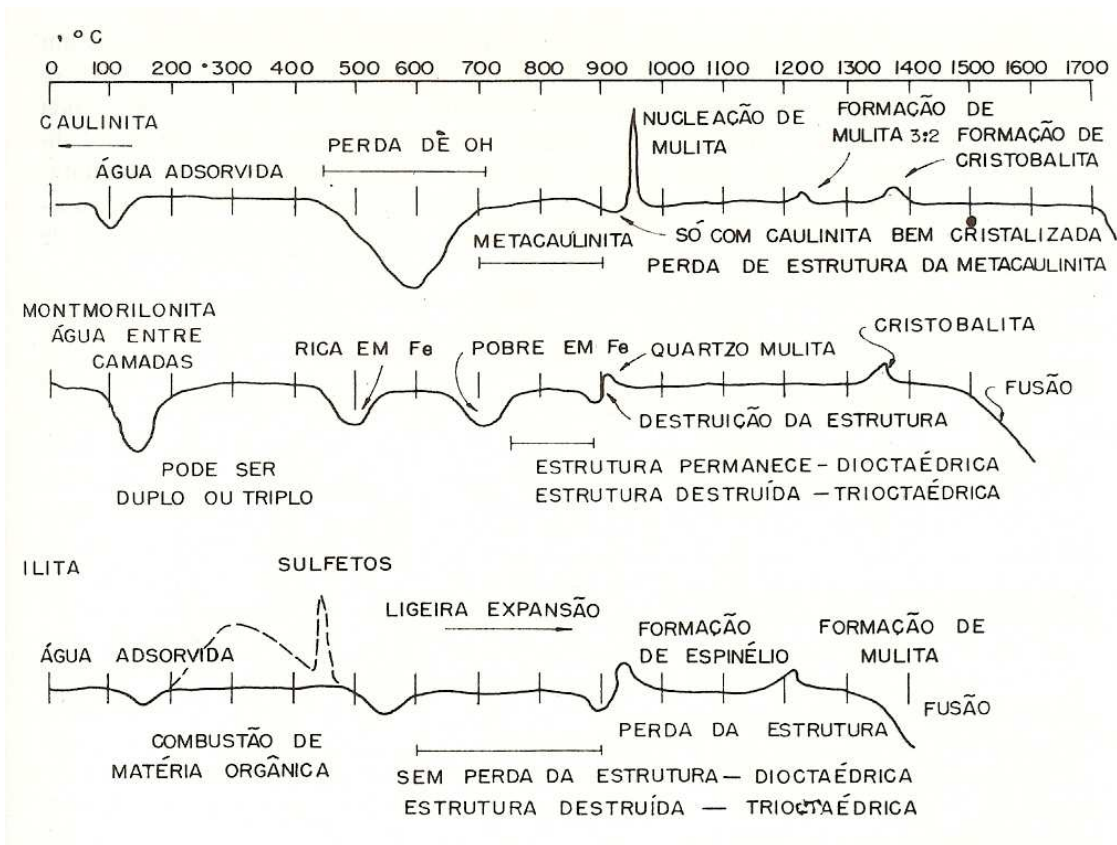


FIG.3.10 Curvas ATD esquemáticas de argilominerais (adaptados de GRIM, 1962 por SOUZA SANTOS, 1989).

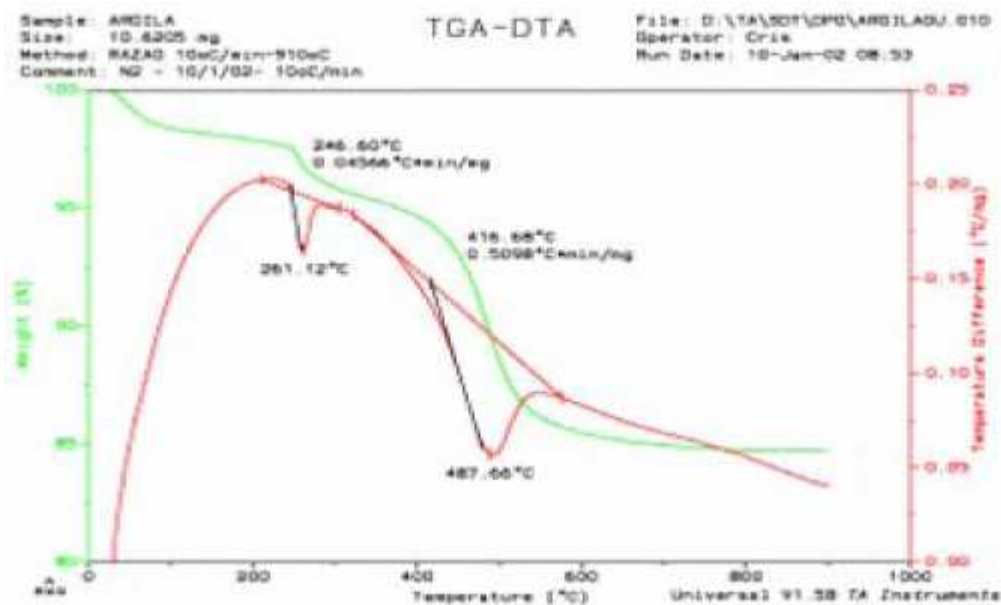


FIG.3.11 Curvas ATD/ATG da Am RB-01 (ALEXANDRE et al., 2004b).

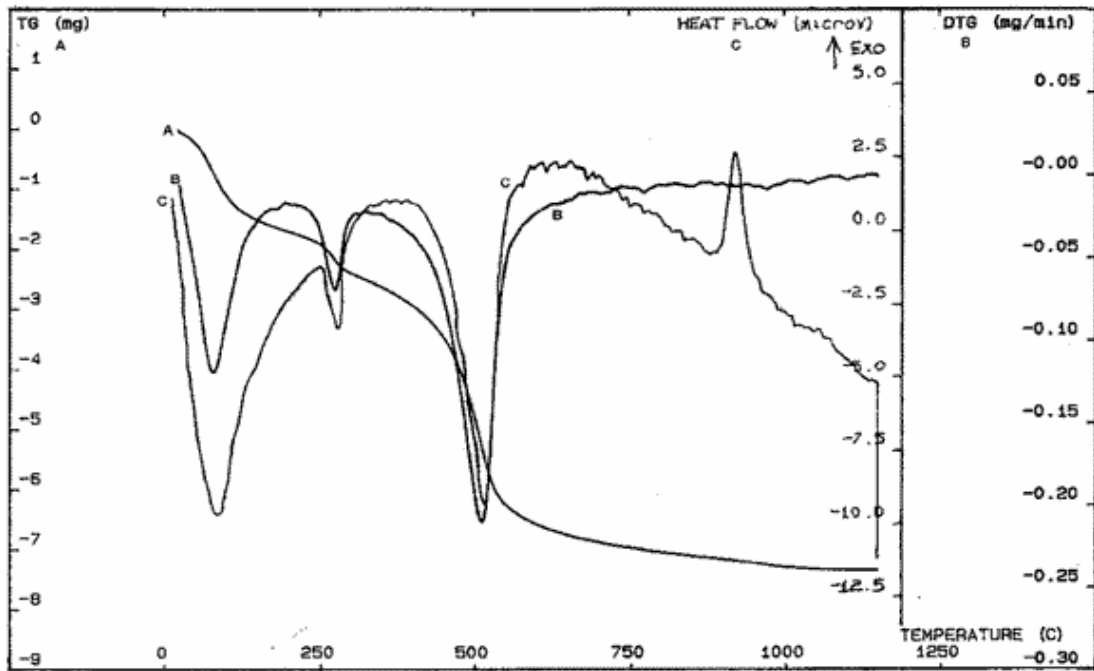


FIG.3.12 Curvas ATD/ATG da Am RB-02 (VIEIRA et al., 2000).

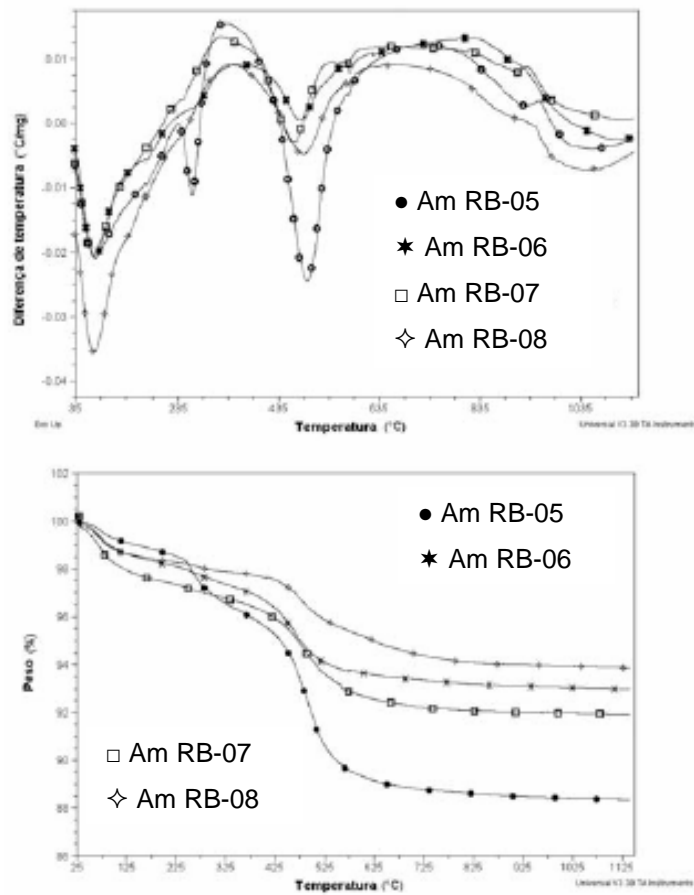


FIG.3.13 Curvas ATD (acima) e TG (abaixo) da Am RB-05, Am RB-06, Am RB-07, Am RB-08 (VIEIRA et al., 2003b).

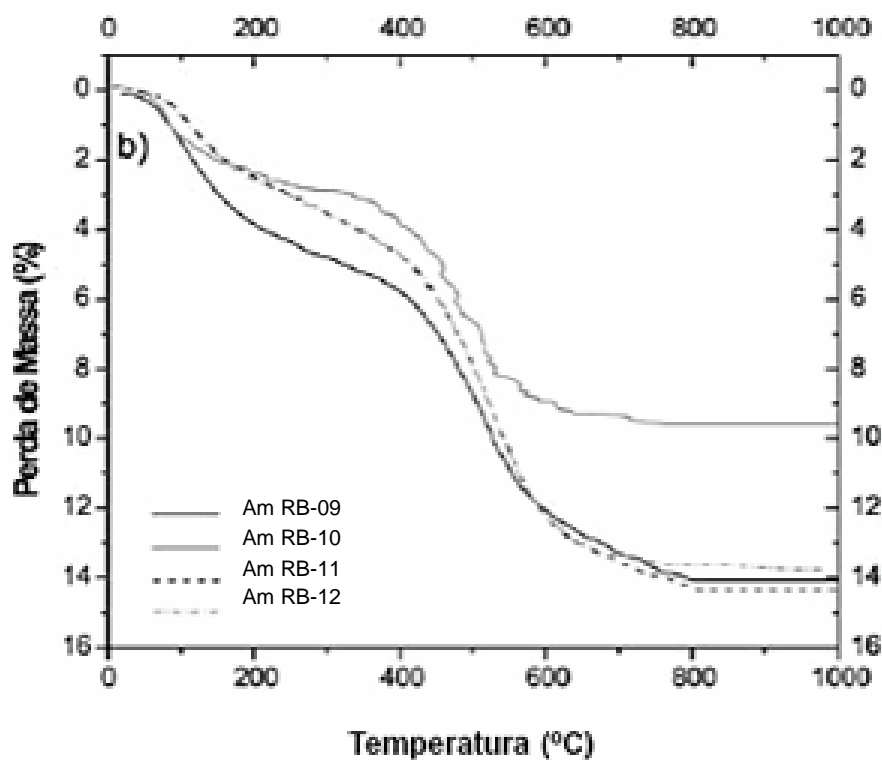
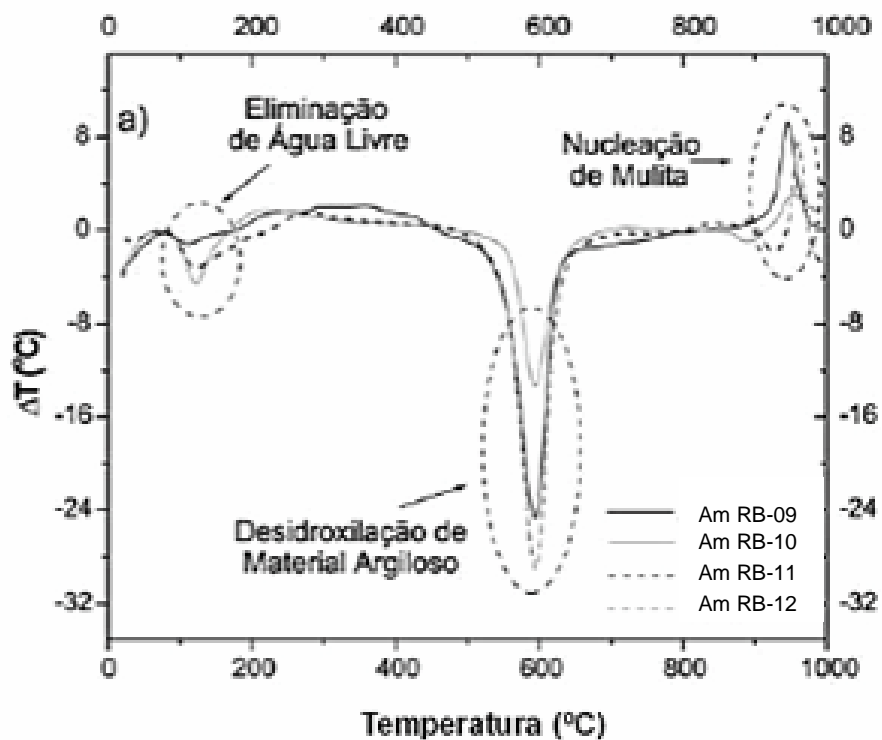


FIG.3.14 Curvas ATD (acima) e TG (abaixo) da Am RB-09, Am RB-10, Am RB-11, Am RB-12 (MENEZES et al., 2003).

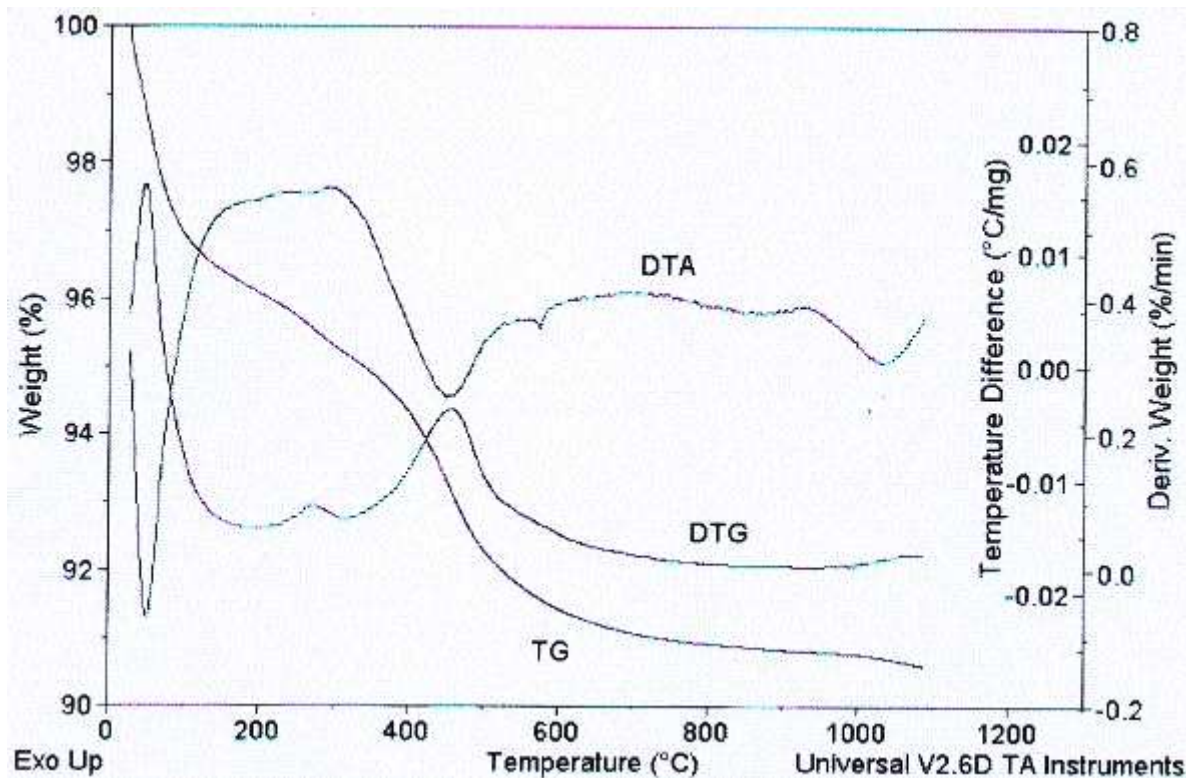


FIG.3.15 Curvas ATD/ATG da Am RB-13 e RB-14 – mistura com 50% de cada (NASCIMENTO, 2005).

3.3.1.4 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA - MEV

O primeiro trabalho publicado sobre o microscópio eletrônico de varredura (MEV), data de 1938 descrevendo a utilização de bobinas de varredura a um microscópio eletrônico de transmissão (MET), gerando uma imagem de transmissão-varredura. O primeiro MEV utilizado para observações de amostras espessas foi descrito em 1942 com resolução da ordem de 1 μm , pior portanto que a obtida por microscopia ótica. No mesmo ano foi possível a obtenção de grandes aumentos e imagens de alta resolução (aproximadamente 50nm) através da utilização de uma fonte de emissão de campo de um tubo multiplicador de elétrons, gerando o que se considera o primeiro MEV moderno (ALEXANDRE, 2000).

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é geralmente utilizado para análise de amostras espessas não transparentes a elétrons. A sua grande utilização se deve à alta resolução que pode atingir a ordem de 3,0nm, e a grande profundidade de foco, na ordem de 300 vezes superior ao microscópio ótico, fornecendo imagens

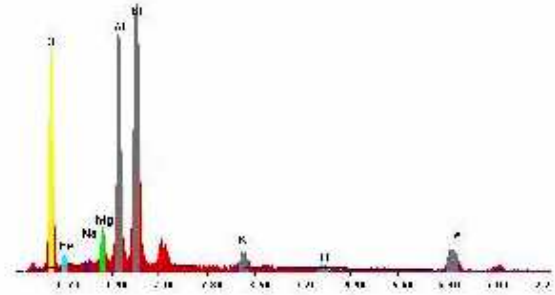
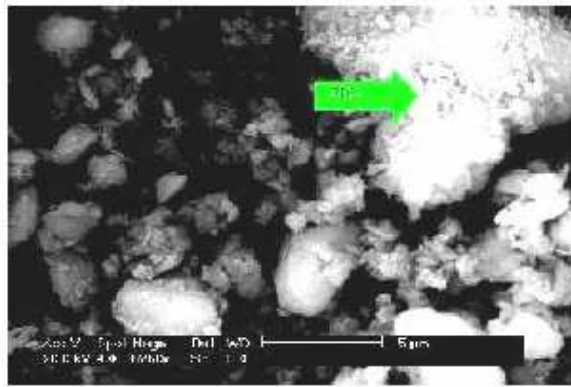
com aparência tridimensional. Utilizando-se elétrons de baixa energia da ordem de 50eV, informações de superfícies são obtidas e com elétrons de alta energia se obtém dados sobre número atômico ou orientações da amostra.

Com a utilização do MEV pode-se ainda obter informações sobre domínios em amostras magnéticas ou utilizar sinais devido à condutividade induzida pelo feixe de elétrons e luz catodoluminescente, para a caracterização e análise de falhas de dispositivos semicondutores. O MEV pode ser utilizado também para se obter informações sobre a composição química da amostra em áreas da ordem de microns (ALEXANDRE, 2000).

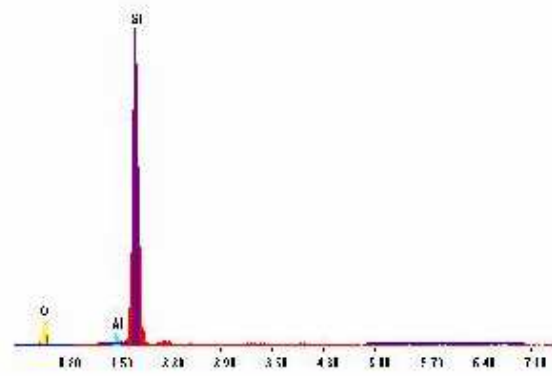
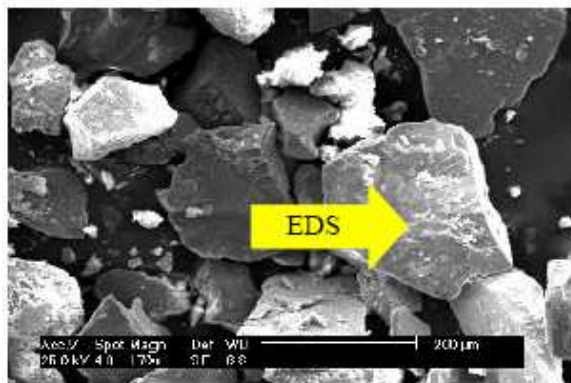
SOUZA SANTOS (1992b) descreve mais detalhadamente o princípio de funcionamento do MEV, inclusive os sistemas de detecção dos sinais originados na superfície da amostra sólida, freqüentemente encontrados em pesquisas de amostras de argilas para fins cerâmicos, tal como o analisador de energia dispersiva (EDS - *Energy dispersive spectrometry*) ou detector do estado sólido.

SOUZA et al. (2004) apresenta a caracterização de duas argilas de São Gonçalo do Amarante (RN), uma de alta plasticidade (chamada também de “argila gorda”) e outra de menor plasticidade (conhecida como “argila magra”) em que procura estabelecer a melhor relação de mistura entre as duas argilas, para compor a matéria-prima ideal para a fabricação de peças de cerâmica vermelha. Esta prática é muito usual no meio cerâmico, a fim de minimizar custos com a aquisição da matéria-prima.

Para esta caracterização, faz uso do MEV, juntamente com a espectroscopia de energia dispersiva (EDS) para identificar os elementos químicos presentes nos argilominerais (FIG. 3.16).



MEV e EDS da argila gorda.



MEV e EDS da argila magra.

FIG.3.16 Microscopia eletrônica de argilas de São Gonçalo do Amarante (RN) (SOUZA et al., 2004).

Segundo SOUZA et al. (2004), a morfologia da “argila gorda” denota uma tendência à forma esférica, característica de sua alta plasticidade, enquanto que para a “argila magra” percebe-se uma forma mais facetada, devido a maior presença de sílica, confirmada no espectro EDS dessa argila.

Realiza ainda a difração de raios X, identificando a “argila gorda” com argilominerais do tipo ilita e montmorilonita, e a argila magra com presença quartzo e caulinita. Conclui o estudo relatando que a mistura de 2:1 de “argila gorda” para “argila magra”, constitui-se numa composição adequada, quando queimada à 900°C, para a fabricação de peças de cerâmica vermelha.

3.3.2 A PRODUÇÃO INDUSTRIAL DA CERÂMICA VERMELHA

O processo de fabricação de produtos de cerâmica vermelha é milenar e pode ser estruturado basicamente em seis etapas:

- Extração da matéria-prima;
- Preparação da matéria-prima;
- Moldagem ou conformação das peças;
- Queima ou cozimento das peças;
- Resfriamento das peças.

O produto obtido deste processo é denominado de produto cerâmico ou genericamente de cerâmica (DIAS, 2004).

A maior característica dos produtos cerâmicos é a fragilidade e a conseqüente possibilidade da fratura com pequena ou sem nenhuma deformação. Como resultado desta característica, o material cerâmico não pode ser conformado por processos normais de deformação utilizados para os metais.

Estas fases citadas, são observadas de certa forma em todas as indústrias. Porém algumas empresas utilizam equipamentos rudimentares e outros equipamentos mais modernos.

Apesar de já ter sido mostrado sumariamente pela FIG. 3.3, está ilustrado na FIG. 3.17 um fluxograma mais detalhado, sobre o processo utilizado para a produção de blocos cerâmicos e telhas, com os principais fluxos de materiais e energia, bem como a descrição das principais etapas do ciclo tecnológico.

Para melhor entendimento do processo produtivo que é praticado, e principalmente dos equipamentos envolvidos, são explicadas nos itens seguintes as particularidades dessas etapas individualmente, de acordo com o estudo de SOARES et al. (2002).

Algumas fotos ilustrativas dessas etapas e equipamentos estão apresentadas no item que relata as visitas técnicas realizadas às unidades de fabricação de peças de cerâmica vermelha.

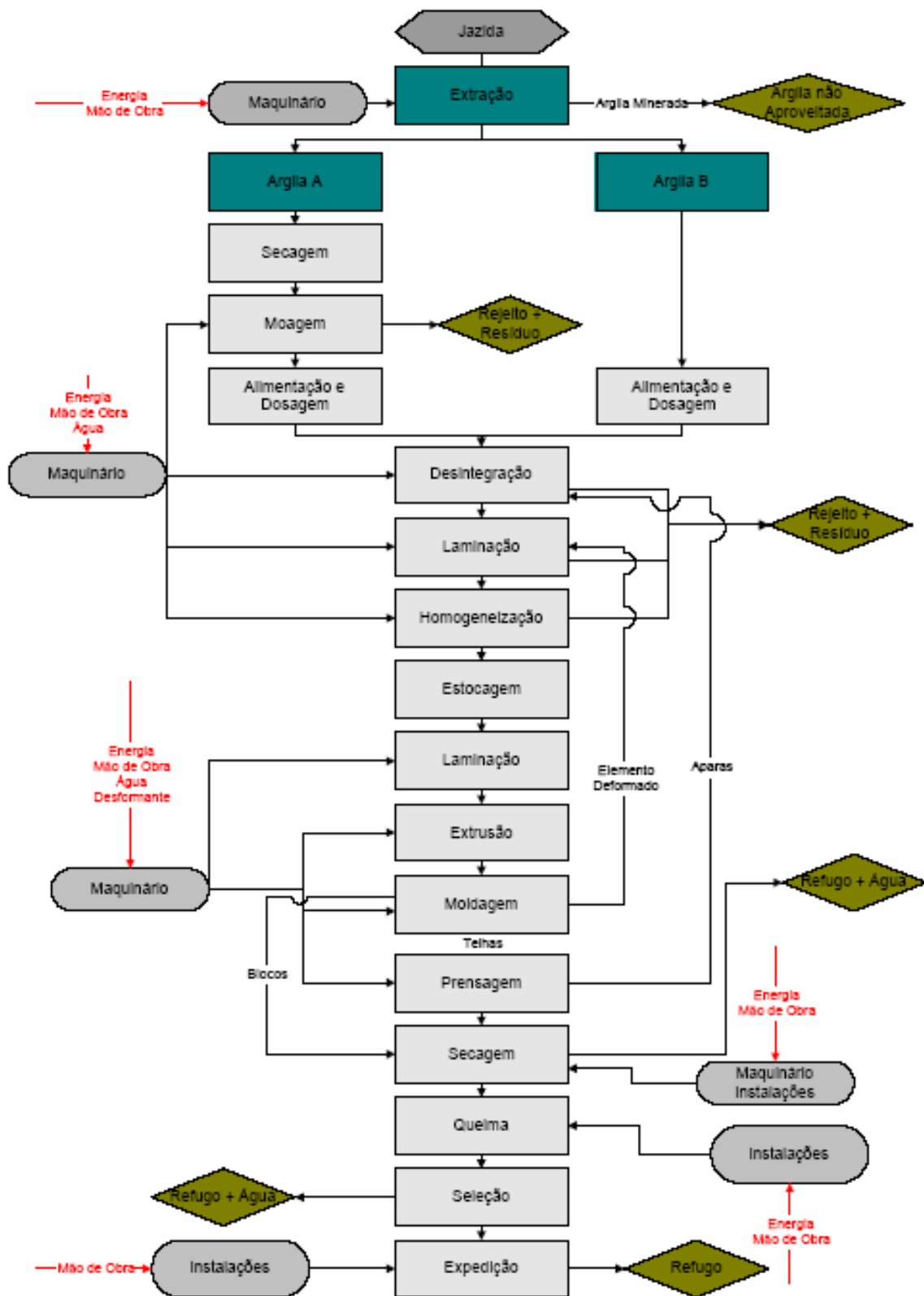


FIG.3.17 Fluxograma detalhado da produção de cerâmica vermelha (SOARES et al., 2002).

3.3.2.1 EXTRAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

A extração da argila é feita a céu aberto utilizando retro-escavadeiras ou equipamentos semelhantes. Normalmente a mineração encontra-se próxima à indústria (constituindo-se num dos principais indicadores para a sua localização).

A extração e beneficiamento de argilas para a indústria cerâmica vermelha estrutural, vêm tendo ultimamente melhor atenção no tratamento de argilas. Isto só foi possível através da utilização de conhecimentos tecnológicos e da aplicação de controles no processamento cerâmico.

A conscientização ambiental nos dias atuais agrega esforços para um processo de extração mais racional das matérias-primas naturais. A extração das argilas requer estudos geofísicos para melhor dimensionar os métodos de extração, o escoamento das águas, a organização e distribuição de lotes.

Nesse sentido, torna-se importante o emprego das novas tecnologias na extração e beneficiamento, monitorando as jazidas para o controle do esgotamento, prevendo a recuperação das áreas para o ressurgimento da vegetação e reposição do solo arável.

Segundo ALEXANDRE (2000), as jazidas são exploradas até uma profundidade máxima de aproximadamente 5m, sendo este limite, geralmente determinado pelo lençol freático.

3.3.2.2 BENEFICIAMENTO

A prática da estocagem a céu aberto, ou como também é chamado, o “sazonamento” das argilas, é comum desde a antigüidade e atua de forma positiva no tratamento das argilas. O processo de intemperismo (sol-chuva) alivia as tensões nos produtos conformados, auxilia na plasticidade, na trabalhabilidade da argila e na homogeneização e distribuição da umidade nas massas.

No processo de sazonalidade, as argilas são geralmente dispostas segundo características ou propriedades desejadas no produto final. A extensão e altura dos montes são definidas conforme o espaço físico disponível. Apesar do período ideal ser de 1 ano de descanso para alcançar os resultados ideais no processamento cerâmico, é comum a fase de sazonalidade estar associada à operacionalização de

cada indústria.

No beneficiamento das argilas, o grau de redução do grão ou da granulometria das partículas se dá através de moedores, num processo a seco em britadores de mandíbulas e moinhos de martelo.

O cuidado que geralmente deve ser tomado com estes equipamentos, além dos processos rotineiros de manutenção, é o monitoramento dos elementos moedores e das grelhas.

Quando existe a necessidade de mais de um tipo de argila ocorre a pré-mistura, feita de forma manual ou com o auxílio de equipamento pá carregadeira. A seguir são dosadas por caixão alimentador ou diretamente em correias transportadoras que levam aos quebradores de aglomerados maiores (“torrões”, que freqüentemente ocorrem).

Em seguida, misturadores de pás homogeneízam a matéria prima. Neste mesmo ponto acrescenta-se também a água necessária para que seja ultrapassado o limite de plasticidade, devendo o teor de umidade estar entre 25% e 30% da massa total.

Conforme já fora mencionado nos itens anteriores, a preparação da massa é feita geralmente através da mistura de uma argila “gorda”, que é caracterizada pela alta plasticidade, granulometria fina, e composição essencialmente de argilominerais; com uma argila “magra”, esta rica em quartzo e menos plástica, podendo ser caracterizada também como material redutor de plasticidade.

Embora a composição granulométrica das massas e seus respectivos campos de aplicação estejam previstos, como por exemplo no diagrama de Winkler (FIG. 3.2 e TAB. 3.3), observa-se que na prática ceramista, a utilização da classificação granulométrica da massa é empírica, baseada na experiência do cerâmico prático, o que dificulta a padronização e a formalização dos conhecimentos da área. Outra observação é que os limites entre as classes de argila não são rígidos, notadamente entre as classes C e D, pois vários ceramistas usam a mesma massa para a confecção de telhas e blocos cerâmicos (tijolos furados).

Adicionalmente à composição granulométrica, que reflete o conteúdo de argilominerais e quartzo, as argilas contêm proporções variadas de matéria orgânica, material que contribui para maior plasticidade e resistência mecânica a cru das peças.

Antes de entrar no equipamento extrusor (ou como também é conhecido, de

“maromba”) a massa passa por operações que ocorrem simultaneamente, conforme relatado a seguir:

A homogeneização ou mistura é feita manualmente ou com pás carregadeiras, conforme o percentual de cada matéria-prima utilizada, obtendo-se uma massa única e homogênea.

Em um galpão onde o material fica protegido contra as intempéries, através de correias transportadoras a massa chega ao caixão alimentador, que tem em média capacidade de armazenamento de 200 toneladas.

No primeiro misturador ocorre a quebra de torrões e a homogeneização da massa juntamente com a água, seguindo para o laminador, que é um equipamento composto de dois cilindros, o qual tem o papel de refinar as massas cerâmicas, laminando-as, sendo responsáveis pela compressão e melhor homogeneização da massa de argila permitindo uma significativa redução do consumo de energia.

Por último segue para o segundo misturador, onde as palas têm as funções de homogeneizar a massa, promover o avanço da massa pelo interior do equipamento e ainda auxiliar na eliminação de bolhas de ar de grandes dimensões. As palas podem ser fixas ou móveis, que permitem uma regulação da intensidade da mistura e maior ou menor produção. Quanto maior a inclinação das palas maior será a produção e menor o desgaste. O inverso reduz a produção e aumenta o desgaste das partes em contato com a mistura.

Nesta etapa do processo produtivo, é conveniente controlar a homogeneização, a umidade e a mistura da massa, bem como a eliminação de pedras, raízes, metais e outras impurezas nocivas ao processo.

3.3.2.3 CONFORMAÇÃO

A obtenção de produtos pelo processo de extrusão consiste em comprimir uma massa plástica numa câmara de alta pressão equipada com sistema de vácuo, contra um molde (boquilha) de formato desejado.

São conhecidos três sistemas diferentes para a extrusão. São eles:

→ Pistão: tem como característica, grande uniformidade de velocidade e pressão em toda a seção de saída. Porém seu fluxo não é contínuo, impossibilitando a utilização de vácuo;

→ Cilindros: o sistema de cilindros, apesar de apresentar fluxo contínuo de alimentação e poder com isso utilizar-se do sistema de vácuo, apresenta diferenças de velocidade e pressão na seção de saída e ainda não permite uma boa homogeneização da mistura.

→ Hélice: o sistema de hélices permite boa homogeneização, utilização de sistema de vácuo, fluxo contínuo e boa distribuição de pressão na saída do material.

Na saída do extrusor, a massa moldada expelida de forma contínua, é seccionada no comprimento desejado.

Ainda que os custos de preparação e conformação de matérias-primas em uma fábrica de telhas e tijolos girem em torno da fabricação dos produtos é certo que se estas operações não forem devidamente conduzidas, podem aumentar notavelmente os custos das fases mais caras do processo, como a secagem e a queima.

Os defeitos causados por se trabalhar com uma massa conformada com ocorrência de falhas, freqüentemente são visíveis somente quando as peças saem do secador, do forno e às vezes até depois de vários anos após sua aplicação.

Entre vários fatores que devem ser levados em conta para obtenção de um bom resultado no processo de extrusão, dois deles merecem especial atenção: fatores relacionados à massa e ao equipamento de extrusão.

A primeira condição para se obter um bom resultado na extrusão é garantir que o material a ser conformado, apresente as mínimas variações possíveis, tanto na composição (plasticidade), como na preparação (granulometria) e no teor de umidade.

Para que o equipamento de extrusão e seus periféricos (bomba de vácuo) estejam sempre em perfeitas condições de uso, é imprescindível que façam parte de um sistema devidamente implantado de manutenção preventiva.

Complementarmente à operação de extrusão, algumas peças cerâmicas também passam pela etapa de prensagem. Particularmente, quando da fabricação de telhas, os elementos são extrudados e cortados em um formato favorável a esta operação. São prensados para obtenção de sua forma final, normalmente pela utilização de prensas revólveres.

3.3.2.4 TRATAMENTO TÉRMICO

A) SECAGEM

O processo de secagem pode ser definido como a eliminação da água de conformação dos produtos cerâmicos, através do ar aquecido, e é considerada uma das fases mais delicadas do processo produtivo.

A umidade de extrusão dos produtos cerâmicos normalmente oscila entre 20 e 30% e, após a secagem, esta umidade residual deve estar abaixo de 5%. Alguns cuidados são fundamentais para o controle desta fase.

O ciclo de secagem deve ser definido em função da carga disposta no secador, da temperatura utilizada e, principalmente, em função dos tipos de argilas. Argilas muito plásticas normalmente requerem muita água no processo de extrusão e, conseqüentemente, experimentam grandes retrações na secagem. Deve-se então utilizar no máximo 50% destas argilas e completar a formulação com argilas menos plásticas.

A secagem pode ser do tipo natural ou forçada. A primeira acontece com exposição das peças cerâmicas ao ar livre. Este processo é utilizado quando a empresa possui uma produção baixa ou quando se dispõe de sol o ano todo e mão de obra barata. A secagem natural pode durar de 2 a 8 dias dependendo da temperatura ambiente e da ventilação. A exposição em pátio deve ser de forma que garanta a circulação de ar entre as mesmas evitando retração diferenciada e, conseqüentemente, as trincas, comuns no processo lento.

A secagem forçada pode ser através de secadores intermitentes ou contínuos. A temperatura no início da secagem deve ser de aproximadamente 40°C aumentando gradativamente até chegar a 100°C. Temperaturas elevadas no início da secagem serão fontes de trincas, já as baixas aumentam cada vez mais o ciclo de secagem, podendo elevar os custos. Para se evitar as trincas é recomendável levantar a *curva de Bigot*⁵ (consultar VIEIRA et al., 2003a) das argilas para se conhecer o momento em que é permitido acelerar a secagem. Sabe-se que toda argila perde 50% da água antes de atingir sua retração máxima permitindo-se acelerar a secagem após

⁵ A curva de Bigot, representa a variação da retração em função do conteúdo de água de umidade das peças.

obterem-se estes valores.

Oriundos de uma das três operações anteriores, os elementos já moldados e transportados para áreas cobertas são dispostos em prateleiras (fixas ou móveis) ou simplesmente empilhados no chão a fim de perderem a maior parte da umidade.

Também são utilizadas unidades “estufas” para este fim:

Alguns cerâmicos, via de regra, criam a “estufa” ao aproveitar o próprio espaço físico da unidade forno, e o seu calor residual de uma queima anterior quando de seu resfriamento, procedimento este também denominado de “res quente”. Este procedimento pode levar de 8 horas até 24 horas.

A umidade final desejada é da ordem de 3 a 4%, e dependendo do produto e da sua geometria, ocorre uma contração que pode variar entre 4 e 10%.

Atualmente, já existem projetos otimizados que interligam as unidades forno e estufa, construídas separadamente, por intermédios de canais, tubos, ou chaminés que conduzem o calor residual da unidade forno para a unidade estufa, aproveitando desta forma, sem qualquer custo adicional, os gases quentes oriundos do forno.

Outro fator de grande importância é a umidade relativa do ar (UR). No início da secagem a UR deve estar por volta de 95% para impedir a eliminação de água de forma rápida, o que pode ser realizado através da tiragem⁶. Atingindo o ponto crítico pode-se acelerar a secagem, aumentando-se a temperatura e a velocidade do ar injetado.

B) QUEIMA

Na seqüência, o material seco é levado ao forno, e os mesmos podem utilizar como fonte de energia a lenha, a serragem, os rejeitos de madeira, o óleo ou o carvão mineral. Esta questão energética, assim como as particularidades de alguns tipos usuais de fornos, estão sendo tratados com maior detalhamento em outro item adiante.

O processo de queima dura aproximadamente 150 horas, em virtude do elevado nível de umidade proveniente da secagem natural. A operação fundamental para a obtenção das características dos produtos cerâmicos é a queima. É durante esta

⁶ Fluxo de ar quente que sai pela chaminé de uma fornalha e é substituído pelo ar frio que entra pela boca da fornalha.

fase que os produtos cerâmicos, submetidos ao tratamento térmico, sofrem transformações físico-químicas, alterando-lhes as propriedades mecânicas e conferindo-lhes as características inerentes a todo produto cerâmico.

Os fornos são os equipamentos utilizados nesta fase do processo e são classificados de acordo com o ciclo de operação em: Intermitentes e Contínuos.

Os fornos intermitentes funcionam em ciclo periódico de carga-queima-descarga.

Os fornos contínuos funcionam em ciclos de 24 horas/dia, sem necessidade de paradas para carga ou descarga dos produtos. Um exemplo típico de forno contínuo observado no Brasil é o forno “túnel”.

Nos fornos intermitentes, o calor sensível gasto para aquecer a carga e a alvenaria do forno (estrutura), não é normalmente recuperado no final da queima e durante a fase de resfriamento. Todo o calor retirado na massa dos produtos e na massa estrutural do forno é dissipado para o ambiente. Em alguns casos, dependendo do volume da alvenaria do forno, este consumo chega a representar 50% ou mais do calor total requerido no processo de queima.

Nos fornos contínuos, este calor é aproveitado para aquecer o ar da combustão ou para pré-aquecer a carga enforada, funcionando como uma “estufa”, já mencionado anteriormente.

No Brasil, os fornos mais utilizados são os do tipo intermitente, os quais possuem pouca variação de modelos, entre eles, citam-se os fornos “caieira” e “abóbada” (ou “garrafão”).

Existe ainda uma terceira variação, comumente encontrado, que é o forno “semi-contínuo” ou também conhecido pela denominação de forno “Hoffmann”. Este tipo de forno, inicia o processo pela queima do combustível em fornalhas frontais dispostas no lado oposto ao da chaminé, fazendo o calor percorrer todo o seu comprimento, completando a secagem.

A queima efetiva ocorre pela alimentação seqüencial (da frente para o lado da chaminé) através de aberturas na parte superior do forno, de carvão, óleo combustível, ou serragem, propiciando chama direta sobre a carga.

Os outros dois tipos (intermitente e contínuo) são de chama invertida (*down draft*) e caracteriza-se por não permitir a incidência direta do fogo sobre a carga. A queima do combustível é feita sobre grelhas em fornalhas, sendo o calor conduzido em direção ao teto, succionado para baixo, atravessando a carga e saindo pelos

duto que se encontram sob o piso do forno que os levam à chaminé. Este processo também recebe a denominação de “chama reversível” em algumas regiões do país, sendo que para o outro tipo, costuma-se encontrar o termo de queima por “chama direta”. O término desta fase ocorre quando do resfriamento e descarga do forno com o produto acabado.

Na queima do material consubstanciam-se todas as dificuldades encontradas neste tipo de unidade produtiva. A utilização de fornos rudimentares, sem flexibilidade operacional alguma, obriga à dependência da habilidade do responsável pela queima.

Parâmetros como o conhecimento (ou sensibilidade) na detecção visual da temperatura correta para a queima ou do término da fase de secagem que ocorre dentro do forno, indicada pela redução da saída de vapor na chaminé, são exemplos da habilidade exigida (SOARES et al., 2002).

São listadas a seguir algumas características destes fornos aqui citados.

3.3.2.5 EXEMPLOS DE FORNOS

SOUSA SANTOS (1989), divulga um *layout* com a disposição geral de um espaço físico, de certa forma otimizado, que dispõe de todas as unidades necessárias ao funcionamento de uma indústria de cerâmica vermelha (FIG. 3.18).

MESSIAS (1996), NORTON (1973) e ALEXANDRE et al. (2002a e 2002b) mencionam alguns exemplos de fornos, seus componentes essenciais, princípios de funcionamento e fazem algumas considerações sobre os métodos de empilhamento. Alguns destes exemplos merecem destaque.

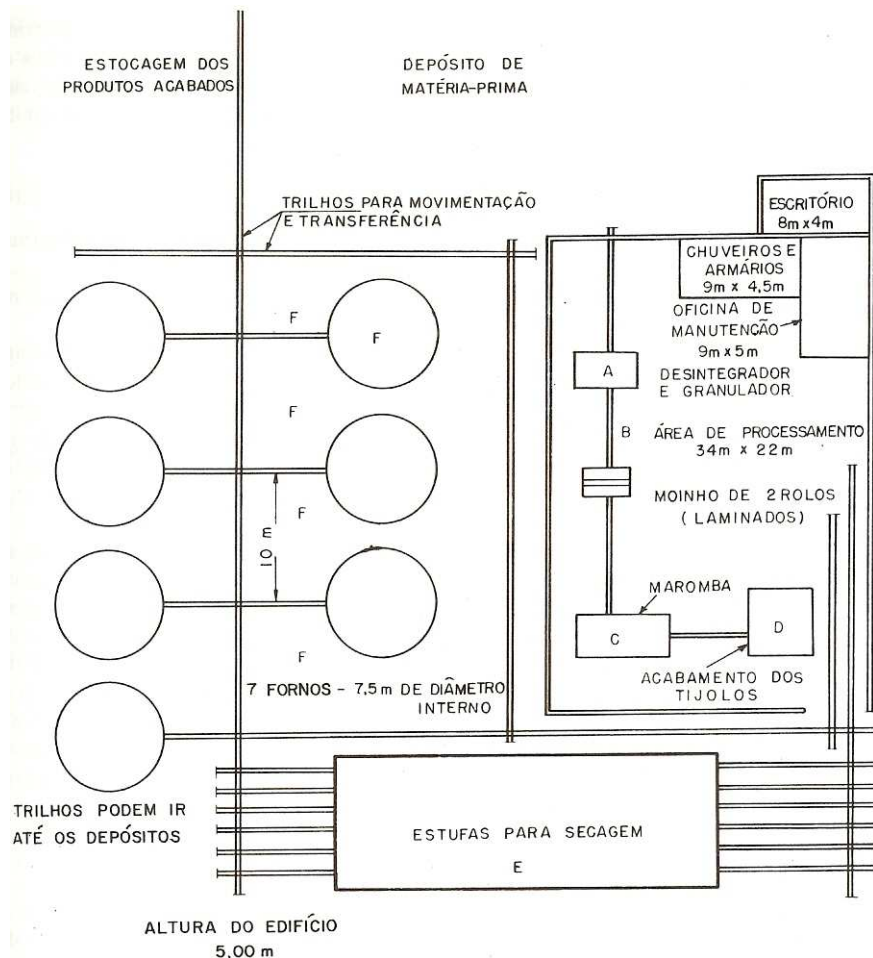


FIG.3.18 Disposição geral de uma fábrica de tijolos (SOUZA SANTOS, 1989).

→ Fornos intermitentes:

Os fornos intermitentes utilizados na indústria de cerâmica estrutural são na sua grande maioria do tipo de chama invertida (*down draft*). Consistem, basicamente, de câmaras circulares ou retangulares, com paredes e teto em forma de abóbada, construídos em alvenaria de tijolos comuns.

Estas câmaras têm capacidades que podem variar de 10.000 a 20.000 peças, dependendo das suas dimensões, da forma de empilhamento empregada e das dimensões dos produtos a serem queimados.

As fornalhas, também construídas em alvenaria, situam-se nas paredes laterais da câmara, em número de quatro ou seis, dispostas radialmente no caso de câmaras circulares. Já as câmaras retangulares são geralmente construídas duas a duas, separadas por uma parede divisória comum, e as fornalhas são dispostas paralelas umas às outras ao longo da parede oposta à parede divisória das câmaras.

O piso interno das câmaras é construído de tijolos comuns com aberturas, denominadas comumente de "crivos", sob as quais existem canais subterrâneos que interligam o forno à chaminé e aos secadores, quando existentes. As chaminés são construídas em alvenaria de tijolos comuns, com alturas que podem variar de 15 a 30m, podendo servir a um ou mais fornos.

Os materiais a serem queimados são carregados manualmente para o interior das câmaras através de portas laterais, e empilhados sobre o piso, com alturas que variam de 1 a 2 metros, até preencherem todo o espaço disponível na câmara.

As portas são então fechadas com tijolos já queimados e vedadas com argila.

Os gases quentes gerados nas fornalhas são introduzidos no interior da câmara através de aberturas nas paredes laterais, entre a abóbada e o topo da carga. Estes gases atravessam a câmara no sentido descendente, passando pelo crivo e daí, são conduzidos pelos canais para a chaminé. A admissão do ar necessário à combustão na fornalha, e o escoamento dos gases através da carga, crivo e canais, é induzido apenas pelo "efeito chaminé", provocado pela diferença entre densidade dos gases no seu interior e a do ar ambiente do lado externo.

Após atingir a temperatura mínima de queima desejada, entre 800°C a 950°C, interrompe-se a alimentação de lenha fechando as fornalhas, permanecendo assim durante um determinado intervalo de tempo para permitir maior uniformidade de temperatura em toda a carga.

Na última fase do processamento do material no interior do forno, este é submetido a um resfriamento gradual, onde o ar frio entra pelas fornalhas e, seguindo o mesmo trajeto dos gases quentes, resfria a carga e as paredes do forno. Na maioria dos casos o ar de resfriamento é induzido por ventiladores centrífugos, equipamento este que também é utilizado anteriormente no processo de secagem dentro das câmaras, ou simplesmente injetado nos galpões onde ocorre a secagem ao ar.

De forma geral, o resfriamento do forno ocorre naturalmente até níveis de temperatura que permitem a abertura das portas nas quais se posicionam ventiladores do tipo axial, que fazem o resfriamento forçado da carga sem, contudo, utilizar o ar aquecido no processo de secagem.

Em várias indústrias do setor que se utilizam destes fornos, constatam-se diferenças não só na forma construtiva e dimensões das câmaras, como também na

configuração de crivos, canais de exaustão e chaminé.

Isto se deve, na maioria dos casos, ao fato de que estes fornos são construídos ou reformados pelas próprias indústrias, valendo-se das experiências particulares de cada uma delas.

Além dessas diferenças, verificam-se modos de operação bastante distintos entre as indústrias e até entre os operadores em uma mesma indústria. Os procedimentos de operação são, portanto, estabelecidos em função de critérios empíricos, baseados na experiência e habilidade pessoal dos operadores que, aliados às diferenças relativas às matérias-primas empregadas e aos produtos queimados, justificam as grandes diferenças de desempenho verificadas quanto ao consumo de combustível e tempos empregados em cada fase da queima.

Com o objetivo de avaliar precisamente o desempenho de fornos do tipo intermitentes, MESSIAS (1996) propõe em seu estudo um diagnóstico detalhado, baseado nos seguintes parâmetros: consumo de lenha; controle da temperatura e vazão dos gases quentes; evolução da temperatura do material em várias regiões dentro do forno; e as temperaturas internas e externas das paredes e abóbada.

As figuras seguintes (FIG. 3.19 e FIG 3.20) revelam como foi realizado este diagnóstico, com base nas temperaturas observadas durante um ciclo de queima.

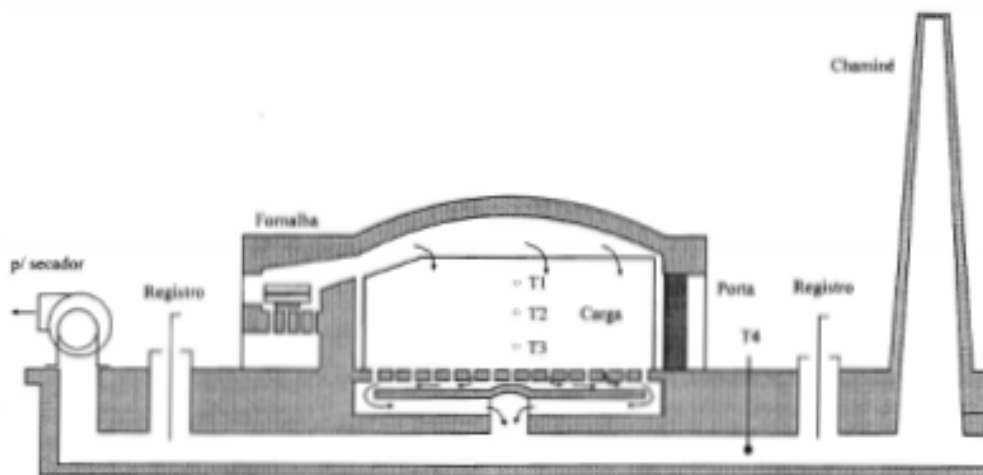


FIG.3.19 Forno intermitente de chama invertida, com pontos de controle de temperatura (MESSIAS, 1996).

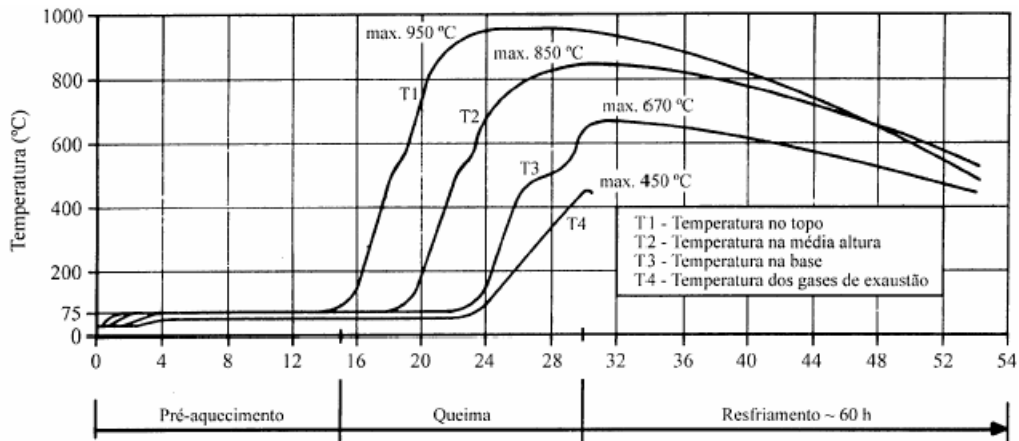


FIG.3.20 Evolução das temperaturas de um forno intermitente (MESSIAS, 1996).

→ Forno semi-contínuo de câmara:

No intuito de economizar combustível, fizeram-se muitos esforços para desenvolver fornos que usassem uma porção da grande quantidade de calor desperdiçada no forno periódico (intermitente).

Na Europa, em meados do século XIX, foi desenvolvido o forno de câmara semi-contínua, resultando numa grande economia de combustível. Esses fornos eram uma série de fornos periódicos ligados lateralmente e aquecidos um após o outro.

Isso permitia dirigir os gases de combustão do forno sendo queimado para o forno adjacente, o qual seria o próximo a ser queimado. e assim pré-aquecer a carga seguinte ate quase a temperatura máxima de queima. Além disso, os gases, após passarem através dessa câmara, podiam ser usados para pré-aquecer outros fornos ou câmaras, como são chamados, antes da queima na temperatura máxima.

Ao mesmo tempo em que as câmaras do outro lado da câmara queimada estavam se resfriando, injetando-se ar através delas, havia o pré-aquecimento do mesmo para ser fornecido para a combustão. Assim, a queima do combustível se movimentava de câmara a câmara, de forma regular.

Para evitar interrupção no ciclo quando a câmara final era alcançada, o forno era geralmente disposto na forma de um anel; em alguns casos, eram construídas muitas câmaras de forma que vários pontos de queima (introdução do combustível) podiam ser movimentados ao redor do anel simultaneamente.

A FIG. 3.21 ilustra a operação deste tipo de forno. A queima é feita de uma forma simples despejando o material combustível através dos orifícios do topo (*crown*) da câmara em que deve ser atingida a temperatura máxima. Devido ao alto

grau de pré-aquecimento, não são necessárias fornalhas, nem grelhas.

Existem algumas variações (FIG. 3.22) nos projetos desses fornos, porém o princípio é o mesmo em todos eles.

No Brasil, são também conhecidos como fornos "HOFFMANN", muito semelhante à FIG. 3.22, sendo também detalhado ainda neste item.

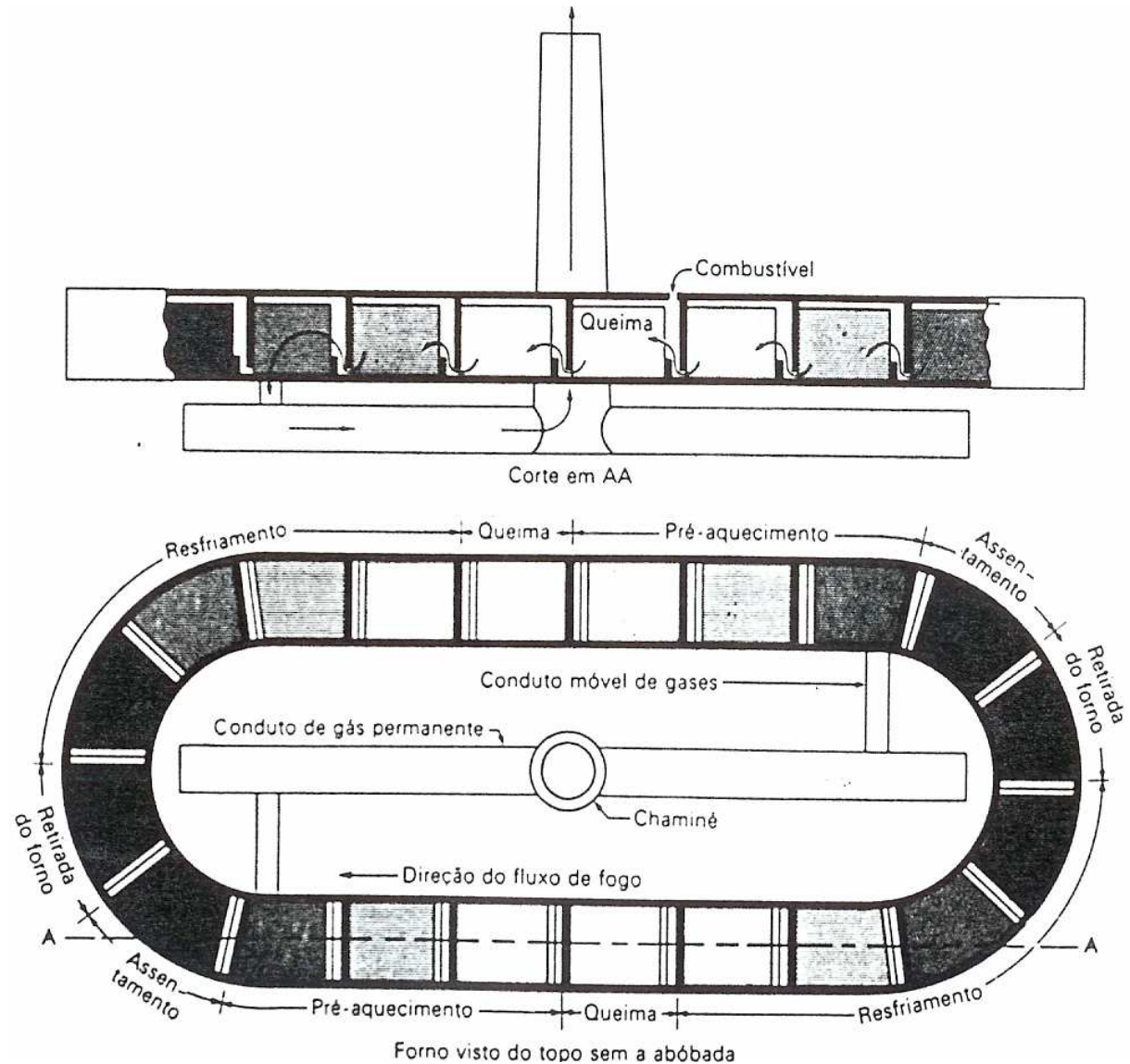


FIG.3.21 Vistas de topo e corte de forno câmara disposto em forma de anel (NORTON, 1973).

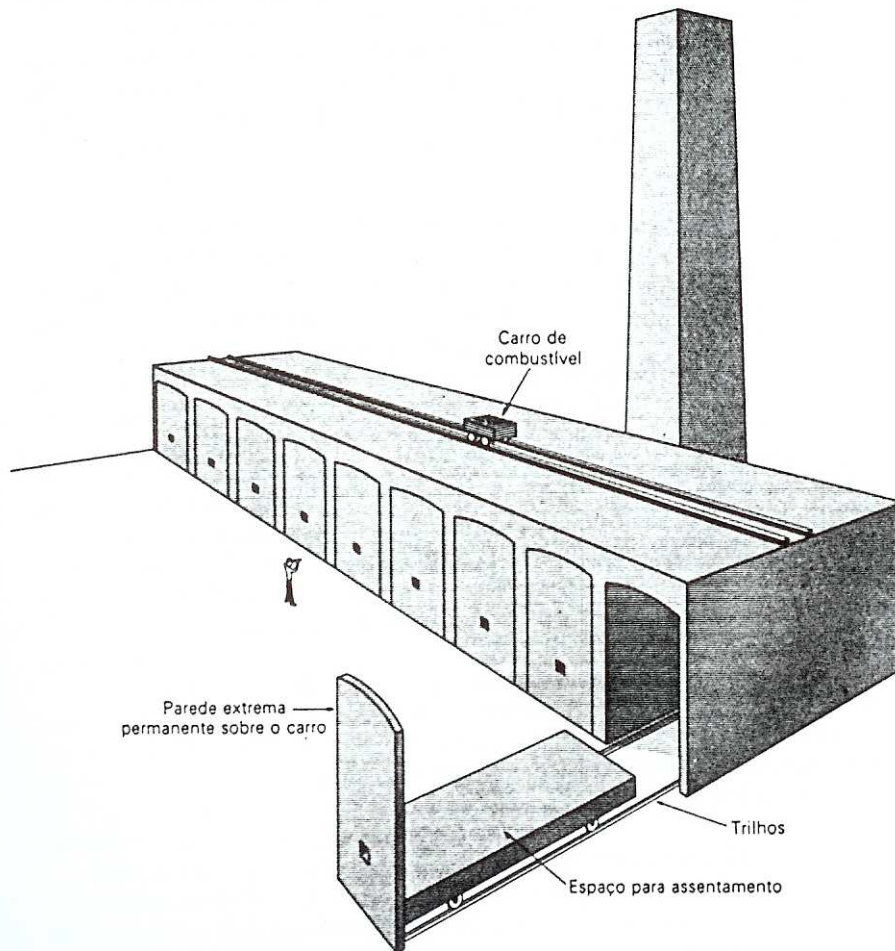


FIG.3.22 Exemplo de forno tipo câmara (HOFFMANN) com o advento de carros de abastecimento (NORTON, 1973).

→ Forno contínuo tipo “túnel”:

O forno tipo túnel foi concebido para ser também recuperativo, e conseqüentemente, foi projetado de forma semelhante ao forno de câmara, e em princípio, exceto que a fonte de calor permanece em um lugar e as peças movimentam-se continuamente através dele. Essa alternativa tem duas vantagens importantes: (a) a estrutura do forno a qualquer ponto permanece na mesma temperatura por um longo tempo, permanecendo livre de deformações provenientes de uma variação periódica de temperatura, como é o caso do forno de câmara; (b) as peças são empilhadas sobre os carros e podem ser carregadas e descarregadas fora do forno em lugar conveniente.

Como o nome indica, o “forno túnel” consiste num longo túnel, construído em material refratário, com uma fonte de calor no centro e uma serie de carros

carregando as peças, e movimentando-se ao longo do comprimento do forno.

Em linhas gerais, o seu princípio de funcionamento pode ser resumido da seguinte forma: os carros com as peças cruas passam pelo forno num ponto inicial da câmara do túnel, câmara esta que geralmente possui completa vedação para o exterior (*airlock*). Nesse ponto, encontram os gases de combustão com baixa temperatura, os quais já cederam muito do seu calor aos carros anteriores. Quando os carros atingem a zona de máxima temperatura (*hot zone*), suas temperaturas alcançam um máximo, que pode ser mantido por algum tempo.

Apos a zona mais quente, eles são resfriados lentamente pelo ar que entra no forno num ponto intermediário do túnel. Esse ar, absorvendo calor gradualmente, é retirado do forno num ponto final do túnel e uma porção dele volta como ar pré-aquecido para os maçaricos.

Uma seção transversal de um forno túnel é mostrada na FIG. 3.23. Observa-se que a carga ajusta-se perfeitamente à seção do túnel, de forma que os gases escoando longitudinalmente passam, de preferência, através do empilhamento de peças e, assim, efetuam uma troca de calor eficiente.

O topo do carro é feito com material refratário bastante espesso para proteger a estrutura metálica e as rodas do carro. Ao longo de cada lado da parede interna do forno há uma calha cheia de areia. Dentro dela mergulha-se uma lâmina de aço presa aos lados do carro, formando assim uma vedação aos gases (*gas-tight seal*).

A eficiência térmica do forno túnel é aproximadamente a mesma dos fornos de câmara, porém há uma economia adicional no trabalho requerido para carregamento e descarga. Conforme também descrito em NORTON (1973), aumentando-se o comprimento do forno, diminui-se a temperatura do gás de combustão e, conseqüentemente, a perda de calor.

Complementarmente ao que foi descrito, conclui-se esta revisão acerca de fornos industriais com o estudo de ALEXANDRE et al. (2002b) sobre o forno Hoffmann (semicontínuo), e ALEXANDRE et al. (2002a) sobre o forno caieira (intermitente) principalmente com as suas características construtivas, uma vez que os princípios de funcionamento, técnicas de manuseio e combustíveis utilizados recaem nos processos relatados anteriormente.

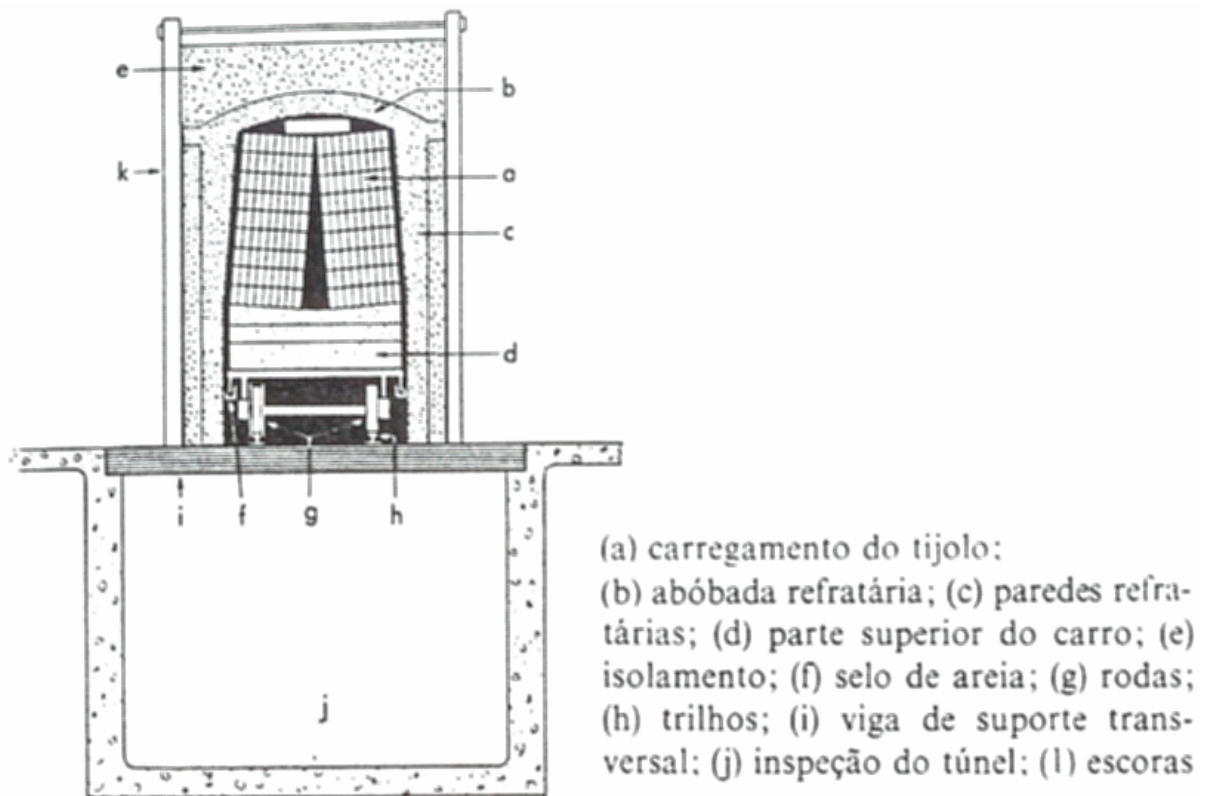


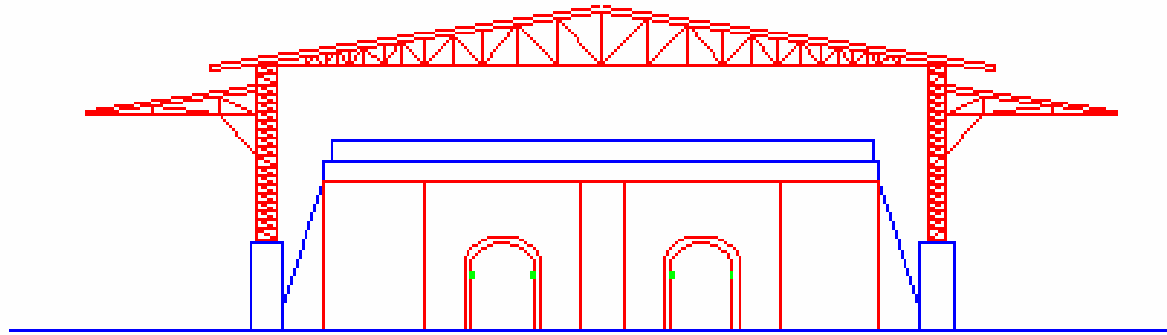
FIG.3.23 Seção transversal de um forno túnel (NORTON, 1973).

Tal abordagem visa principalmente, enriquecer a metodologia proposta no capítulo seguinte, proporcionando assim um maior número de alternativas para o tipo de unidade de queima a ser adotada para o agregado artificial de argila calcinada.

→ Forno semi-contínuo Hoffmann:

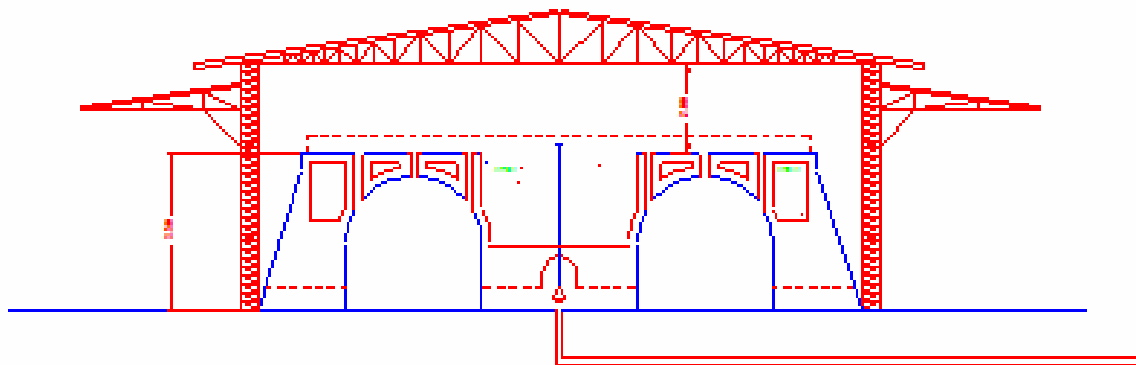
A morfologia do forno Hoffmann apresentado em ALEXANDRE et al. (2002b) é a seguinte: 12,90m (largura) x 91,40m (comprimento) x 3,50m (altura), sendo as paredes no formato piramidal por face externa, com base de 2m de espessura e atingindo sua menor espessura de 1,4m a uma altura média de 1,9m em relação ao nível do terreno. As figuras seguintes (FIG. 3.24, FIG 3.25, FIG. 3.26) mostram a planta do forno.

As paredes são confeccionadas com tijolos maciços e em determinados pontos, elas são feitas em formatos de caixotes, que são preenchidos com areia com a finalidade de funcionar como isolante térmico. A capacidade volumétrica interna da câmara, onde são colocadas as peças, tem dimensões de 10,60 m³.



Vista Lateral Frontal
Forno Hoffmann

FIG.3.24 Detalhe da vista frontal do forno Hoffmann (ALEXANDRE et al., 2002b).



Corte BB
Forno Hoffmann

FIG.3.25 Corte transversal do forno Hoffmann (ALEXANDRE et al., 2002b).

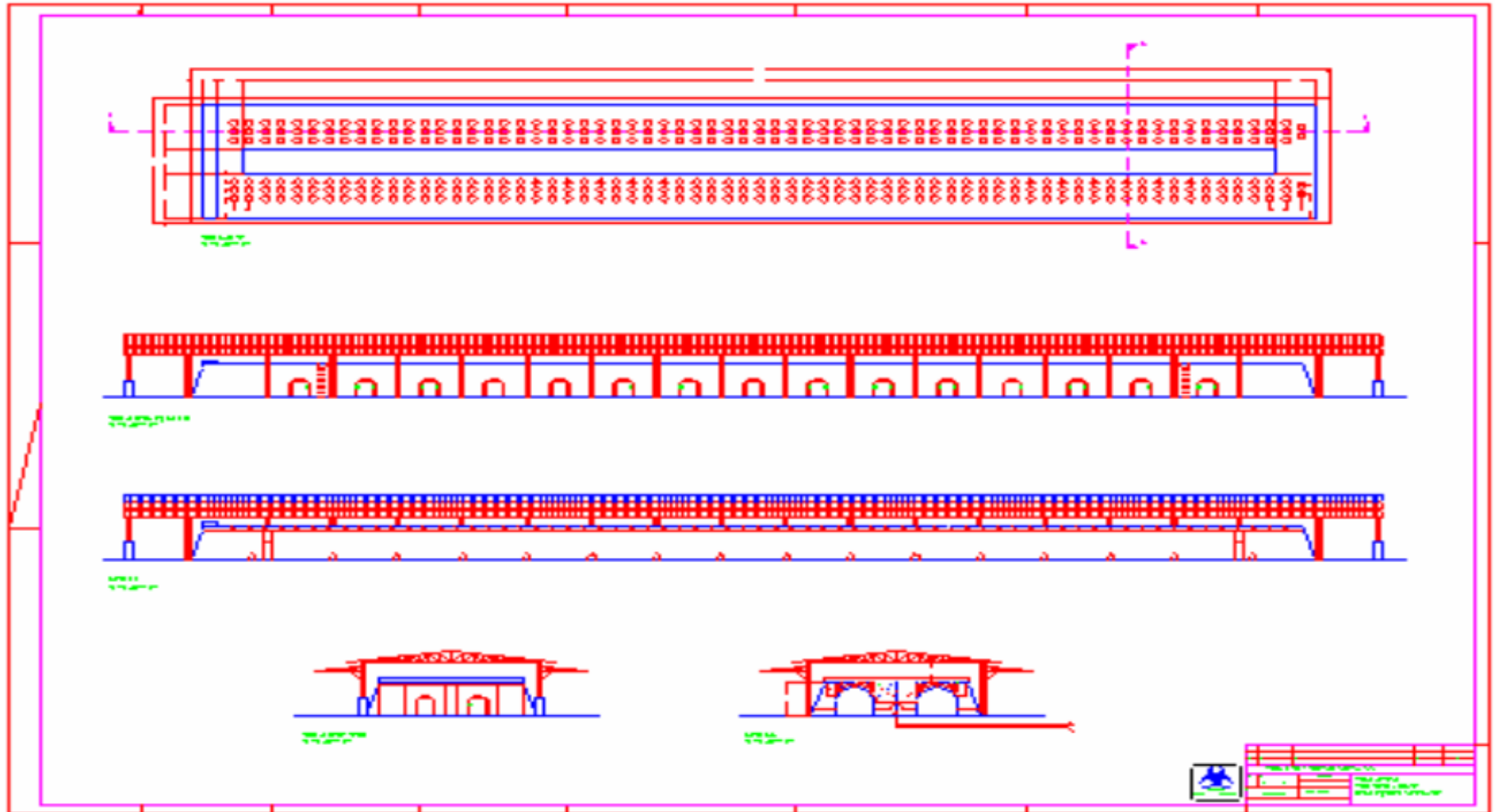


FIG.3.26 Planta geral e cortes do forno Hoffmann (ALEXANDRE et al., 2002b).

→ Forno intermitente caieira:

O forno “caieira” é um forno intermitente (de chama direta) que tem citações em usos diversos na história, sendo sua concepção inicial dirigida para a queima da cal. Com o decorrer dos anos, devido a sua versatilidade, vem sendo usado largamente na indústria cerâmica em todo o país. Essa versatilidade e o fato de não existir um formato único de sua morfologia, dificulta enormemente que seja feito um organograma único para a sua utilização.

O forno caieira, devido a sua própria concepção não permite uma distribuição homogênea de calor e um controle adequado de temperatura, que chega a atingir valores máximos da ordem de 850°C. Este forno também consome grande quantidade de energia e apresenta uma produtividade relativamente baixa.

A alimentação da lenha combustível é feita por uma câmara localizada abaixo do nível do terreno (“porão”), com aproximadamente 1 metro de profundidade.

ALEXANDRE et al. (2002a) conclui que embora existam algumas desvantagens, esse modelo pode ser usado com sabedoria, ao dirigir sua produção para peças rústicas ou até mesmo artesanais, que também possuem boa aceitação no mercado.

Particularmente para a produção como agregado para a pavimentação, em locais que se disponha deste tipo de forno, pode se adotar uma produção voltada para agregados cerâmicos que venham a compor misturas solo-agregado, assim como fora descrito para o agregado reciclado de telhas, em DIAS (2004).

Um exemplo deste tipo de forno, mostrado na FIG. 3.27, possui capacidade volumétrica de 56,89m³, com medidas externas de 4,45m (largura) x 5,50m (comprimento) x 4,30m (altura), e a parede é confeccionada em tijolo maciço, e sua espessura tem em média 0,65m.

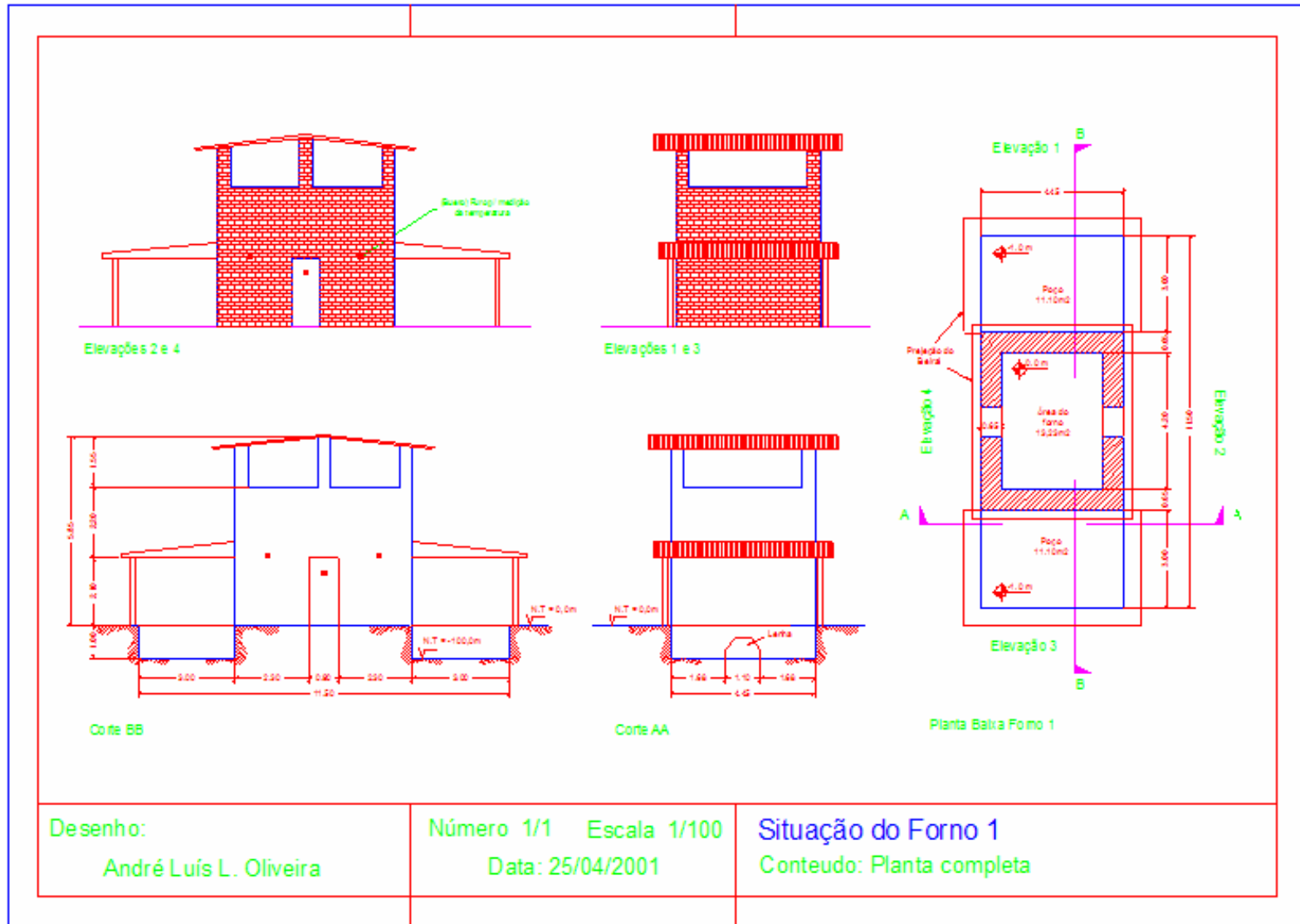


FIG.3.27 Planta geral e cortes do forno caieira (ALEXANDRE et al., 2002a).

3.3.2.6 CONSUMO DE ENERGIA

A energia utilizada pela indústria cerâmica é de dois tipos: a energia elétrica, e a energia térmica.

→ A energia elétrica:

A indústria cerâmica também é consumidora intensiva de energia elétrica. Ela ocorre nas etapas de preparação da matéria-prima (beneficiamento), e conformação das peças cerâmicas, com o consumo de energia alcançando valores superiores a 20 kw/h por milheiro de peças produzidas.

Não exclusivamente para este setor industrial, como fator agravante, as tendências apontam para a alta das tarifas. O Brasil, para evitar racionamento nos próximos anos, precisa investir em geração e transmissão. Outro fator que poderá aumentar a tarifa é o crescimento do consumo, no caso de um maior dinamismo econômico. A previsão de aumento nas tarifas de energia elétrica dificilmente se alterará no curto prazo.

Assim, embora este consumo seja elevado, para a energia elétrica não são cogitadas fontes alternativas a esta opção, a não ser por otimização tecnológica dos equipamentos consumidores ou processo de gestão que possa de alguma forma trazer reduções no consumo global.

→ A energia térmica:

A etapa central do processo cerâmico, o tratamento térmico, é o principal consumidor de energia térmica. Existem algumas opções de materiais que podem suprir esta demanda energética. São eles:

- Óleo BPF;
- Óleo diesel;
- Carvão vegetal;
- Carvão mineral;
- Gás natural de petróleo – GN;
- Rejeitos de madeira;
- Serragem;
- Lenha.

Ainda hoje, em grande parte do país, a lenha é o insumo mais utilizado como material combustível para as etapas de tratamento térmico das peças cerâmicas.

Quantitativamente, no estado de Santa Catarina, com base nos dados da SECTME (1990), a lenha respondeu por um consumo de 114.325 m³/mês, equivalente em energia térmica a 137.190 Gcal/mês.

Estima-se assim, em torno de 1.400.000 m³/ano, o que equivale a 8.000 hectares de eucaliptos. Deste total, 78% é oriunda de mata nativa e apenas 22% de mata implantada.

Para melhor entendimento dos valores equivalentes de energia, a TAB. 3.9 traz para alguns combustíveis, seu poder calorífico e o fator de correspondência para tep⁷:

TAB.3.9 Poder calorífico de materiais combustíveis e valor correspondente em tep
– tonelada equivalente de petróleo

fonte	massa específica kg/m ³	poder calorífico	tEP médio 19 94
Petróleo	864	10.900 kcal/kg	1 m ³ = 0,872
Gás Natural "Úmido"	-	10.930 kcal/m ³	10 ³ m ³ = 1,003
Gás Natural "Seco"	-	9.274 kcal/kg	10 ³ m ³ = 0,851
Lenha catada	300	3.300 kcal/kg	1 ton = 0,306
Lenha Comercial	390	3.300 kcal/kg	1 ton = 0,306
Óleo Diesel	852	10.750 kcal/kg	1 m ³ = 0,848
Óleo Combustível Médio	1.013	10.900 kcal/kg	1 m ³ = 0,946
Gás Liquefeito de Petróleo	552	11.750 kcal/kg	1 m ³ = 0,601
Eletricidade	-	3.132 kcal/kWh	1 MWh = 0,290

Fonte: Balanço Energético Nacional – BEN 1995

Apesar de não apresentar significativa alteração nos valores de poder calorífico dos materiais combustíveis, os últimos dados disponibilizados pelo Balanço Energético Nacional (2003), trazem valores mais atualizados para a correspondência em tep.

Devido a grande diversidade de indústrias existentes, o consumo de lenha chega a variar entre 0,7 até 4,0 estéreos⁸ de lenha por milheiro de telhas produzidas (ou seja, 0,7 a 4,0 m³/1.000 telhas).

O consumo de lenha nos secadores que não utilizam os gases quentes provenientes dos fornos adicionam um consumo da ordem de 1,0 a 1,5 estéreos por

⁷ A unidade básica adotada na composição do Balanço Energético Nacional - BEN é a "tonelada equivalente de petróleo - tep", que representa um petróleo de referência com poder calorífico de 10.000 kcal/kg.

⁸ Medida de volume para lenha, equivalente a um metro cúbico.

milheiro de telhas (NICE, 2002 e DIAS, 2004).

Dados sobre o consumo de lenha por olarias estão apresentados para os estados do Amazonas (TAB. 3.10) e Rio Grande do Norte (TAB. 3.11):

TAB.3.10 Perfil da indústria cerâmica no Amazonas

Empresas cadastradas	100
Empresas associadas	21
Nr. de empregos diretos	3.500
Peças produzidas por mês	30.000.000
Consumo médio de lenha	1,50 m ³ /1.000 peças
Consumo mensal de lenha	45.000 m ³
Custo da lenha	R\$ 15,00 m ³

Fonte: NERI, 2003.

TAB.3.11 Perfil da indústria cerâmica no RN

Empresas cadastradas	108
Nr. de empregos diretos	5.000
Peças produzidas por mês	90.000.000
Faturamento anual estimado	R\$ 72.000.000,00
Consumo de lenha	De 1,70 a 4,1 m ³ /1.000 peças
Consumo médio de lenha	2,0 m ³ /1.000 peças
Consumo mensal de lenha	180.000 m ³
Custo da lenha	R\$ 3,50/m ³ à R\$ 8,00/m ³

Fonte: NERI et al., 2001.

A seguir, estão apresentadas algumas considerações a respeito da conscientização desta questão energética no Brasil, particularmente para o setor ceramista, revelados por CERÂMICA ESTRUTURAL (2005):

A lenha e os resíduos de madeira (como a serragem), combustíveis mais utilizados, vêm se tornando escassos na grande maioria das regiões do Brasil, fazendo os empresários do setor pensar em alternativas para evitarem problemas futuros no processo produtivo.

As soluções para fugir de um possível “apagão florestal” variam conforme a região e vão do reflorestamento à instalação do gás natural, passando por investimento na utilização de materiais alternativos, como casca de coco e bagaço de cana, já sendo utilizados no nordeste do país.

Uma das causas da escassez da matéria-prima para combustível é a

intensificação da fiscalização ambiental sobre as áreas de preservação, que ainda hoje, no entanto, sofrem degradação por parte dos ceramistas, onde é comum se ver, em vários estados, áreas de mata virgem devastadas e que não receberam nenhuma ação de reflorestamento.

No Sul do Brasil, por exemplo, ainda há grandes reservas de mata virgem, mas que permanecem cada vez mais intocadas pela ação intensa dos órgãos de fiscalização, como o IBAMA.

Segundo ceramistas do nordeste, o caso do bagaço de cana e da casca do coco, que vêm sendo utilizados no estado de Alagoas, gera uma redução de 60% no custo do processo de queima, anteriormente realizado apenas com a lenha.

O aumento do consumo de lenha e seus resíduos por empresas de outros setores, além das cerâmicas, também tem gerado preocupação entre os ceramistas do Paraná, onde a totalidade dos combustíveis utilizados (96%) é composta de resíduo de madeira (serragem) e os outros 4% compostos de lenha de eucaliptos e aproveitamento de serrarias.

A utilização da serragem não apresenta problema, o problema citado é a falta do produto, insumo este disputado diretamente com a agroindústria, setor muito forte devido ao grande potencial agrícola da região.

A utilização do gás natural já é uma realidade para as empresas de cerâmica vermelha. Esta alternativa já é utilizada por 18 ceramistas da região de Campos (RJ), fornecedora de gás natural, e representa o maior número de cerâmicas a utilizarem o combustível no Brasil. Soma-se a eles, alguns empresários do setor de estados como Rio Grande do Norte e Santa Catarina, porém ainda é vista como inviável pela grande maioria dos ceramistas brasileiros.

Os motivos para essa resistência são o alto custo do combustível, aliado aos baixos preços praticados pelas cerâmicas, e a prática do mercado em comprar pelo preço na maioria dos casos.

Mesmo assim, a tendência mostra que essa alternativa deve ser multiplicada em curto ou médio prazo. A substituição da lenha pelo gás natural, combustível limpo e ecologicamente correto, além de abundante em alguns estados, como fonte energética na indústria de cerâmica estrutural vem ao encontro dessa legítima preocupação ambientalista, trazendo, como benefícios adicionais, uma redução nos custos e uma melhoria na qualidade do produto final.

Através do Centro de Tecnologias do Gás – CTGÁS, NERI et al. (2000) e NERI (2003), revelam resultados das pesquisas realizadas, mostrando que a conversão de fornos cerâmicos de lenha para gás natural não só é possível, como também, em decorrência do uso deste último combustível, além da melhoria das condições ambientais, ocorre melhoria na qualidade do produto final.

Explica ainda que na queima com gás, a temperatura de operação é mais homogênea e constante, devido ao maior controle sobre a alimentação do combustível e ao fato de o resfriamento se dar com o forno fechado (as bocas de queimas são substituídas por queimadores).

Concluindo, são mostradas na seqüência, ilustrações de uma distribuição média dos custos com uma indústria cerâmica (FIG. 3.28) e um exemplo de conversão de fornos para abastecimento energético com gás natural (FIG. 3.29).

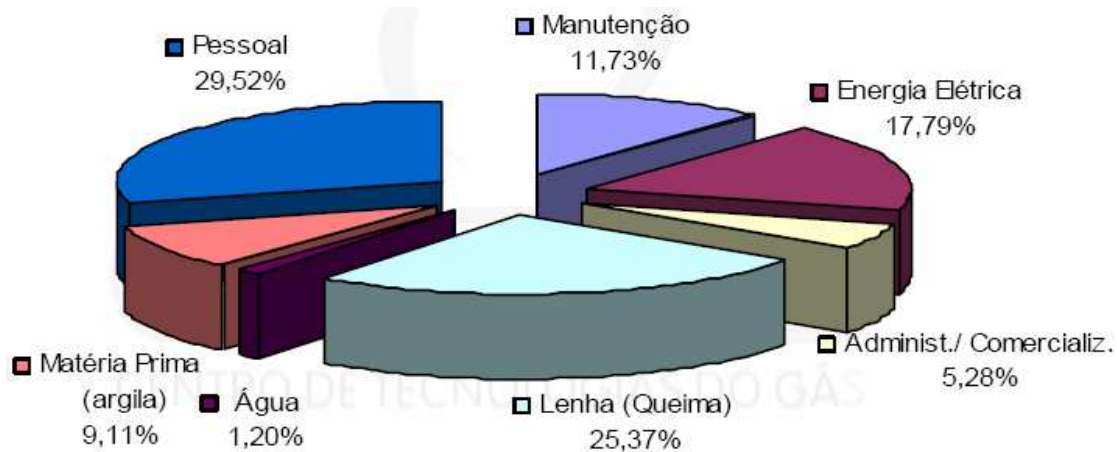


FIG.3.28 Média geral de custos na indústria cerâmica (NERI, 2003).



FIG.3.29 Adaptação na alimentação de combustível em forno intermitente (esquerda) e Hoffmann (direita) com queimadores móveis de GN (NERI, 2003).

3.3.3 O CONTROLE TECNOLÓGICO DA PRODUÇÃO

No segmento da cerâmica vermelha, geralmente, não é notada a observância às normas. Existem diversas dimensões entre os mesmos tipos de peças, dificultando o próprio uso do produto. Esta falta de controle em relação às dimensões, decorre principalmente da redução voluntária do tamanho dos blocos e telhas, da falta de conhecimento da existência de padrões e da não exigência por parte do mercado consumidor.

Grande parte das características de qualidade que permitem avaliar se um produto cerâmico atende às especificações, já foram discutidas na seção 3.3.1.

Como o presente trabalho tem por finalidade a utilização do produto cerâmico como agregado a ser utilizado como material para pavimentação, nem todos os itens exigidos em termos de controle tecnológico do produto cerâmico produzido pelas normas vigentes, são de grande relevância à este estudo, principalmente aqueles em que o aspecto visual ou estético estejam sendo avaliados, tais como: dimensões, planeza, esquadro, peso, sonoridade e cor de queima.

Por outro lado, os parâmetros que avaliam a resistência à flexão, e absorção de água são de primordial interesse devido aos objetivos supracitados.

Por julgar-se que as propriedades da porosidade e da densidade, e conseqüente capacidade de absorção de água que um corpo cerâmico possui após passar pelo processo de tratamento térmico a que é submetido, influem no resultado da sua resistência à flexão, este item encerra-se com as considerações pertinentes às pesquisas efetuadas sobre a questão da porosidade dos materiais cerâmicos, paralelamente com a avaliação desta mesma propriedade física observada em outros tipos de agregados, utilizados na pavimentação.

3.3.3.1 A QUESTÃO DA POROSIDADE DOS MATERIAIS CERÂMICOS

O agregado cerâmico de argila calcinada possui em comum uma característica que o assemelha aos outros diversos tipos de agregados citados e descritos no capítulo 2: o fato de ser um agregado artificial.

Apesar desta constatação ser bastante trivial, ela deve ser feita neste instante,

para que seja lembrado o foco dessas pesquisas: buscar de forma sincronizada e com a maior reprodutibilidade possível, um agregado tanto quanto possível próximo do proveniente da britagem das rochas encontradas na natureza.

Uma das propriedades físicas do agregado proveniente de rochas que o torna um material nobre à pavimentação é o de possuir boa resistência mecânica, e suportar as cargas impostas. Isto se deve em parte, pelo fato dele possuir elevada massa específica, ou seja, em seu volume existem poucos (ou quase nulo) vazios, ou fissuras que não estejam preenchidos com sua própria massa; um exemplo disso é o seu valor de absorção de água, que geralmente não excede a 1%, quando se trata de agregados de boa qualidade.

Isso se traduz em uma grande dificuldade a ser atingida pelos agregados artificiais, pois além desta conseqüência na resistência mecânica, a quantidade de ligante asfáltico necessário ao preenchimento desses vazios com comunicação com o meio externo, também ditos “permeáveis” (FIG. 3.30), eleva-se substancialmente, tendo conseqüência direta no custo de aquisição do ligante asfáltico.

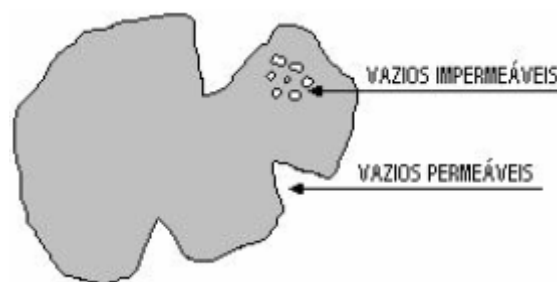


FIG.3.30 Ilustração dos vazios do agregado (MARQUES, 2001).

Mesmo para o caso da região norte do país, em que possa até ser viabilizada financeiramente uma mistura asfáltica com um agregado poroso que apresente um alto teor de ligante, em comparação ao elevado custo de aquisição da pedra britada, este interesse na avaliação da sua porosidade é pertinente, devido principalmente a:

→ justificativa técnica: tentativa de prover uma mistura asfáltica com os mesmos parâmetros de resistência mecânica e capacidade de suporte, assim como as realizadas nas outras regiões do país, melhorando a qualidade local dos pavimentos executados;

→ justificativa financeira: tentativa de prover uma mistura asfáltica com custos aproximados aos praticados em outras regiões do país, considerando inclusive o seu emprego em locais que enfrentem restrições ambientais à exploração de jazidas

rochosas.

Ainda a respeito da justificativa técnica, deve-se ressaltar que não somente a redução da porosidade, conduziria a uma mistura asfáltica qualitativamente similar àquela empregada com agregados naturais, mas também, uma outra hipótese, caso não seja possível uma sensível diminuição desta porosidade, seria a concepção de um método de dosagem diferenciado, que considere as particularidades deste agregado artificial, assim como está descrito nos capítulos finais, a partir dos resultados de ensaios realizados.

Retornando ao segmento da cerâmica vermelha, a porosidade também é uma característica inerente aos corpos cerâmicos produzidos por esta indústria. Uma vez que estas peças sejam produzidas, em linhas gerais, de acordo com a metodologia relatada neste capítulo, existe uma relativa facilidade em atender as especificações brasileiras.

Entretanto, estes valores admissíveis de absorção de água (18% para as telhas e 25% para os tijolos) são muito elevados, caso esteja sendo produzido um agregado cerâmico, que em tese, deseja-se aproximar dos valores encontrados para os agregados naturais.

Em face desta diferença observada, é que a presente dissertação traz os primeiros resultados de ensaios realizados no intuito de diminuir a porosidade, inclusive com a adição de alguns materiais alternativos em pequenos percentuais. Estes resultados estão apresentados no capítulo de aplicação da metodologia proposta.

Para compor uma base teórica a respeito desta etapa experimental, foram pesquisadas algumas publicações sobre estudos que buscam a redução da porosidade dos materiais cerâmicos, principalmente os relativos ao segmento da cerâmica vermelha.

a) OLIVEIRA et al. (2003), descreve que a máxima densificação e a mínima porosidade se obtêm quando a distribuição granulométrica é bastante aberta para permitir que as partículas menores ocupem os interstícios entre as partículas maiores. A porosidade final do produto queimado é influenciada pela: porosidade inicial a seco, formação de fase líquida e rearranjo das fases cristalinas formadas.

Explica ainda que durante o pré-aquecimento com o aumento da temperatura, antes mesmo de se atingir o ponto ideal de queima, são manifestadas modificações

do retículo cristalino das argilas, e após este limite, não é mais possível a irreversibilidade do fenômeno de afinidade com a água.

São destruídos portanto dois tipos de ligações preexistentes. Aumentando ainda as temperaturas, ocorrem reações químicas. Observa-se a formação de novas fases cristalinas, e de fusões parciais e portanto variações de volume que levam finalmente a consolidação do material através da formação de uma estrutura que em processo de resfriamento se torna rígida e com maior resistência mecânica que o material seco.

Tal resistência mecânica é caracterizada fundamentalmente pelo caráter iônico/covalente das ligações químicas, que se não fosse pela presença de poros e defeitos em geral, resultaria extremamente elevada.

b) VIEIRA et al. (2004b), estuda a possibilidade de melhorar as propriedades tecnológicas de massa cerâmica para telhas, com a adição de granito. Relata que além de atuar na redução da plasticidade da massa, o granito contribui para o aporte de óxidos alcalinos (K_2O e Na_2O), através dos feldspatos e mica, que possibilitam o incremento de fase líquida e com isso, contribuem para a densificação das peças.

Ressalta que a adição de granito à massa cerâmica vermelha contribuiu para diminuição da plasticidade e aumento da densidade a seco. Com isso, houve uma redução no valor de absorção. Entretanto, com o aumento na adição de granito, ocorreu uma brusca diminuição da resistência mecânica.

Sugere que se deve diminuir a granulometria do granito, de forma que os grãos de quartzo não contribuam para o surgimento de trincas, que resultam em redução da resistência mecânica; adicionalmente, recomenda a investigação do efeito da temperatura de queima, pois com seu incremento, aumenta-se a quantidade de fase líquida formada, contribuindo para a densificação das peças.

c) MOTTA et al. (2002), explica que as matérias-primas não-plásticas atuam na fase do processamento térmico, quando desempenham o papel mais relevante, controlando as transformações e a sinterização. Devido principalmente ao seu papel na fase de queima, os materiais não plásticos são ainda qualificados de inertes, vitrificantes e fundentes. Para melhor entendimento, a TAB. 3.12 trata dos componentes fundamentais e auxiliares que compõem os corpos cerâmicos.

TAB.3.12 Funções dos componentes presentes nas matérias-primas dos corpos cerâmicos

Componente Fundamentais				
	Componente plástico	Componente não-plástico		
		Componente inerte	Componente vitrificante	Componente fundente
Funções	<ul style="list-style-type: none"> Dá moldabilidade à massa Atua como agente de suspensão em meio aquoso Dá coesão e solidez à massa verde e crua. É responsável pela retração durante a secagem Constitui-se na maior parte do corpo cerâmico, transformando-se em novo composto predominantemente cristalino Atribui coloração natural e característica às peças cerâmicas devido às substâncias corantes contidas 	<ul style="list-style-type: none"> Tem a função de diminuir a plasticidade Permanece inalterado durante todo o processo de fabricação do produto cerâmico quando de natureza refratária. Se é um vitrificante como o quartzo, na queima é inerte só quando em granulometria grossa Diminui a retração de secagem e queima Constitui o esqueleto na massa da cerâmica Aumenta a porosidade aberta 	<ul style="list-style-type: none"> É a substância responsável pela formação da fase vítrea com a contribuição do componente fundente 	<ul style="list-style-type: none"> Abaixa a temperatura que se forma a fase vítrea, que é responsável pela fusão do componente plástico Na cerâmica gresificada determina a quantidade de fase vítrea e da sua temperatura de formação, a qual diminui a porosidade do produto e acentua a retração de queima Na cerâmica não-gresificada participa na reação da formação de silicato e sílico-aluminato cristalino que assegura a resistência mecânica e coesão do produto Na massa crua atua como desplastificante
Matérias Primas	<ul style="list-style-type: none"> Argilas, caulim, outros filossilicatos 	<ul style="list-style-type: none"> Chamote, sílica, cinza natural, cinza volante, escória de alto forno 	<ul style="list-style-type: none"> Sílica (areia quartzosa, quartzo, quartzito) 	<ul style="list-style-type: none"> Carbonatos e rochas carbonáticas feldspatos e rochas feldspáticas silicatos de metais alcalinos terrosos (wollastonita, dióxido, talco)
Componente Auxiliares				
	Fluidificante	Ligante	Defloculante	Plastificante /Lubrificante
Funções	Favorece o escorrimento e a dispersão das partículas da massa	Une as partículas da massa a cru permitindo a queima ou manuseio	Evita a decantação das partículas em uma suspensão aquosa	Aumenta a plasticidade da massa
Matérias Primas	Água, polímeros	Água Ligantes inorgânicos (caulinita, esmectita) Ligantes orgânicos	Carbonato e silicato de sódio, fosfato e polifosfato de metais alcalinos, ácidos orgânicos, poliacrilatos, celulose	Inorgânicos (grafite, talco, argila, mica) Orgânicos (glicol, ester)

Fonte: MOTTA et al., 2002.

d) MENEZES et al. (2002) elabora um estado da arte sobre a possibilidade de utilização dos resíduos industriais e urbanos como matérias-primas cerâmicas alternativas, enfocando a indústria cerâmica como uma fonte economicamente viável e ecologicamente correta para reciclagem de resíduos.

Também descreve que os resíduos redutores de plasticidade, não necessariamente atuam apenas reduzindo a plasticidade das massas cerâmicas, mas também como agentes formadores de fase vítrea, o que, em muitas aplicações, é um fator de grande influência no sucesso do uso desses resíduos na produção de tijolos, revestimentos, grés e produtos de baixa absorção de água (produtos com grande valor agregado) evidenciando-se que a fase vítrea formada pode atuar preenchendo os poros do material, ou como matriz vítrea ligante de grãos cristalinos.

Ilustra alguns casos de emprego de resíduos redutores de plasticidade, na TAB. 3.13, onde se verifica que as formulações são extremamente versáteis, já que, mesmo se fazendo uso de temperaturas de queima relativamente baixas obtêm-se produtos com características mecânicas adequadas às aplicações comerciais, evidenciando-se a possibilidade de se conseguir produtos “mais nobres”, menor absorção de água e maior resistência, caso se utilizem temperaturas de queima mais elevadas.

TAB.3.13 Características e propriedades de corpos cerâmicos à base de argila, com resíduos redutores de plasticidade

Características Cerâmicas	Tipo de Resíduo						
	Pó de Basalto	Pó de Granito	Lama de Chamota	Pó de Cimento	Dolomita	Pó de Rocha	Chamota Refratária
Teor de resíduo (%)	10 - 30	20 - 50%	20 - 60	10 - 30	10	10 - 100	10 - 50
Técnica de moldagem	Extrusão	Prensagem	Extrusão	Extrusão	Extrusão	Prensagem	Manual
Resistência à flexão após secagem (MPa)	-	2 - 6	-	-	4 - 6	-	-
Retração de secagem (%)	8 - 10	0 - 2	9 - 12	10 - 11	6 - 8	-	7 - 8
Temperatura de queima (°C)	900 - 1000	800 - 1000	900 - 1000	900 - 1050	980	1100 - 1200	950 - 1000
Absorção de água (%)	10 - 15	7 - 22	6 - 11	17 - 25	10 - 13	0 - 4	19 - 20
Retração de queima (%)	1 - 2	0 - 2	3 - 6	1 - 2	0 - 1	-	0 - 2
Resistência à flexão após queima (MPa)	-	2 - 14	-	-	7 - 10	30 - 90	4 - 9

Fonte: MENEZES et al., 2002.

A respeito dos resíduos fundentes, os autores explicam que a sua principal característica é a de produzir diminuição na temperatura de maturação do corpo cerâmico, possibilitando redução do consumo energético, graças às novas características da massa cerâmica.

Esses resíduos são, geralmente, provenientes da lama de esmaltação das cerâmicas e dos rejeitos da indústria mecânica e metalúrgica e têm uma composição sílico-aluminosa ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 > 50\%$) com porcentagens variáveis de metais pesados (em alguns casos bem elevadas), alcalinos e alcalinos terrosos, com presença freqüente de Cr, Co, Ni, Cd, Cu, Zn, Pb etc.

Da mesma forma, apresenta dados de tijolos produzidos com resíduos fundentes (TAB. 3.14), e deve-se destacar os valores de absorção de água e resistência à flexão, com as peças obtidas pela incorporação de resíduos provenientes do processo de fabricação de produtos cerâmicos esmaltados, constituídos basicamente por restos de matérias-primas, peças cruas, produtos acabados fora de especificação e lamas provenientes do tratamento das águas de limpeza.

TAB.3.14 Características e propriedades de tijolos com resíduos fundentes

Características Cerâmicas	Tipo de Resíduo			
	Indústria do Aço	Lama de Esmaltação	Hidróxidos de Metal	Resíduos Cerâmicos
Teor de resíduo (%)	20	50	2 - 20	80
Técnica de moldagem	Extrusão	Extrusão	Extrusão	Manual
Temperatura de queima (°C)	830	900	920 - 1050	550 - 620
Absorção de água (%)	16 - 18	2 - 9	0 - 15	5 - 18
Retração de queima (%)	< 1	9	3-9	< 1
Resistência à flexão após queima (MPa)	8 - 12	24 - 31	18 - 46	-

Fonte: MENEZES et al., 2002.

Complementa o estudo com um tipo de resíduo (os resíduos “combustíveis”), e que na verdade, serve para “desmistificar” certos conceitos de alguns ceramistas que costumam incorporar combustíveis sólidos na massa cerâmica ainda “crua”, afirmando que esta prática proporciona redução na porosidade e absorção de água da peça obtida.

Segundo MENEZES et al. (2002), a utilização de resíduos combustíveis por parte das indústrias cerâmicas pode ser efetuada de duas maneiras: por incorporação dos resíduos à massa cerâmica ou mistura com os combustíveis responsáveis pela queima do corpo cerâmico, sendo que, em ambos os casos, é utilizado o poder calorífico dos resíduos para auxiliar na queima.

Revela que o uso de materiais combustíveis como auxiliares de queima pode chegar a propiciar economia energética da ordem de 45% (o que explica em parte, o relativo “interesse na redução da porosidade” da prática citada acima). Todavia, muitos cuidados devem ser tomados ao se fazer uso de resíduos na queima, já que

podem liberar vários gases altamente nocivos à saúde humana, sendo altamente recomendado o uso de filtros para gases.

Por último, considera imprescindível evidenciar que a utilização de resíduos combustíveis adicionados às massas cerâmicas pode provocar sensível diminuição da resistência mecânica do corpo, associada à formação de grande quantidade de poros com a volatilização do combustível na queima, e, alterar a composição mineralógica do produto, caso a queima não provoque a adequada oxidação dos resíduos, deixando carbono na massa, o qual pode atuar como agente redutor durante o restante da queima (MENEZES et al., 2002).

e) ALEXANDRE et al. (2004b), divulgam um interessante estudo que verifica a incorporação da cal em 0%, 5%, 10% e 15% em peso na massa cerâmica, sob a queima nas temperaturas de 750°C, 850°C, 950°C e 1050°C.

Relata que calcários e argilas carbonáticas, são largamente utilizados nos grandes centros produtores de cerâmica da Europa, não causando danos às peças e, pelo contrário, possibilitando maior controle dimensional das mesmas durante a produção.

Após a realização dos ensaios com amostra de massa cerâmica proveniente da jazida de uma indústria cerâmica de Campos dos Goytacazes (RJ), e uma amostra da cal adquirida no comércio local, os autores concluem que: a massa cerâmica e a cal apresentam fina granulometria, uniforme, adequada ao uso de formulações cerâmicas; as peças cerâmicas com incorporação da cal na proporção de 5% a 950°C, apresentaram melhores resultados de resistência à flexão; na medida que se acrescentou mais cal na formulação da massa cerâmica, houve um acréscimo na absorção de água, provavelmente devido a liberação de gases na queima, como observado em análise térmica diferencial, provocando micro fissuras.

Sugere desta forma, o estudo com maior detalhe da composição em proporções menores do que 5% da cal na massa cerâmica a 950°C.

f) Como último relato, é válido citar o trabalho de ALEXANDRE (2000) que apresenta em tese de doutorado, uma metodologia que se baseia num modelo numérico que permita programar as misturas a serem utilizadas na confecção de produtos cerâmicos.

O primeiro passo seria postular um ou mais modelos para descrever as propriedades de interesse (tensão de ruptura, porosidade, etc.) em função da

composição das misturas. Em seguida, fazer um planejamento experimental, especificando as composições a serem estudadas. Uma avaliação da eficiência dos modelos pode ser feita através de métodos estatísticos e comparação entre os resultados experimentais e os obtidos com o modelo numérico.

3.4 ESTUDO DE CASO: PROJETOS DA REGIÃO AMAZÔNICA

Sob o ponto de vista de apreciação de metodologias científicas, julgou-se pertinente a apresentação de projetos realizados na região de maior interesse da presente dissertação.

Os projetos aqui descritos, contemplam estudos elaborados e executados com primazia por órgãos estatais a respeito do mapeamento geológico, identificação e prospecção das matérias-primas argilosas da região amazônica, e o seu emprego como material cerâmico.

Somado a este conhecimento adicional que é proporcionado, principalmente para a composição das etapas da metodologia proposta, torna-se também relevante a menção destes projetos, devido a escassez de informações relativas às matérias-primas da região, assim como dos seus processos produtivos, em comparação ao volume de dados disponíveis das outras regiões do país.

Em que pese também o seu valor didático, tornam-se ótimas fontes de referência e exemplo a ser seguido, em futuros estudos exploratórios nos outros estados desta região em questão.

Dentro deste contexto, são mencionados os seguintes estudos:

- ARANTES et al. (1972): Projeto Argila-Belém, e
- NETO e REZENDE (1997): Características das argilas utilizadas na cerâmica vermelha em Santarém (PA).

A partir do item subsequente, estão sendo descritos os objetivos e as etapas constituintes do Projeto Argila-Belém.

Considerando que a etapa experimental desta dissertação foi em grande parte subsidiada com dados relativos da localidade de Santarém (PA), o segundo projeto acima mencionado, está descrito com maior detalhamento, no capítulo que trata desta fase de aplicação da metodologia.

3.4.1 PROJETO ARGILA-BELÉM

O projeto teve como objetivos o mapeamento geológico da área, cadastramento de ocorrências minerais, prospecção e estudo destes minerais como materiais de construção em geral.

Na parte referente aos materiais cerâmicos, realizou uma seleção e classificação preliminar dos principais depósitos de argila, quanto às suas possibilidades de utilização nos diferentes grupos da indústria cerâmica, como também para agregados leves; classificação dos principais depósitos de areia para construção civil e suas possibilidades de utilização na indústria do vidro; delimitação de áreas com ocorrências de pedras para construção, considerações sobre volume, qualidade da rocha e possibilidades de aproveitamento econômico.

A área do Projeto Argila-Belém situou-se a NE do Estado do Pará, na região compreendida acima do paralelo 2° Sul e a Leste de Belém até o Meridiano 46° 30' W.Gr, abrangendo uma área de aproximadamente 33.400 Km².

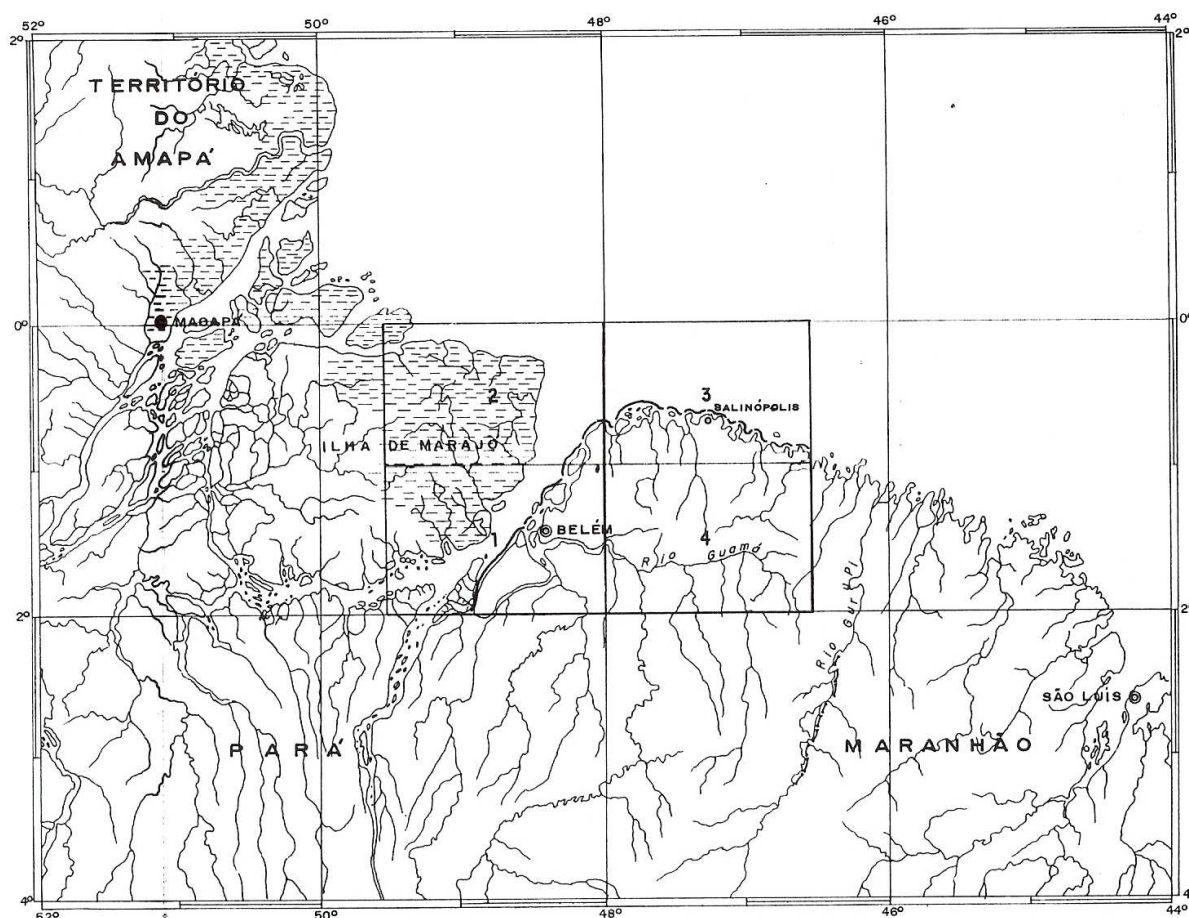


FIG.3.31 Mapa de localização do Projeto Argila-Belém (ARANTES et al., 1972).

Os trabalhos de campo na área do Projeto revelaram algumas ocorrências minerais de interesse econômico, principalmente para a indústria da construção civil. Estas descobertas estão detalhadas na FIG. 3.32. Para melhor visualização, uma ampliação está disponível no ANEXO 1 da presente dissertação.

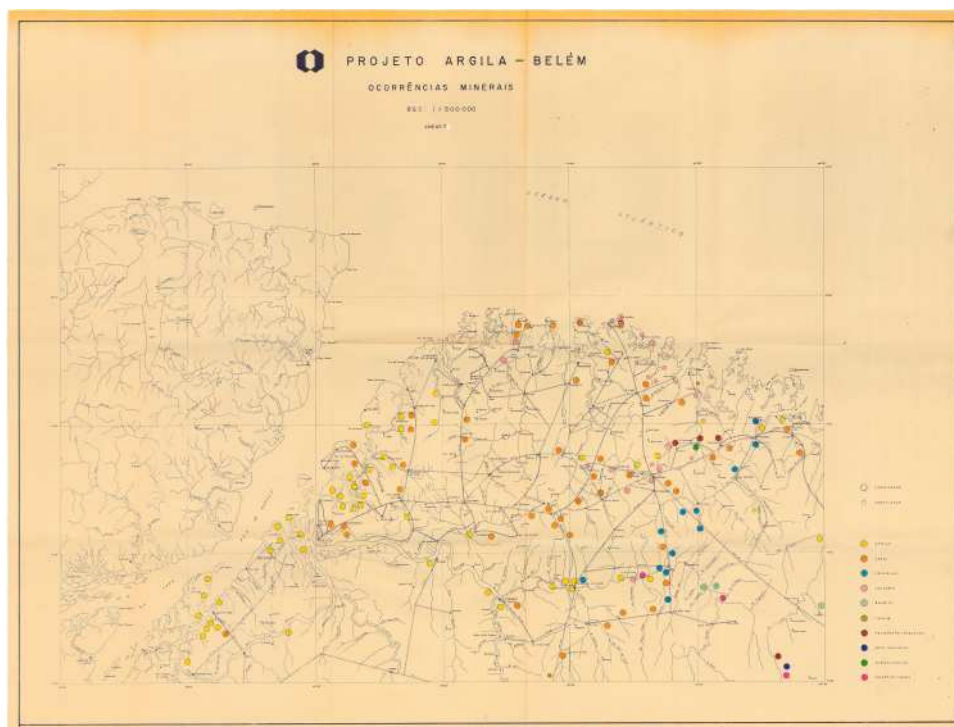


FIG.3.32 Mapa de ocorrências minerais do Projeto Argila-Belém (ARANTES et al., 1972).

Na zona costeira da área, principalmente na faixa marginal da baía do Marajó, existem inúmeros depósitos de argila potencialmente econômicos. São argilas de cores variadas, de cinza escuro passando a cinza azul esverdeado e argilas claras. Nas ilhas localizadas nos arredores de Belém, existem depósitos de argila muito plástica, utilizadas pelas olarias locais para fabricação de tijolos e telhas, principalmente.

Além da argila, foram identificadas jazidas de areia; cascalho (seixos de quartzo de diversas dimensões e predominantemente arredondados); calcário (cuja exploração está voltada para a fabricação de cimento portland e de cal); bauxita; caulim; pirofilita (explorado pela indústria de cerâmica branca); quartzo, feldspato e mica; e alguma ocorrências de rochas graníticas (sendo toda a produção absorvida praticamente, pelo mercado consumidor de Belém).

Conforme foi descrito, os objetivos do projeto foram dirigidos principalmente no sentido de obter o selecionamento de áreas com matéria prima para a indústria cerâmica, além de argilas para utilização na fabricação de agregados de argila expandida.

Sendo assim, para melhor caracterização mineralógica das ocorrências de argilas, foram realizados ensaios de análise térmica (ATD) e difração de raios-X.

Os mais importantes depósitos de argila da área localizam-se a oeste do Estado, ao longo da costa paraense banhada pela baía do Marajó e baía do Guajará, onde se concentram as maiores indústrias cerâmicas da região (FIG. 3.33). Destacam-se também pelo seu potencial econômico, os depósitos verificados na porção inferior dos rios Guamá, Moju, Acará e Capim.

Essas argilas são usadas exclusivamente em produtos de cerâmica vermelha, conseqüência natural da demanda de material de construção e das possibilidades de fabricação fácil, uma vez que a matéria prima é abundante.

Destacam-se dois núcleos regionais de grande produção, sendo um nas proximidades de Belém, tanto no continente como nas ilhas próximas e outro a sudoeste da área do Projeto, nas circunvizinhanças de Abaetetuba: onde se concentra a maior quantidade de olarias em produção.

O transporte dos produtos cerâmicos é feito normalmente por via rodoviária e fluvial, neste último caso utilizando-se batelões e barcos de porte médio, vindos do interior até Belém, destinados aos revendedores locais.

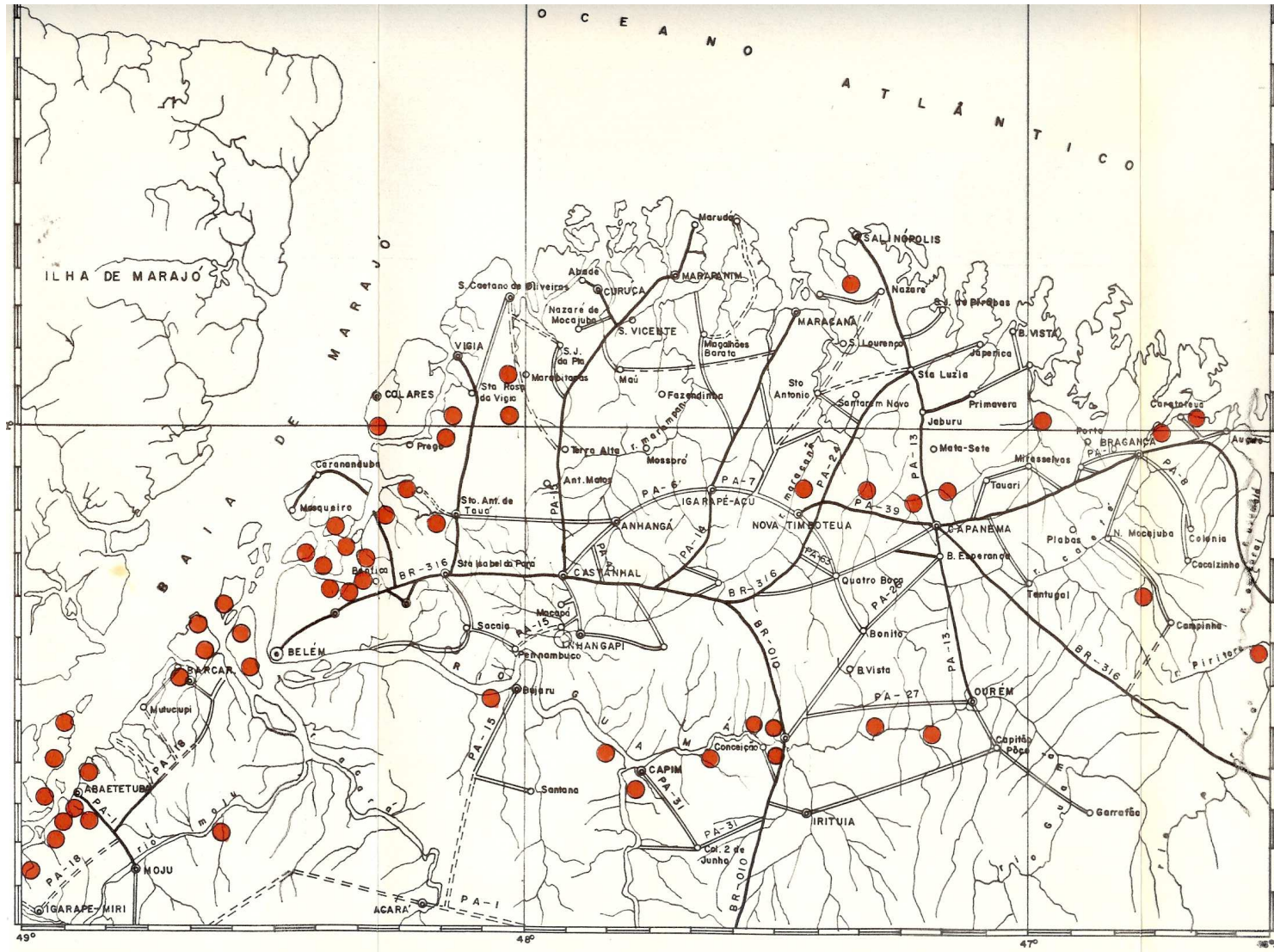


FIG.3.33 Ocorrências das jazidas de argilas do Projeto Argila-Belém (ARANTES et al., 1972).

As argilas dos depósitos marginais e pequenas ilhas da costa são argilas de idade recente. Nas partes mais elevadas encontram-se depósitos de argilas da “Formação Barreirinhas”. Entretanto, as argilas mais usadas na região são retiradas dos depósitos das ilhas, por se apresentarem bastante plásticas e homogêneas, facilitando a modelagem das peças, uma vez que a maioria das olarias locais (na época) eram desprovidas de máquinas adequadas para o uso de argilas mais consistentes. Poucas olarias apresentavam-se bem equipadas em instalações e maquinário moderno.

As telhas mais comuns registradas eram do tipo convexa, pela facilidade no manuseio e secagem mais rápida. Apresentam custo aquisitivo pouco mais elevado que o tijolo de 3 furos. Telhas do tipo francesa e portuguesa também eram fabricadas, mas apenas por encomenda.

Na ocasião, registrou-se também a fase de instalação de uma indústria de cerâmica branca, a AZPA (Azulejos do Pará S.A.) localizada nas proximidades de Belém, na rodovia BR-316, potencialmente equipada para produzir azulejos brancos, coloridos e decorados em larga escala.

Uma pequena amostragem do cadastro de indústrias cerâmicas efetuado na região está apresentado na TAB. 3.15.

A coleta das amostras foi feita com sondagens a trado manual, realizadas em depósitos de argila pertencentes às olarias locais e áreas adjacentes.

Foram realizadas um total de 19 sondagens. A amostragem foi feita em intervalos de 0,50 em 0,50 metros. As amostras coletadas foram postas a secar ao ar e à sombra, para, em seguida, serem pulverizadas, homogeneizadas, quarteadas e peneiradas convenientemente. A localização das sondagens realizadas está representada no ANEXO 2.

TAB.3.15 Registros de indústrias cadastradas pelo Projeto Argila-Belém

NOME DA FIRMA	MUNICÍPIO	LOCAL	PROPRIETÁRIO	MAT. FABRICADO	PROD. MÉDIA MENSAL
OLARIA MARABITANAS	SAO CAETANO DE ODIVELAS	POVOADO DE MARABITANAS MARGEM DIR. RIO MOJUIM	PREFEITURA DE SÃO CAETANO.	—	—
OLARIA DO SR. AMADEU	VIGIA	A 100 m DA MARGEM DA RODOVIA PA-22	SR. AMADEU	—	—
OLARIA DO SR. JÚLIO BULHÕES DA TRINDADE	VIGIA	MARGEM DO RIO GUARIMÃ	SR. JÚLIO BULHÕES DA TRINDADE	—	—
OLARIA SANTA MARIA	VIGIA	MARGEM DO IGARAPE SANTA MARIA, AFLUEN- TE DO RIO GUARIMÃ	SR. MANOEL SANTOS	TELHAS E TIJOLOS	36.000 PEÇAS
OLARIA DO SR. MENER- VINO DE OLIVEIRA	SANTO ANTONIO DO TAUÁ	MARGEM DO RIO TAUÁ	SR. MANOELINO DE OLIVEIRA	TIJOLOS	10.000 PEÇAS
OLARIA DA SRA. AURORA SANTOS	SANTO ANTONIO DO TAUÁ	VILA DO ESPIRITO SAN- TO DO TAUÁ, MARGEM DIREITA DO RIO TAUÁ	AURORA SANTOS	TELHAS COMUNS, FRAN- CESAS E TIJOLOS	—
OLARIA DO SR. JOÃO BENTES	SANTO ANTONIO DO DO TAUÁ	MARGEM DIREITA DO RIO TAUÁ	SR. JOÃO BENTES	TIJOLOS	45.000 PEÇAS
OLARIA DO SR. WALDE- MAR CANCELA	SANTA IZABEL DO PARÁ	ENTRADA PARA A VILA TACAJO'S DO INDA	SR. WALDEMAR CANCELA	TIJOLOS E TELHAS	54.000 PEÇAS
OLARIA DO SR. ANÍBAL CORRÊA	BENEVIDES	VILA TAUARIE (500m DA PONTE PARA MOSQUEIRO)	SR. ANÍBAL CORRÊA	TELHAS, LADRILHOS TIJOLOS, DE 3 FUROS E MACICO	20.000 PEÇAS
OLARIA SANTO ANTONIO	BENEVIDES	VILA DE SANTA BARBARA	SR. WALDEMAR GOMES	TIJOLOS E TELHAS	15.000 PEÇAS
OLARIA NAZARÉ	BENEVIDES	VILA DE SANTA BARBARA	SR. JOAQUIM FELIX RIBEIRO	TELHAS E TIJOLOS	TELHAS- 9.000 TIJOLOS- 24.000
OLARIA PARAENSE	BENEVIDES	VILA BENFICA, MARGEM DO RIO BENFICA	DJORD LIDOR MOREIRA	TELHAS E TIJOLOS	TELHAS - 30.000 TIJOLOS - 80.000
CERÂMICA BRASILIA	BENEVIDES	MARGEM DO IGARAPE MA- RITUBINHA AFLUENTE DA MARGEM DIREITA DO RIO BENFICA	SR. ALCIDONIDES GUIMARÃES LEAL	TELHAS E TIJOLOS	—
CERÂMICA CEARÁ	BENEVIDES (VILA BENFICA)	MARGEM DO RIO BENFICA	SR. MANOEL DE PINHO VIEIRA	UTENSÍLIOS DE BARRO, TIJOLOS E TELHAS	TIJOLOS E TELHAS 36.000 PEÇAS
OLARIA POPULAR	BENEVIDES	MARGEM DO RIO BENFICA	SR. SEBASTIÃO BARBOSA	—	—

Fonte: ARANTES et al., 1972.

Para a identificação mineralógica, foi feito preliminarmente, o uso de corantes orgânicos, mais especificamente do composto orgânico benzidina.

Na época do projeto, considerava-se a praticidade e simplicidade deste método, pois quando misturado com as argilas, dá origem ao aparecimento de coloração azul ou verde na superfície do argilomineral quando este pertencer ao grupo da montmorilonita.

Atualmente, deve-se atentar para os riscos à saúde que este método implica, mais especificamente pela ocorrência de casos de câncer adquiridos pelo contato com este composto químico segundo a *Agency for Toxic Substances and Disease Registry* (ATSDR, 2001). Nos dias atuais, e com os métodos já descritos anteriormente, torna-se perfeitamente dispensável este ensaio em questão.

Posteriormente, as amostras foram analisadas no Termo-Analisador Diferencial portátil "Eberbach". Parte das amostras foi analisada no Laboratório de Química da CPRM (LAQUI), e parte na Agência-Belém.

No total, foram submetidas à Análise Térmica Diferencial, 86 amostras de argila, entre as quais, todas aquelas que por intermédio dos ensaios de corantes químicos, apresentaram fortes evidências de argilas do grupo da montmorilonita.

Os termogramas foram obtidos utilizando-se a argila após moagem e passagem em peneira de 80 mesh.

Foram submetidos à análise mineralógica por difração de raios X, todas as amostras que indicaram uma possível existência de argilominerais do grupo da montmorilonita, tanto pela Análise Térmica Diferencial (ATD), como pelos ensaios com corantes químicos.

As análises foram realizadas no Laboratório de Petrografia do CPRM (LAPET), cujos resultados, estão aqui mostrados no ANEXO 3.

Foram ainda enviadas ao Instituto Nacional de Tecnologia (INT), um total de 66 amostras, consideradas as mais representativas dos depósitos estudados, para: classificação preliminar quanto ao uso cerâmico, compreendendo cerâmica vermelha, cerâmica branca e refratários; ensaio de queima a 110°C, 950°C, 1250°C e 1450°C; absorção de água; retração linear e ponto de fusão. Estes resultados estão dispostos no ANEXO 4.

Considerando as necessidades da indústria de construção civil de Belém, foram também registradas as áreas com ocorrências de argilas possíveis de utilização na

fabricação de agregados de argila expandida, para uso em concreto leve estrutural.

A partir dos resultados obtidos na análise mineralógica, ficou constatado que a maior parte das argilas estudadas apresentavam minerais do grupo da caulinita e illita em predominância.

Pela análise térmica diferencial foi possível verificar que quase todas as amostras continham matéria orgânica, evidenciada pelas bandas exotérmicas entre 200°C e 520°C, e entre 600°C e 900°C.

Caso haja o interesse, e também para uma visualização global do projeto realizado, as amostras podem ser localizadas no Mapa de Caminhamento Geológico (ANEXO 5), de acordo com a identificação adotada nos anexos citados anteriormente.

Como etapa conclusiva, o projeto relata que:

→ A indústria de construção civil em Belém enfrenta certos problemas com relação a materiais de construção, principalmente em se tratando de agregados graúdos para concreto. As ocorrências de rochas duras para brita, como por exemplo os granitos, existem na área mas a distâncias consideráveis do mercado consumidor da capital;

→ Diante do elevado custo desse material, a brita tem sido substituída, em parte, por cascalhos (seixos), os quais apresentam excelentes qualidades para determinados fins, muito embora não possa ser substituto do granito em certas obras de engenharia;

→ O cascalho é vendido da maneira como ocorre, sem nenhum tratamento prévio. Através de um simples processo de lavagem e classificação dos seixos em peneiras de malhas padronizadas, sem dúvida, haveria maior procura e uso desse material;

→ Já tendo conhecimento na época, da recente tecnologia da argila expandida sendo desenvolvida em São Paulo, o projeto recomenda que através de órgãos competentes, sejam buscadas iniciativas no sentido de maiores esclarecimentos de ordem técnica a respeito dos agregados leves para concreto, a fim de procurar despertar a atenção das empresas em torno do assunto;

→ Quanto aos agregados miúdos para concreto, não são identificados problemas imediatos, uma vez que inúmeros são os depósitos de areia existentes na área e próximos à Belém;

→ Um outro aspecto do problema relativo a materiais de construção se refere aos produtos de cerâmica vermelha, telhas e tijolos, principalmente. A produção parece não ser inteiramente satisfatória em decorrência da grande demanda desse material, apesar de ser abundante e de boa qualidade a matéria prima da região.

3.5 VISITAS REALIZADAS ÀS INDÚSTRIAS CERÂMICAS

Como etapa conclusiva a este capítulo, são apresentadas e relatadas as visitas realizadas a algumas indústrias do segmento cerâmica vermelha.

Na verdade, esta foi a etapa que começou a fase experimental da pesquisa, durando diversos meses, e tinha como intenção inicial, adquirir conhecimentos específicos sobre a linha de produção dessas indústrias, seus equipamentos, custos de produção e tipos de fornos utilizados.

Tais conhecimentos, seriam então utilizados para a idealização e desenho de um projeto-tipo de usina de fabricação do agregado de argila calcinada, a ser proposto juntamente com a metodologia, de forma similar ao que foi elaborado pelo estudo do DNER para o agregado de argila expandida, sabendo porém da dificuldade de viabilizá-lo na prática, obviamente por motivos de recursos financeiros necessários à montagem de um projeto deste vulto.

Apesar dessa proposição, mesmo que somente teórica, já fosse suficiente por ter alguma relevância a título acadêmico, com o andamento dessas visitas aqui descritas, foi vislumbrada uma outra possibilidade de produção, e conseqüentemente foi levantado um novo “desafio” a ser considerado: a tentativa de efetuar uma produção experimental do agregado de argila calcinada, em uma unidade industrial convencional de peças cerâmicas.

Essa alternativa, foi também planejada, raciocinando principalmente por este aspecto financeiro, mas agora não somente pelo lado acadêmico, mas também devido às peculiaridades de diversos municípios localizados na região norte do país, que são atingidos pela conhecida escassez de ocorrências de jazidas rochosas, e não têm como dispor de um elevado aporte de recursos para a aquisição de uma usina pré-fabricada para a produção do agregado de argila calcinada.

Somado a estas restrições orçamentárias, deve-se lembrar da complexa situação logística para atender algumas dessas localidades, que na maioria dos

casos não possui ligação rodoviária com as principais cidades do estado. Sendo assim, torna-se uma operação que abrange diversos modais, o transporte de uma usina até esta localidade, ou até mesmo do agregado cerâmico produzido, que já chegaria com um alto custo de transporte.

Fato este já não se observa para uma unidade de produção de peças cerâmicas, que é usual em vários municípios, ou mesmo no caso de não existir, pode-se perceber nos itens anteriores descritos neste capítulo, alguns exemplos simples de projetos de fornos e de olarias para serem implantados na região.

Além disso, existe também o conhecimento da reduzida demanda necessária para atender estes mercados locais em comparação aos grandes centros.

Foi então diante desses fatos, que a solução encontrada foi levada a efeito, e compôs uma linha de ação dentro da pesquisa, tendo o êxito esperado, essencialmente devido ao suporte fornecido por empresários cerâmicos que colaboraram e somaram esforços para atender esta nova opção.

3.5.1 PÓLO CERÂMICO DE ITABORAÍ (RJ)

Por questões de proximidade, além da grande diversidade de indústrias, as primeiras visitas foram efetuadas na região de Itaboraí (RJ).

O estado do Rio de Janeiro possui três grandes centros cerâmicos. Além da região de Itaboraí, existem também o denominado Pólo Cerâmico do Médio Vale do Paraíba, e o maior deles, o Pólo Cerâmico de Campos dos Goytacazes.

Como não havia contato prévio, e todo este interesse da pesquisa do agregado de argila calcinada, deveria ser explicado pessoalmente aos empresários cerâmicos no intuito de obter alguma colaboração, já era esperada uma certa dificuldade em obter informações através deste contato informal e acadêmico.

Apesar da grande quantidade de indústrias localizadas na região de Itaboraí, muitas são aquelas que operam de forma praticamente “artesanal”, com poucos equipamentos, e utilizando a lenha como único combustível na queima.

Seguindo um critério seletivo, foram procuradas unidades produtoras que dispunham de algum controle tecnológico e ao mesmo tempo, estivessem dispostas a colaborar com a pesquisa, durante o período de coleta de dados na região.

Dentro deste universo, foram selecionadas e visitadas as seguintes empresas:

→ Cerâmica São Silvestre (município de Rio Bonito):

Contato: Sr. Etiene Soares

Rodovia BR/101 – Km 270

→ Cerâmica Marajó (município de Tanguá):

Contato: Sr. Rodolfo

Rodovia BR/101 – Km 277

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

Tendo em vista que as etapas do processo produtivo, os tipos de fornos e combustíveis empregados, e os equipamentos em geral utilizados, já foram todos descritos, resta apenas dispor a título ilustrativo, algumas fotos que melhor associam e encerram todos estes itens que compõem o presente capítulo.



FIG.3.34 Vista interna do galpão com as etapas de preparação e moldagem da matéria-prima (Cerâmica São Silvestre).



FIG.3.35 Detalhe dos silos dosadores de argila e do equipamento triturador na seqüência (Cerâmica São Silvestre).

Destaca-se ainda no processo observado nesta cerâmica, um interessante detalhe após esta primeira etapa de trituração do solo argiloso, em que ele obrigatoriamente é passado por um martelo com ímãs, responsável pela retirada de qualquer corpo metálico presente na matéria-prima, evitando danos aos próximos equipamentos dispostos na linha de produção.



FIG.3.36 Matéria-prima parcialmente homogeneizada seguindo para a umidificação e equipamento misturador (Cerâmica São Silvestre).



FIG.3.37 Seqüência das etapas da secagem: transporte; exaustores para secagem; 1ª secagem em galpão; 2ª secagem ao ar (Cerâmica São Silvestre).



FIG.3.38 Seqüência das etapas de queima: vista geral do forno Hoffmann; detalhe do empilhamento; vistas das escotilhas de topo para entrada de combustível (Cerâmica São Silvestre).



FIG.3.39 Depósito de matéria-prima e área para sazonalização (Cerâmica Marajó).

Lembra-se aqui neste instante o fato desta indústria praticar o conceito de sazonalização da matéria-prima, que favorece a obtenção de uma mistura otimizada.



FIG.3.40 Funcionamento de equipamento misturador com dois eixos de hélices helicoidais (Cerâmica Marajó).



FIG.3.41 Depósito e incorporação de carvão mineral moído à massa argilosa antes da etapa de extrusão (Cerâmica Marajó).



FIG.3.42 Extrusão e corte dos tijolos; extrusão e prensagem de telhas (Cerâmica Marajó).



FIG.3.43 Estantes móveis sobre trilhos para secagem inicial das telhas e unidade estufa (Cerâmica Marajó).



FIG.3.44 Etapa de queima: controle da temperatura; mistura de serragem e carvão utilizado como combustível; carros com termômetro e maçaricos móveis; empilhamento das peças (Cerâmica Marajó).

3.5.2 PÓLO CERÂMICO DE CAMPOS DOS GOYTACAZES (RJ)

Através das visitas na região de Itaboraí (RJ), foram repassadas informações a respeito do maior pólo produtor do estado, situado na região do município de Campos dos Goytacazes (RJ), bem como da vanguarda tecnológica não somente pelos equipamentos e fornos utilizados, mas também pelo uso de outros tipos de combustíveis, tais como o gás natural.

Outra informação procurada com os empresários, foi da existência de algum cadastro das olarias, de forma a seguir a metodologia utilizada no Projeto Argila-Belém (ver TAB. 3.15).

Sobre este cadastro, a instrução passada foi a de procurar o Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro (DRM-RJ), que segundo as suas

atribuições (<http://www.drm.rj.gov.br/>), vem a ser o órgão responsável por registrar, mediante cadastro técnico, todas as pessoas físicas e jurídicas dedicadas à atividade de mineração, em território fluminense.

Por ocasião da visita ao DRM-RJ, localizado em Niterói (RJ), foi feita uma entrevista com o Sr. Ronaldo da Costa Maurício, Coordenador de Economia Mineral. Além da confirmação dos dados obtidos anteriormente sobre a produção cerâmica no estado (TAB. 3.16), foi fornecido um cadastro dos centros produtores citados, e a indicação de contato com o Prof. Jonas Alexandre, da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), e responsável por diversas pesquisas efetuadas em cerâmica vermelha.

TAB.3.16 Produção do setor cerâmico no Rio de Janeiro

Produto	Nº de empresas	Produção (em 1.000 peças por mês)	Empregos Diretos
Tijolo	207	210.000	12.000
Telha	13(*)	3.200	

(*) quatro destas empresas estão situadas no pólo de Campos

Fonte: MAURÍCIO, 2004a e 2004b.

Conforme os dados de MAURÍCIO (2004a) o estado conta com um total de 222 empresas em operação, e somente o Pólo de Campos dos Goytacazes conta com 108 empresas, sendo 104 empresas situadas no próprio município e distribuídas de acordo com a TAB. 3.17 e FIG. 3.45:

TAB.3.17 Divisão do Pólo de Campos dos Goytacazes (RJ)

Tipo	Nº de empresas
Indústria cerâmica com jazida de argila	78
Indústria cerâmica	18
Empresa somente fornecedora de argila	08

Fonte: MAURÍCIO, 2004b.

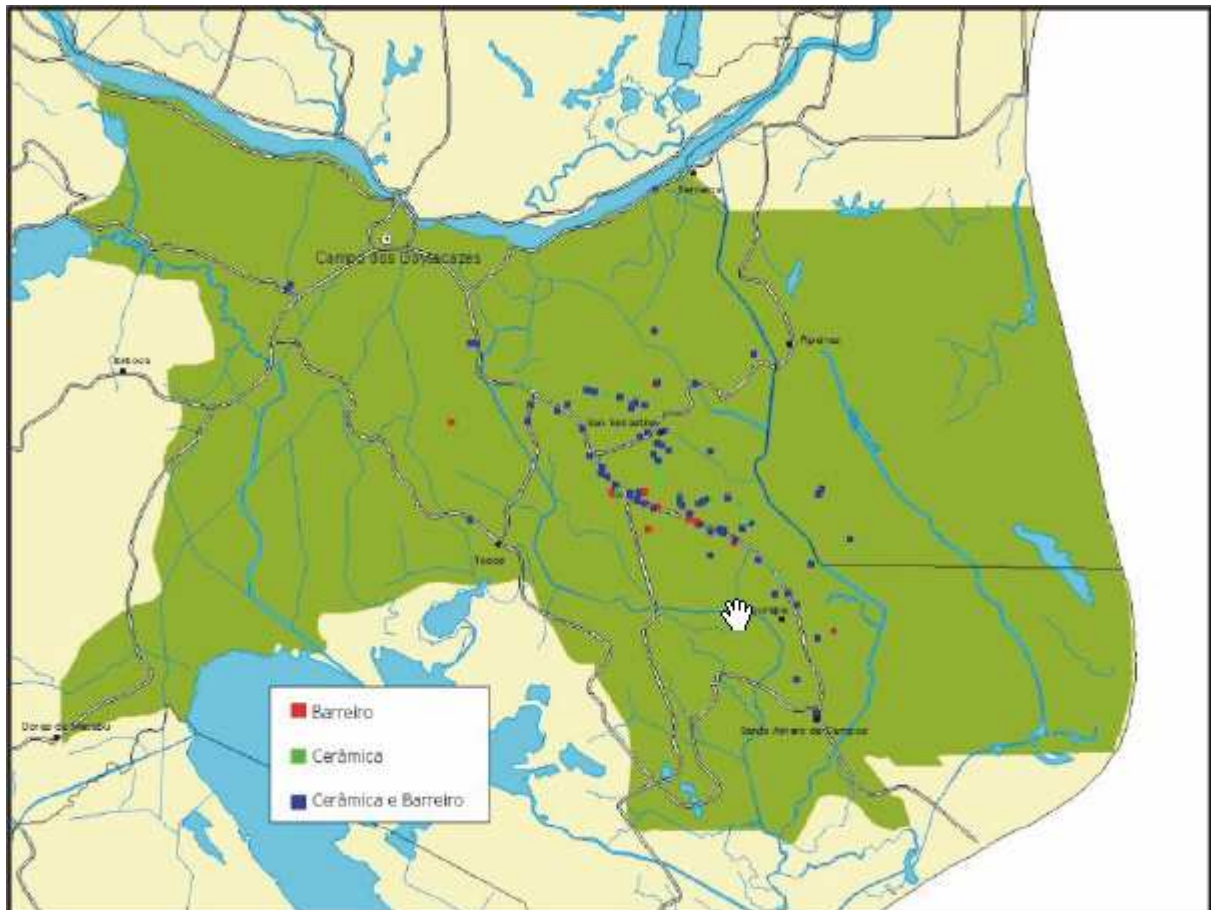


FIG.3.45 Mapa de localização das empresas pertencentes ao Pólo de Campos dos Goytacazes (MAURÍCIO, 2004b).

De posse destas informações, foi estabelecido contato com o Prof. Jonas Alexandre, que cordialmente, coordenou e deu total orientação juntamente com o Prof. Jean Marie Désir, durante a visita a algumas unidades cerâmicas industriais do pólo cerâmico de Campos dos Goytacazes, e aos laboratórios da UENF.

A partir desta visita, e dos conhecimentos adquiridos, pode-se considerar que a alternativa da produção do agregado de argila calcinada em unidades industriais cerâmicas convencionais estava basicamente delineada.

Por ocasião desta visita, e devido à disponibilidade oferecida pelo Prof. Jonas Alexandre, ainda acreditava-se em realizar a desejada produção experimental em alguma destas indústrias, servindo como modelo a ser sugerido para a região amazônica, na metodologia.

Entretanto, por grande fortuna, houve ainda a possibilidade de complementar esta etapa de visitas às indústrias cerâmicas, na própria região de interesse do

estudo, e mais precisamente, no município que enviara uma grande remessa de matéria-prima argilosa para a parte experimental da presente dissertação: em Santarém, no estado do Pará, e que está melhor detalhado no próximo item e no capítulo de aplicação da metodologia proposta.

Cabe aqui então, revelar que grande parte dos assuntos que estiveram presentes neste capítulo e de alguma forma são julgados pertinentes à pesquisa, são provenientes do período de coleta de dados no pólo cerâmico de Campos dos Goytacazes, e principalmente, foram despertados devido às orientações transmitidas pelo Prof. Jonas Alexandre.

Alguns destes ensinamentos, que estão de forma sumária listados a seguir, foram inclusive relativos à parte do projeto de montagem ou adaptação de uma possível unidade cerâmica ou usina protótipo para a fabricação do agregado de argila calcinada. Seguem também na seqüência, fotos relativas às visitas realizadas:

→ A importância da prospecção mineralógica, da realização da análise química e análise térmica com amostras do material a ser utilizado;

→ As conseqüências observadas nos corpos cerâmicos, devido à presença de determinados argilominerais e/ou elementos químicos;

→ A correta observância da preparação de amostras para a realização de ensaios mais específicos, tais como ATD/ATG/DRX;

→ Interpretação dos resultados provenientes das curvas de ATD, que em suma, podem servir como futuro “plano de queima” ao agregado de argila calcinada, procurando assim a máxima densificação do agregado produzido;

→ Pesquisas sobre a incorporação de materiais alternativos (resíduos industriais, elementos fundentes, elementos redutores de plasticidade) à massa argilosa antes das etapas de moldagem, e suas aplicações;

→ Princípio de funcionamento dos fornos tipo “Hoffmann”, “Caieira”, “Abóbada” e “Túnel”. Vantagens, desvantagens, e provável adaptação para a produção de agregados cerâmicos para pavimentação;

→ Métodos de empilhamento empregados no interior dos fornos, e formas de otimizar o calor produzido dentro das câmaras;

→ A importância da etapa de secagem, unidades estufas, exaustores e a indicação de instalação de higrômetros para acompanhamento da secagem;

→ Exemplos de unidades e princípio de funcionamento da recuperação de

gases quentes;

- Metodologia para controle e manutenção da temperatura dentro dos fornos;
- Exemplos de automatização da linha de produção, e queimadores empregando gás natural e serragem pré-tratada;
- Desenho e prototipagem de um modelo em escala reduzida para a confecção automatizada dos agregados.



FIG.3.46 Vista geral do forno tipo caieira para tijolos (esquerda) e do tipo abóbada para telhas.



FIG.3.47 Funcionamento do forno Hoffmann: detalhes do empilhamento (esquerda); abertura entre as peças para entrada da lenha e vista de cima da queima.



FIG.3.48 Forno túnel: queimadores para serragem e/ou gás natural; unidade de pré-tratamento da serragem (direita).



FIG.3.49 Forno túnel: carros destinando as peças para a unidade estufa ou unidade de queima final; peças após queima (direita).



FIG.3.50 Linha de produção automatizada: após extrusão e corte (esquerda) as peças são destinadas para os carros em esteiras rolantes.



FIG.3.51 Extrusora à vácuo e linha de fornos do laboratório da UENF.

3.5.3 PÓLO CERÂMICO DE SANTARÉM (PA)

Conforme foi relatado, estava delineada a possibilidade de ser efetuada uma produção experimental em Campos dos Goytacazes, e em seguida, seriam efetuadas as devidas alterações nas análises de custos, para que fosse possível obter dados mais aproximados da realidade encontrada na região norte do país.

Neste ínterim, por ocasião do planejamento da Operação Ricardo Franco II, em que alunos do 5^o ano de graduação do IME, desenvolvem projetos de engenharia de cunho social em comunidades da região amazônica, foi incluída como uma das localidades a serem atendidas, a cidade de Santarém no Pará.

Levando em consideração um pedido que viria a criar a possibilidade de efetuar esta produção experimental na própria região de estudo da presente dissertação, o comando do IME pela primeira vez inclui um aluno de pós graduação nesta operação, e novamente, lançava-se outro “desafio” a ser defrontado: durante os dez dias disponíveis da operação, deveriam ser efetuadas novas visitas em empresas cerâmicas, procurando o fomento necessário a esta produção desejada.

De forma semelhante ao que foi realizado na região de Itaboraí (RJ), foram procuradas as indústrias que dispunham ao menos de um controle adequado da temperatura de queima, para servir como modelo a ser proposto na metodologia.

Para esclarecer e tornar concreta a visualização do agregado cerâmico pelos empresários locais, foram inclusive levadas algumas amostras de argila calcinada fabricadas em laboratório (FIG. 3.52).

Tendo atingido novamente o objetivo almejado, foi possível dessa forma compor todas as etapas de um estágio relevante à pesquisa: a verificação experimental dos conceitos propostos na metodologia.



FIG.3.52 Amostra de argila calcinada produzida no IME.

Sendo assim, os dados provenientes de Santarém (PA), estão dispostos no capítulo que trata da aplicação da metodologia e todas as suas fases constituintes.

A FIG. 3.53 encerra o capítulo com um flagrante dos alunos do IME, juntamente com o comandante e oficiais do 8º Batalhão de Engenharia de Construção (8º BECnst), por ocasião da chegada à Santarém (PA).



FIG.3.53 Presença dos alunos do IME e oficiais do 8º BECnst na Operação Ricardo Franco II.

4 PROPOSTA METODOLÓGICA PARA A PRODUÇÃO E EMPREGO DE AGREGADOS DE ARGILA CALCINADA

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com base nas experiências dos projetos apresentados, nas proposições científicas externadas dos capítulos anteriores, e nos conhecimentos adquiridos das visitas realizadas, pode-se enfim estabelecer uma metodologia que define as etapas para a produção em escala industrial do agregado de argila calcinada.

Conforme foi explicado na introdução do trabalho, nesta proposta metodológica, de forma simplificada e didática, procurou-se conceber um roteiro operacional que propicie a alternativa de produção do agregado artificial de argila calcinada, ao técnico que esteja em processo de análise dos materiais de pavimentação a serem empregados em seu empreendimento viário.

Mais precisamente, se estiver em localidades de escassez de agregados naturais, ou nos casos de restrições ambientais à exploração das jazidas minerais rochosas, possa verificar a possibilidade de implantar e utilizar esta tecnologia no seu projeto local.

Traz então este capítulo, a estrutura da metodologia dividida em fases (subdivididas em etapas) de atuação. Ilustrado por um fluxograma principal, tem como característica a sugestão de soluções alternativas, já prevendo algumas situações a serem encontradas, caso alguma dessas fases encontre resposta negativa nos ensaios propostos.

Outro aspecto facilitador, é o de permitir uma avaliação preliminar da matéria-prima ainda nas proximidades da jazida, a partir dos parâmetros aqui estabelecidos.

4.2 ESTRUTURA DA METODOLOGIA

Em linhas gerais, a metodologia é composta de três fases, intimamente interligadas, que traduzem o desenvolvimento da tecnologia relacionada à produção do agregado de argila calcinada.

Para permitir melhor visualização e entendimento global de todos os estágios, a FIG. 4.1 traz um fluxograma representativo das três fases constituintes da metodologia proposta.

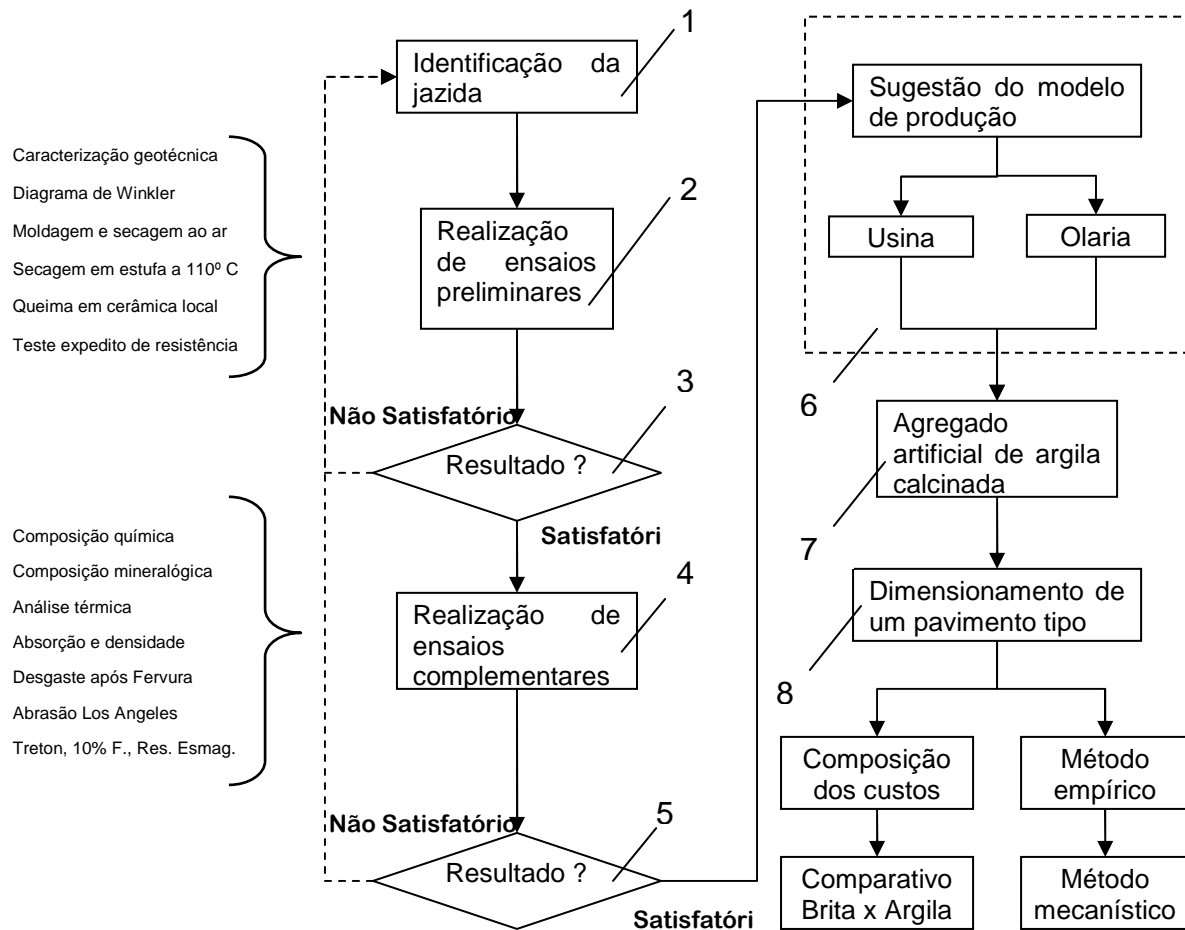


FIG.4.1 Fluxograma representativo da metodologia.

Na primeira fase, prescreve-se a caracterização criteriosa da matéria-prima, a fim de garantir a qualidade final do agregado de argila calcinada, iniciando um processo onde se pretende obter uma produção industrial otimizada.

Na segunda fase, é sugerida a forma de produção deste agregado e suas particularidades, destacando-se o fato de que os principais parâmetros do processo estão relacionados ao controle da umidade da matéria-prima empregada e da temperatura de queima.

De forma pioneira, apresenta-se também a possibilidade de se realizar esta etapa em uma unidade cerâmica convencional, reduzindo o aporte inicial de recursos, em comparação à opção de aquisição de uma usina pré-fabricada.

A terceira fase constitui-se na definição e uso do agregado de argila calcinada produzido, obedecendo às normas vigentes da mesma forma como é observado para o agregado natural, e atendendo as necessidades de emprego nas atividades da engenharia.

Conforme foi mencionado, as fases estão subdivididas em etapas. Cada uma destas fases (ou etapas) está indicada no fluxograma (FIG. 4.1) por uma numeração, facilitando sua identificação ao longo deste capítulo.

Exemplificando, a 1ª fase, está representada pelas suas etapas, numeradas de (1) à (5). O número (6), indica (em linha tracejada) toda a fase de produção propriamente dita (2ª fase), e será “ampliada” posteriormente, apresentando as suas etapas constituintes. O número (7) indica a etapa de expedição do agregado já produzido, e (8) representa a 3ª fase, de emprego do agregado de argila calcinada, em projetos de pavimentação, e conseqüentemente da comparação de custos com a aquisição do agregado proveniente de rochas.

4.3 1ª FASE DA METODOLOGIA

4.3.1 1ª FASE: ENSAIOS PRELIMINARES

Com relação à primeira fase, observa-se que as jazidas que contém a matéria-prima que atendem à produção de um agregado de argila calcinada satisfatório, são relativamente fáceis de serem encontradas e qualificadas.

De forma simplificada, a primeira fase relacionada à identificação da matéria-prima é subdividida em duas partes: ensaios preliminares (2) e ensaios complementares (4).

A etapa de ensaios preliminares (2), devido a sua simplicidade, pode ser executada em unidades ou laboratórios com poucos recursos tecnológicos, preferencialmente nas proximidades da jazida. Tais ensaios não atingem o nível químico/mineralógico da matéria-prima, o que por vezes acarreta que resultados positivos nesta etapa sofram alguma alteração na segunda etapa de ensaios complementares (4), tal como a necessidade de adição de um percentual de outro tipo de argila, ou outros procedimentos como a adição de determinados materiais, que levariam a uma mistura otimizada para a produção da argila calcinada.

Inicialmente, será necessário efetuar uma análise do solo que está sendo avaliado como possível de ser utilizado. Uma amostra representativa do solo da jazida que está sendo avaliada (1) é coletada, livre da camada de recobrimento vegetal e de matéria orgânica que não seja constituinte do solo, bastando para isso fazer uma limpeza superficial na jazida, de forma manual ou mecanizada, segundo procedimentos usuais em serviços de engenharia.

Esta coleta pode ser realizada da seguinte forma: obter aproximadamente, 50 kg de massa argilosa da jazida, realizando diversos furos numa distância entre os mesmos de aproximadamente 5 metros e profundidade mínima de 50 cm. Com uma pá, fazer uma homogeneização completa, espalhando o solo e dividindo em 4 partes iguais. Separar duas partes e descartá-las. As outras duas partes devem ser homogeneizadas. Repetir esse processo de homogeneização, até conseguir uma porção final de 20kg, que será a quantidade mínima necessária para a realização dos ensaios preliminares. Acondicionar a amostra em recipiente apropriado e codificá-la de acordo com a jazida e a localização dos furos.

Após a coleta, procede-se a caracterização do solo, segundo a execução dos seguintes ensaios (TAB. 4.1):

TAB.4.1 Ensaios preconizados para a etapa preliminar

DNER ME 041/94	Preparação de amostras para caracterização
DNER ME 051/94	Análise granulométrica
DNER ME 082/94	Determinação do limite de plasticidade
DNER ME 122/94	Determinação do limite de liquidez

Tais parâmetros já eliminam a possibilidade de estar utilizando um solo ou mistura argilosa que seja inadequada para prover um agregado de argila calcinada com qualidade satisfatória.

E esta é a razão, pela qual é sugerida a realização destes ensaios citados, em região próxima à localização da jazida, pela simplicidade de execução destes ensaios e rapidez com que é obtido o resultado, evitando assim o envio de amostras para um centro de tecnologia mais afastado.

Através de experimentos realizados (estudos anteriores no IME e a presente pesquisa), notou-se que os resultados apontavam para um agregado de argila calcinada com qualidade satisfatória quando estavam sendo empregados

preferencialmente solos argilosos plásticos, com granulometria fina, teor apreciável de matéria orgânica e que possam ser enquadrados com o auxílio do Diagrama de Winkler (FIG. 3.2).

Os valores da plasticidade e da granulometria que são especificados são os seguintes:

→ Para a plasticidade, são utilizadas argilas ou misturas argilosas que possuam índice de plasticidade (IP) superiores a 15%, valor este que é obtido da diferença entre o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP);

→ Com relação a granulometria, são estabelecidas regiões do Diagrama de Winkler para os quais a composição granulométrica é indicada, e conseqüentemente deve ser observada na matéria-prima.

Para melhor visualização dos percentuais que compõem o Diagrama de Winkler, basta rever os dados apresentados na TAB. 3.3, relativos a este enquadramento granulométrico.

A partir dos ensaios executados e do exposto na bibliografia, sugere-se que, a região “B” é a mais indicada, e simultaneamente de maior facilidade de ser encontrada. Ressalta-se ainda que para a região “A”, pode ser obtido um agregado de argila calcinada de melhor qualidade, mas o controle tecnológico durante a sua produção deverá ser mais rigoroso, principalmente no tocante ao controle de temperatura.

Para as regiões “C” e “D”, da mesma forma, consegue-se produzir agregado de argila calcinada de qualidade satisfatória, porém deverá ser necessário que se atinja uma temperatura mais elevada durante a queima, a fim de alcançar a qualidade obtida na faixa “B”. Em suma, colocando em uma escala preferencial, indica-se em primeiro lugar a região “B” e em seguida, as regiões “A”, “C” e por último a região “D”.

Ratifica-se então um advento desta metodologia em relação aos demais agregados artificiais, estudados durante o levantamento do estado da arte.

Embora solos argilosos com tais especificações sejam de fácil localização, geralmente encontrados em margens de rios, lagos ou várzeas; caso não sejam atingidos os valores especificados para a plasticidade e a granulometria do solo ou da mistura argilosa escolhida, eles podem ser corrigidos para serem enquadrados nas faixas especificadas.

Além disso, podem ser analisados os aspectos de custo de aquisição da matéria-prima proveniente das jazidas disponíveis, e assim compor uma mistura com a adição de outros materiais mais plásticos ou não-plásticos, que seja mais favorável financeiramente, ou buscar nova jazida que possa atender as faixas do diagrama citado.

Como considerações finais, são feitas sugestões a serem incorporadas ainda na etapa de ensaios preliminares (2), caso exista uma indústria cerâmica na região.

Por ocasião dos ensaios realizados na parte experimental da presente dissertação, foram testados em laboratório, diversos tipos de solos argilosos, provenientes da região norte.

Apesar de não constar em nenhuma norma estabelecida, foram “criados” alguns testes expeditos, na tentativa de prover ensaios capazes de serem executados na própria região, caso existam muitas jazidas a serem avaliadas, e assim poder analisar e qualificar em uma primeira instância a viabilidade da matéria-prima.

Estes testes seriam realizados na situação em que haja a disponibilidade de uma olaria local, e principalmente para aquelas em que não é observada a produção de telhas, ou seja, somente de tijolos, seja por motivos de indisponibilidade de equipamentos (prensa), ou até mesmo por indícios de que a matéria-prima disponível nas proximidades não tenha aplicabilidade para este fim.

Na impossibilidade de instrumentos para o controle da temperatura do forno, procurar a região interna do mesmo de maior calor, se possível, próximo a 900°C.

Com pequenas quantidades de amostras dos solos das jazidas em análise, promover: extrusão de pequenas barras maciças, a partir de adaptações nas boquilhas da máquina extrusora; secagem ao ar ou em unidade estufa; queima na temperatura próxima à 900°C/950°C, ou caso não atinja, a máxima que o forno puder prover; resfriamento natural das barras; exames “expeditos” da resistência mecânica destas barras, por intermédio de golpes com martelos ou marretas, tendo o cuidado em manter a mesma intensidade de força ao disparar os golpes.

Através de uma avaliação subjetiva, propor uma escala estimada de resistência mecânica, dentre as amostras analisadas, e classificá-las. Caso também haja disponibilidade, obter amostras dos agregados naturais da jazida mais próxima, ou seixos, e efetuar o mesmo teste expedito de resistência e enquadrá-los nesta “escala classificatória”.

4.3.2 1ª FASE: ENSAIOS COMPLEMENTARES

Passando por estes ensaios preliminares, e sendo satisfatórios os resultados, serão efetuados a seguir os ensaios complementares (4).

Como foi descrito, se por ocasião da análise preliminar, a matéria-prima de uma determinada jazida não mostrar resultados satisfatórios (3) ou considerando que a análise de custos indique não ser conveniente a adição de materiais mais plásticos ou não plásticos, deve-se optar pela procura de uma nova jazida de solo argiloso (1), sendo necessário passar novamente pela análise preliminar (2), seguindo os passos descritos anteriormente.

Sendo considerada satisfatória a matéria-prima, de acordo com as faixas especificadas, procede-se à fase de ensaios complementares (4) com a amostra proveniente da jazida em estudo, e para esta nova fase, deve-se tomar aproximadamente mais 100kg de solo da mesma jazida analisada para a elaboração de todos os ensaios complementares.

Nesta etapa, é dada ênfase à prospecção da mineralogia e da composição química presente nesta amostra. Já nesse ponto da metodologia, pode existir uma relativa dificuldade em se encontrar um centro de pesquisa na região que efetue todos os ensaios necessários.

Informações quanto à qualidade do agregado de argila calcinada que será produzido com esta matéria-prima também são obtidas durante esta etapa de ensaios complementares, através da execução de alguns ensaios preconizados por norma.

Completando a caracterização da matéria-prima, escolhida para a produção do agregado de argila calcinada, são realizadas as análises sobre as propriedades intrínsecas da mesma.

Nestas análises, são aplicados diversos conceitos inerentes a vários ramos da engenharia, mais especificamente da engenharia química e engenharia de materiais, conceitos estes que foram detalhados no capítulo anterior. Um exemplo desta característica multidisciplinar, são os ensaios de análise térmica que são indicados nesta etapa.

De acordo com as observações levadas a efeito, a partir dos diversos ensaios executados, foram estabelecidas faixas percentuais dos elementos químicos e da

mesma forma dos argilominerais que quando presentes na matéria-prima, são capazes de propiciar a obtenção do agregado de argila calcinada com qualidade satisfatória.

Ressalta-se que devido ao tipo de aparelhagem e método a ser efetuado na análise química, outros compostos poderão estar presentes em algum percentual, e desta forma, está sendo especificado que a matéria-prima contenha pelo menos, e não exclusivamente, as faixas indicadas na TAB. 4.2.

TAB.4.2 Faixas de especificação para a composição química de argilas adequadas para a produção de agregado artificial calcinado.

Perda ao fogo (%)	0,10 a 27,00
SiO ₂ (%)	15,0 a 77,8
Al ₂ O ₃ (%)	11,9 a 56,0
TiO ₂ (%)	0,01 a 3,5
Fe ₂ O ₃ (%)	0,08 a 9,62
CaO (%)	0,01 a 20,1
MgO (%)	0,10 a 16,3
Na ₂ O (%)	0,01 a 11,8
K ₂ O (%)	0,01 a 16,9

Também devido aos ensaios executados, e com base nas experiências advindas da bibliografia, foram estabelecidos que os argilominerais do grupo das ilitas, caulinitas e montmorilonitas e suas misturas entre si, apresentaram os melhores resultados no que se referem à qualidade do agregado de argila calcinada produzido, e desta forma, compõem as faixas de especificações ótimas da matéria-prima.

Da mesma forma que foi relatado para a análise química, a identificação dos argilominerais presentes na matéria-prima, também depende do método e do tipo de aparelhagem utilizada.

Sendo assim, estes argilominerais constituintes da matéria-prima, poderão estar sendo identificados com percentuais variados.

Tendo ciência de todos estes conceitos, métodos, e a partir dos resultados dos

experimentos realizados, está sendo especificado, que a matéria-prima deve conter pelo menos, de forma predominante, um dos três argilominerais citados (ilita, caulinita, ou montmorilonita), independentemente do percentual que esta predominância seja observada, para que seja obtido um agregado de argila calcinada com qualidade satisfatória.

Nesta ponto da metodologia, considera-se então caracterizada a matéria-prima. Porém, antes de avançar para a fase de produção (6) em larga escala do agregado de argila calcinada, são especificados ainda alguns ensaios para esta etapa (4), com o intuito de otimizar o processo de fabricação do agregado de argila calcinada, particularmente para a matéria-prima selecionada em cada caso.

Segundo o desenvolvimento dos estudos, ficou comprovado que após a caracterização (física, química e mineralógica), e aprovação da matéria-prima selecionada, tornou-se necessário estabelecer uma seqüência de ensaios que avaliasse o comportamento do agregado de argila calcinada, em relação a alguns parâmetros de resistência mecânica.

Concluindo a 1ª fase, promove-se então o estabelecimento de todos os parâmetros que subsidiam as variáveis do processo produtivo, tais como o formato em que seria extrusada a matéria-prima, umidade da matéria-prima antes da extrusão, comprimento e volume das peças conformadas, secagem das peças (incluindo o tempo e a temperatura de secagem), plano de queima das peças (incluindo o tempo e a temperatura de queima), resfriamento das peças, britagem e separação do agregado de argila calcinada produzido, em diversas granulometrias, a partir destas peças extrusadas e queimadas.

Sobre o plano de queima a ser efetuado, deve-se lembrar das argumentações trazidas no capítulo anterior, a respeito dos ensaios de análise térmica. A partir desta simulação, com pequenas amostras, obtêm-se respostas fidedignas sobre o comportamento da matéria-prima argilosa durante a queima.

Para a obtenção das respostas das outras variáveis, torna-se necessário a confecção de diversos corpos-de-prova, preferencialmente em laboratório de materiais cerâmicos, que possua uma máquina extrusora, capaz de compactar e conformar a matéria-prima.

Os ensaios para verificação dos corpos de prova, são aqueles usualmente empregados em agregados destinados à pavimentação, listados na TAB. 4.3:

TAB.4.3 Ensaios preconizados para a etapa complementar de teste de seleção de matéria-prima para produção de agregado artificial calcinado

DNER-ME 222/94	Agregado sintético fabricado com argila – desgaste por abrasão
DNER-ME 225/94	Agregado sintético de argila – determinação da perda de massa após fervura
DNER-ME 197/97	Agregados – determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos
DNER-ME 081/98	Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo
DNER-ME 096/98	Agregado graúdo – avaliação da resistência mecânica pelo método dos 10% de finos
DNER-ME 399/99	Agregados – determinação da perda ao choque no aparelho Treton

Esta máquina extrusora, também conhecida como “maromba”, irá propiciar a expulsão dos vazios incorporados à argila, preferencialmente por sistemas à vácuo, e sendo também facilitado este processo com a plasticidade atingida por esta matéria-prima.

A facilidade em se conformar peças por extrusão está relacionada com a plasticidade da massa utilizada e conseqüentemente com a quantidade de água adicionada à mistura argilosa.

A pressão de extrusão, verificada nos manômetros das extrusoras, representa a resistência que a massa está oferecendo para ser conformada. Experimentalmente, foi verificado que a adição de água reduz a pressão utilizada para se extrusar uma mesma massa, com teores de umidade diferentes, e ao mesmo tempo, existirá um teor de umidade máximo, onde a massa argilosa passará a atuar sob a forma líquida, inviabilizando a conformação da peça.

Estes teores mínimos e máximos de umidade são variáveis, dependendo das características da máquina extrusora empregada para este fim, e em geral estará compreendida entre a metade do Limite de Plasticidade (LP/2) até o próprio Limite de Plasticidade (LP), ou colocando em valores percentuais, de 5% a 40% em peso de água, em relação à massa de argila. Usualmente, verifica-se a utilização de LP/2.

Segundo ainda a evolução do estudo, ficou estabelecido que os formatos preferenciais de corpos de prova prismáticos, de seção retangular, ou hexagonal, proporcionaram após a etapa de britagem, a obtenção do agregado de argila calcinada com formatos adequados para pavimentação e praticamente idênticos aos observados aos agregados naturais provenientes da britagem de rochas.

A respeito do volume e comprimento destes corpos de prova, para esta etapa final dos ensaios complementares, devem ser moldados corpos prismáticos de dimensões próximas à 20mm x 20mm x 20mm.

Seguido à confecção destes corpos de prova, eles devem ser levados à secagem ao ar, por um período variando entre 12 à 48 horas, e após secos, levados à secagem em unidade estufa, sob a temperatura de 110°C, por mais 24 horas. Todo este procedimento visa a simulação do que será realizado durante a produção em escala industrial do agregado de argila calcinada da presente metodologia.

Completando as informações que irão subsidiar o planejamento da produção industrial, deverá ser elaborado um estudo acerca das temperaturas e tempo de queima destes corpos de prova, da seguinte forma: separar em conjuntos iguais de corpos de prova a serem queimados, capazes de comporem material suficiente, preferencialmente 10kg, para a execução dos 06 (seis) ensaios de verificação da qualidade do agregado de argila calcinada produzido em laboratório, já citados anteriormente na TAB. 4.3.

Para cada conjunto de corpos de prova, queimá-los separadamente, nas temperaturas de 800°C, 850°C, 900°C, 950°C, 1.000°C, 1.050°C, 1.100°C. Deixar um tempo mínimo de 30 a 45 minutos, na temperatura especificada como patamar superior, e resfriá-los gradualmente ainda dentro do forno. Os fornos empregados neste tipo de queima são fornos de uso corrente de laboratório, tipo “Mufla”, com capacidade para atingir temperaturas até 1.300° C, e preferencialmente com *timer* para desligamento automático.

Seguindo então os procedimentos prescritos nas normas listadas anteriormente, e a partir dos resultados obtidos para cada temperatura testada, é especificada a temperatura que será empregada na fase de produção em escala industrial.

Esta temperatura especificada será a mínima, na qual os resultados dos ensaios efetuados atendam as faixas, sugeridas por esta metodologia, na TAB. 4.4 a seguir:

TAB.4.4 Limites especificados dos resultados para os ensaios com corpos de prova da etapa complementar

Método	TÍTULO DO ENSAIO	Resultado (propostos pela metodologia)
DNER-ME 222/94	Agregado sintético fabricado com argila – desgaste por abrasão	Menor que 50%
DNER-ME 225/94	Agregado sintético de argila – determinação da perda de massa após fervura	Menor que 6%
DNER-ME 197/97	Agregados – determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos	Menor que 40%
DNER-ME 081/98	Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo	Absorção menor que 18%
DNER-ME 096/98	Agregado graúdo – avaliação da resistência mecânica pelo método dos 10% de finos	Maior que 60 kN
DNER-ME 399/99	Agregados – determinação da perda ao choque no aparelho Treton	Menor que 60%

Nos experimentos efetuados neste estudo, foram observadas gradativas diminuições da porosidade dos corpos de prova (e conseqüente aumento da resistência mecânica), com o aumento da temperatura de queima da matéria-prima argilosa. Simultaneamente, os resultados dos ensaios mecânicos também têm uma melhora significativa, comprovando a obtenção de um agregado de qualidade técnica ainda superior à medida que a temperatura de queima aumenta.

Conforme foi explicado no capítulo anterior, isto ocorre devido à formação de uma fase líquida de determinados elementos químicos fundentes presentes nos argilominerais, que quando atingem estas temperaturas mais elevadas, proporcionam maior densificação do agregado de argila calcinada, pelo preenchimento de alguns poros que não tenham sido preenchidos em temperaturas mais baixas.

Sendo assim, mesmo tendo sido observado que para uma determinada temperatura tenham sido atingidos os valores especificados nos ensaios listados, em face de uma análise de custo benefício, pode-se empregar uma temperatura mais elevada por ocasião da produção industrial, afim de que seja obtido um agregado de

argila calcinada com qualidade superior àquela atingida com a temperatura inicial.

Uma vez que o resultado dos ensaios preliminares e complementares efetuados com a matéria-prima argilosa proveniente da jazida em estudo estejam todos aprovados (5), considera-se concluída a 1ª fase, ou seja, a parte da metodologia que abrange a caracterização física, química e mineralógica capaz de indicar a matéria-prima necessária para a obtenção de agregado de argila calcinada.

Com fins didáticos, e para uma composição em médio prazo de uma boa base de dados da região, seria de grande relevância para o avanço desta tecnologia se houvesse a disponibilidade da formação de um cadastro das jazidas que porventura fossem analisadas, mesmo sendo aprovadas ou não, identificando-as em um mapa geológico da região, e anexando a este mapa, uma breve caracterização da região em estudo, assim como todos os resultados provenientes dos ensaios da 1ª fase da metodologia aqui proposta.

Como modelo para este cadastramento, podem ser tomados como exemplos os ANEXOS 01 à 05 desta dissertação, que foram elaborados para o Projeto Argila-Belém (ARANTES et al., 1972).

4.4 2ª FASE DA METODOLOGIA

4.4.1 2ª FASE: ESCOLHA DO MODELO E PRODUÇÃO INDUSTRIAL

A 2ª fase (6) da metodologia é relacionada à produção industrial do agregado de argila calcinada, e todas as etapas podem ser visualizadas por completo na FIG. 4.2.

Nesta metodologia, são sugeridas duas possibilidades de produção: usinas pré-fabricadas ou ainda em unidades de produção de peças cerâmicas convencionais (olarias).

Para esta última solução, existe conseqüentemente uma diminuição do aporte financeiro inicial necessário para operacionalizar a produção em escala industrial.

Caso seja optado por esta alternativa de produção em olaria, cabe notificar que todo o maquinário envolvido nas etapas listadas (9) à (21) é de conhecimento notório das indústrias cerâmicas ou das indústrias envolvidas com materiais de pavimentação, tais como usinas de misturas asfálticas, usinas de misturas solo-agregado e unidades de britagem de rochas.

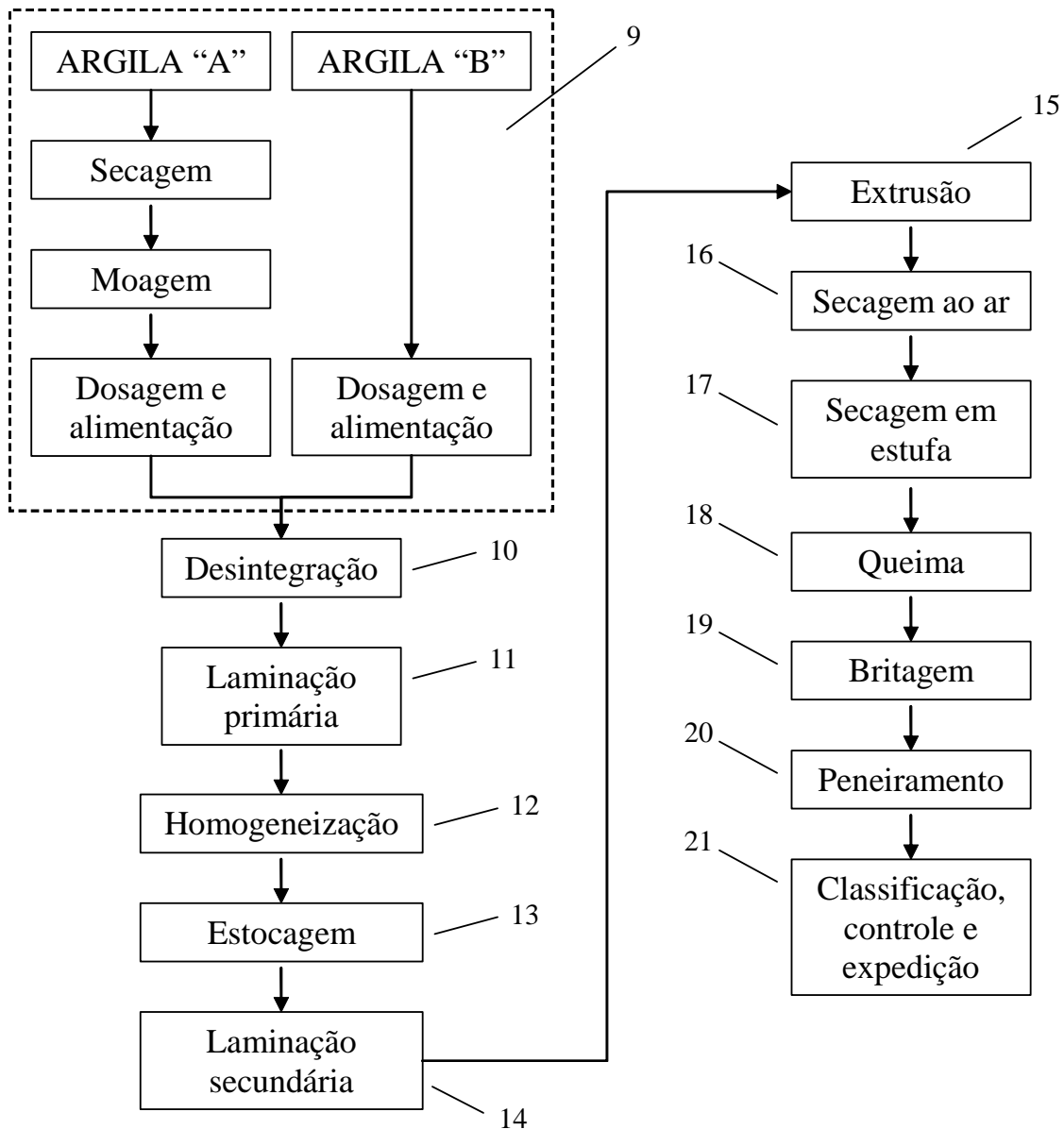


FIG.4.2 Etapas representativas da 2a fase da metodologia.

A fase de produção em questão consiste das etapas de: extração, preparação e dosagem da matéria-prima que será utilizada (9); desintegração (10); laminação primária (11); homogeneização (12); estocagem (13); laminação secundária (14); extrusão (15); secagem ao ar (16); secagem em estufa (17); queima (18); britagem (19); peneiramento (20) e expedição (21).

Retornando às jazidas que foram identificadas como aptas à obtenção do agregado de argila calcinada (1) à (5), são realizados os serviços de limpeza superficial na jazida, de forma manual ou mecanizada. Com o auxílio de equipamentos e veículos usuais em serviços de terraplanagem (tratores com

lâminas, pás carregadeiras, escavadeiras e caminhões basculantes) o solo argiloso é extraído e transportado, preferencialmente, para um local de maior proximidade da unidade de fabricação, onde deve ser destinado um pátio para estocagem da matéria-prima, preferencialmente coberto, para evitar o aumento da umidade natural da matéria-prima extraída.

Em determinadas situações, que não são obrigatórias (conforme já foi descrito na caracterização da matéria-prima), podem ser empregados dois tipos de materiais, que compreendem um solo argiloso com boa plasticidade, também chamado de “argila gorda” e aqui denominado de “Argila A” em (9), e outro material não plástico, também chamado de “argila magra”, e aqui denominado de “Argila B” em (9).

Devido a esta maior plasticidade da “Argila A”, são necessárias as etapas consecutivas de secagem e moagem do solo argiloso, uma vez que em sua forma natural quando encontrado em jazidas, geralmente possui alto teor de umidade, e elevada coesão, originando “blocos” que devem ser triturados para a mistura com o material não plástico, neste caso, a “ARGILA B”, que em geral, pode vir a dispensar estas etapas.

Seguindo então o processo produtivo, com base nos resultados dos estudos efetuados nos ensaios preliminares e complementares, deverá ser precisada a dosagem em que a mistura das argilas será efetuada, ou seja, os percentuais em peso de cada matéria-prima para compor a mistura argilosa correspondente ao padrão que foi estabelecido nos ensaios preliminares e complementares.

Assim como é efetuado em usinas de solo-agregado ou usinas de misturas asfálticas, esta mistura das argilas com dosagem conhecida pode ser efetuada ainda em pátio de estocagem, com o auxílio de equipamento pá carregadeira, para outro local em separado, protegido de chuvas e com boa ventilação.

De acordo com a experiência de alguns ceramistas, ficou comprovado que esta mistura argilosa processada de forma mecanizada, deverá apresentar um teor de umidade entre 10% a 30%, variação esta que será calibrada com o equipamento responsável pela extrusão da mistura argilosa.

Em casos particulares, instala-se um aparelho medidor de potência nesta extrusora, a fim de observar em que nível de solicitação a mesma está trabalhando, e se a mistura argilosa deve perder ou ganhar umidade para facilitar e diminuir a exigência na máquina extrusora.

Esta mistura vai alimentar preferencialmente silos metálicos ou de madeira, e por gravidade deve cair em correias transportadoras, vibratórias ou não, para chegar à unidade de desintegração (10). Esta unidade, formada por dois rolos (corrugados ou lisos), tem por finalidade executar a fragmentação dos blocos que ainda estejam remanescentes provenientes dos silos de alimentação, facilitando assim uma primeira homogeneização da mistura argilosa.

Novamente, após a desintegração, a mistura argilosa deve ser conduzida por correias transportadoras até o próximo passo, de laminação primária (11), que possui praticamente a mesma finalidade do passo anterior, ou seja, de reduzir os grumos formados pela massa argilosa, porém desta vez, sob a forma exclusiva de rolos lisos, com espaçamentos reduzidos, capazes de formar lâminas delgadas desta mistura argilosa, e de forma definitiva, igualar a dimensão dos grumos provenientes de cada tipo de argila empregada na mistura.

Através das correias transportadoras, deve-se levar estas lâminas geradas com a massa argilosa para a unidade homogeneizadora (12). Tal unidade composta por um recipiente que possua hélices em disposição helicoidal, em torno de um ou mais eixos posicionados de forma paralela ao maior comprimento deste recipiente, tem por finalidade homogeneizar definitivamente a massa argilosa, sem que haja a possibilidade de se distinguir visualmente na mistura, cada tipo de argila empregada antes desta etapa.

Há ainda nesta unidade, a adição de água, caso necessário conforme já explicado, para facilitar o processo de extrusão e evitar a sobrecarga no equipamento.

Caso haja excesso do teor de umidade, será necessário passar pelo passo de estocagem (13) novamente, e em local separado, identificado, ventilado e preferencialmente descoberto quando não houver ocorrência de chuvas, para que a mistura argilosa, cujo teor de umidade estará sendo monitorado, possa retornar ao processo produtivo e passar para o próximo passo (14) com teor de umidade mais adequado à extrusão.

A mistura argilosa, agora homogeneizada, retorna ao transporte por correias, e passa por um segundo e definitivo processo de laminação (14) da massa homogeneizada, para que a mistura entre de forma otimizada na máquina extrusora.

Finalmente, esta mistura já sob a forma de lâminas é despejada na extrusora

(15), também chamada de “maromba”, que pelo auxílio de processo de vácuo em seu interior, propicia a compressão da mistura argilosa contra boquilhas de saída que moldam e expõem as barras preparadas com esta matéria-prima.

Assim como foi estabelecido para a etapa de estudos laboratoriais, na confecção de corpos de prova, comprovou-se que para a fase de produção industrial, o formato preferencial de moldagem na máquina extrusora (15), são barras prismáticas de seções retangulares ou hexagonais, que propiciam após as etapas de queima, britagem e peneiramento, agregados de argila calcinada que apresentam índice de forma adequado para pavimentação.

As condições relativas ao volume e a conseqüente espessura destas barras estão relacionadas à dimensão e granulometria do agregado de argila calcinada que se deseja produzir. Desta forma, periodicamente, pode-se confeccionar e trocar as diversas boquilhas de saída da máquina extrusora, com dimensões variadas, proporcionando maior diversidade granulométrica de agregados produzidos. Os comprimentos destas barras podem variar de 20cm a 80cm de modo a facilitar o processo de britagem e adequação granulométrica.

Após a extrusão, estas barras, ainda intactas, são levadas para a secagem (16), colocadas em aparatos com formatos preferenciais de estantes, ao ar livre, ou em ambiente ventilado, coberto e protegido de chuvas, por um período variando de 12 a 48 horas, até que seja verificada toda a perda de água possível na temperatura ambiente.

Este processo sistemático e gradual da perda da umidade adicionada à mistura argilosa até a extrusão das barras, é levado a efeito no intuito de evitar a formação de tensões internas e trincas que causariam a conseqüente diminuição da resistência mecânica do agregado de argila a ser produzido.

O próximo passo vem a ser o processo de secagem das barras em uma unidade estufa (17). Esta etapa tem por objetivo, proporcionar a perda de toda a água que não tenha sido retirada por ocasião da secagem ao ar (16), mais especificamente, retirando toda a água adquirida durante o processo de moldagem das barras, e também da umidade natural da matéria-prima, sob a ação de calor, em temperaturas próximas a 110°C, por um período de no máximo 36 horas.

Ainda sobre a etapa de secagem em estufa (17), aponta-se para a possibilidade de se operacionalizar esta etapa com o aproveitamento e recuperação de gases

quentes, provenientes da etapa de queima subsequente (18). A partir de dispositivos de escape, através de chaminés, ou similares, esta temperatura de secagem em estufa pode ser obtida pelo direcionamento dos gases quentes provenientes do forno empregado na etapa de queima dos agregados (18), em uma unidade (pequeno galpão de alvenaria para o caso de uma olaria, ou caixa pré-fabricada para o caso de uma usina) disposta exclusivamente para este processo de secagem em estufa (17).

A etapa de queima (18) das barras moldadas e secas deve ser efetuada de forma a garantir uma produção eficiente e otimizada, variando entre 5 a 30 m³/h, dependendo do método utilizado (adaptação de uma olaria, ou usina pré-fabricada) e dos equipamentos utilizados.

Este processo de queima, que corresponde à etapa de calcinação do agregado, conforme os experimentos da presente dissertação, deverá ser efetuado de forma gradual, o que vem a ser facilmente aplicado às unidades de fabricação de peças cerâmicas, que já trabalham segundo este processo de aumento e controle de temperatura gradativamente com o tempo.

Para a opção de produção em usina, podem ser empregados os seguintes processos:

→ Disposição de fornos rotativos em série ou paralelo, com janelas de comunicação entre as câmaras e com temperaturas diferenciadas e crescentes, através de queimadores de chamas independentes para cada uma destas câmaras;

→ Disposição de forno rotativo de câmara única, onde seja efetuado o controle da temperatura de queima, sendo aumentado gradualmente até atingir a temperatura ideal de queima, e permanecer o tempo mínimo necessário neste patamar.

Para qualquer um dos casos escolhidos, as barras provenientes destas unidades, devem ser levadas para locais de resfriamento, ou até mesmo algum pátio de estocagem com as barras queimadas, onde possam ser resfriadas até atingirem temperaturas de manuseio.

Após este tempo, as barras estão prontas para serem encaminhadas à unidade de britagem (19) e separação granulométrica por peneiramento (20), através de jogos de peneiras de malhas comerciais e conhecidas, para atender a demanda desejada.

Concluindo a 2ª fase da metodologia, o produto obtido (7), sob a denominação de agregado artificial de argila calcinada, conforme os procedimentos descritos, independentemente dos equipamentos utilizados, será disposto de forma separada e identificada (21), em ambientes de estocagem ou em montes classificatórios de acordo com a abertura das peneiras empregadas na etapa anterior (20).

Através de uma programação periódica, amostras representativas deste agregado devem ser recolhidas para a realização de ensaios de garantia da sua qualidade (21).

Tais ensaios especificados para este fim, e suas faixas de aceitação, são os mesmos descritos por ocasião da etapa final dos ensaios complementares (4), de acordo com a TAB.4.4.

4.5 3ª FASE DA METODOLOGIA

A última fase do proposta metodológica (8) constitui-se basicamente do emprego do agregado produzido em projetos de pavimentação, e simultaneamente da análise comparativa dos custos envolvidos com esta produção, em relação à aquisição do agregado natural.

Esta é a fase da metodologia em que não será introduzida nenhuma nova conceituação teórica, sendo apenas observada a aplicação de práticas usuais de controle de custos, assim como das normas vigentes para o projeto ou execução dos serviços de pavimentação.

Por se tratar de um material de pavimentação que ainda é objeto de poucas pesquisas, existe a intenção de que sejam formulados novos métodos de aplicação em misturas asfálticas ou misturas solo-agregado.

Esta intenção ganha maior incentivo, principalmente pelos resultados atingidos na parte experimental da presente dissertação e que estão relatados no próximo capítulo. No último capítulo, estão apresentadas as sugestões de como poderiam ser orientadas estas novas formulações.

4.5.1 3ª FASE: ANÁLISE DE CUSTOS

Assim como em qualquer setor industrial/empresarial, o controle financeiro para

a redução de custos, também deve ser um objetivo da produção do agregado de argila calcinada.

Por ser um item de análise em que podem estar presentes diversas variáveis, não está sendo estabelecida nenhuma planilha-padrão por esta proposta de metodologia, ao entender que em cada caso, o empresário irá compor o controle ideal de acordo com as suas particularidades.

Uma sugestão de prováveis variáveis a serem observadas neste item, está listada a seguir:

- Folha de pagamento de pessoal;
- Indenização de jazida de matéria-prima (argila);
- Frete da matéria-prima (argila);
- Energia elétrica;
- Combustível para a queima;
- Manutenção dos equipamentos;
- Combustível para transporte;
- Encargos sociais;
- Propaganda;
- Peças;
- Telefonia;
- Material de escritório;
- Uniformes;
- Associação ou sindicatos;
- Médico do trabalho;
- Abastecimento de água;
- Transportes diversos;
- Outros diversos.

Os devidos cuidados devem ser tomados quanto ao período de coleta e fechamento contábil, assim como das unidades empregadas em cada item.

Como considerações finais, destacam-se alguns diferenciais de custos elaborados por MÁ S (2002), sobre oportunidades de redução de custo a serem implantadas em um processo produtivo cerâmico como este da metodologia proposta:

- Para reduzir as calorías gastas na etapa de secagem:

- a) reduzir, na medida do possível, o teor de água da massa na extrusão;
- b) utilizar secadores contínuos móveis;
- c) incorporar, na medida do possível, argilas “magras” que secam mais rapidamente.

→ Para reduzir as calorias gastas na etapa de queima:

- d) utilizar fornos contínuos de paredes refratárias;
- e) ampliar a indústria adicionando módulos de fornos contínuos, em vez de crescer adicionando fornos descontínuos;
- f) alimentar o forno com teores de água mais baixos;
- g) controlar o poder calorífico da fonte empregada (gás, lenha, serragem, etc);
- h) reduzir o excesso de ar no forno;
- i) testar combustíveis mais competitivos;
- j) utilizar coque com granulometria correta, em vez de óleo combustível;
- k) Empregar serragem misturada em grande escala, ao invés de lenha.

→ Para reduzir o uso ineficiente de pessoas e máquinas:

- l) eliminar operações de carga e descarga;
- m) eliminar movimentos para alimentação de combustível;
- n) "demitir kWh supérfluos": substituir ventiladores fixos por móveis;
- o) compartilhar ou substituir equipamentos caros que ficam parados, boa parte do seu tempo, como as escavadeiras.

4.5.2 3^A FASE: EMPREGO DO AGREGADO EM PAVIMENTAÇÃO

A última etapa da metodologia, que também encerra este capítulo, trata da aplicação do produto obtido como material de construção à engenharia, mais especificamente, em serviços de pavimentação.

Conforme já foi mencionado, neste estágio, bastará ao técnico que optou por esta alternativa de agregado no seu projeto viário, a execução das normas vigentes, ou com a evolução das pesquisas, a formulação e a utilização de normas específicas para este tipo de agregado artificial.

Sendo assim, a maior intenção em incluir esta etapa no desenvolvimento da metodologia, é a de proporcionar novos experimentos e resultados com esta tecnologia recente, principalmente por se tratar de um material que ainda não possui

normas específicas que levem em consideração as suas propriedades físico-químicas que o difere do agregado natural.

Adicionalmente, esta é a oportunidade de se obter respostas aos quesitos que ainda não foram apresentados por nenhum estudo até o presente momento: o uso deste agregado em misturas solo-agregado, e diminuição da porosidade e absorção deste agregado cerâmico, para diminuir a taxa de ligante da mistura asfáltica.

Desta forma, grande parte desta etapa está voltada para prover informações essenciais ao dimensionamento ou recuperação de pavimentos, de acordo com os métodos disponíveis atualmente.

Certamente, este é um assunto que seria merecedor de um capítulo adicional, devido a sua importância e diversidade teórica e científica envolvida.

Se por um lado julgou-se extremamente relevante compor uma razoável revisão teórica sobre as outras fases da metodologia e que ainda não haviam registros anteriores, entende-se também que uma revisão bibliográfica contemplando os métodos de dimensionamento e análise de pavimentos pudesse proporcionar uma leitura didaticamente mais completa.

Porém, este capítulo não foi elaborado para evitar um alongamento excessivo do texto, onde ressalta-se a grande variedade e o fácil acesso a diversas bibliografias que tratam sobre a mecânica dos pavimentos em geral, inclusive na própria instituição como por exemplo em BATISTA (2004).

Sendo assim, apenas uma introdução dos conceitos necessários está sendo relatada, para um melhor entendimento deste item, na ocasião da apresentação dos resultados que constam da aplicação da metodologia.

Quando na camada de revestimento do pavimento são utilizadas misturas asfálticas, independentemente do método de dimensionamento escolhido, deve-se lembrar que estas misturas são constituídas de ligante asfáltico e agregados, e têm o seu comportamento afetado tanto pelas propriedades individuais destes componentes quanto pela relação entre eles.

Os ligantes que podem ser de cimento asfáltico ou cimento asfáltico modificado (com a adição de modificadores como polímeros, por exemplo), atuam como elemento de ligação e agente impermeabilizante, “colando” os agregados e formando uma massa coesa. Os agregados, independente da fonte, método de processamento ou mineralogia, devem ser resistentes (duros e duráveis) e resistir à

aplicação de cargas repetidas (MOTTA et al., 1996).

A forma dos agregados é importante na determinação da resistência ao cisalhamento dos materiais. Agregados cúbicos de textura áspera proporcionam um maior inter-travamento do que agregados lisos e redondos (seixos rolados), ou seja, mesmo que ambos tenham a mesma dureza intrínseca, os cúbicos resultam em uma massa de material mais resistente ao cisalhamento. A resistência ao cisalhamento é de importância crítica para o concreto asfáltico. Os agregados arredondados, ao invés de se inter-travarem, tendem a deslizar uns sobre os outros (PINTO, 2003).

Conforme MEDINA (1997), os métodos de dimensionamento de pavimentos, introduzidos no Brasil na década de 50, baseiam-se na experiência americana. Desde então, os engenheiros brasileiros procuraram adaptar os parâmetros de projeto às nossas condições de solos e clima.

Nesse sentido, algumas pesquisas importantes foram conduzidas por órgãos públicos, porém, tendo como referência os procedimentos de ensaio dos métodos empíricos de origem estrangeira.

As pesquisas acadêmicas contribuíram decisivamente para a construção de um conhecimento bem fundamentado, na mecânica dos pavimentos, colocando-o à disposição dos engenheiros de pavimentação. Particularmente, na COPPE/UFRJ, tais estudos desenvolveram-se com ensaios dinâmicos de solos e materiais, aplicação do método dos elementos finitos e avaliação estrutural de pavimentos, desde o início da década de 70 (MEDINA, 1997).

Tendo em mente os pavimentos do modal rodoviário, BENEVIDES (2000) define que o enfoque sócio-econômico dado à questão de dimensionamento de estruturas de pavimentos objetiva definir as categorias de rodovias em função dos serviços prestados aos usuários, expressos pelos seguintes parâmetros:

→ Segurança da rodovia - relativa às boas condições de regularidade, drenagem e aderência;

→ Regularidade dos serviços – a manutenção da rodovia pode ocasionar interrupção do tráfego;

→ Conforto do usuário – tratamento visual, nível de ruído e boas condições da superfície de rolamento.

O dimensionamento de um pavimento tem como objetivo calcular e/ou verificar espessuras e compatibilizar os materiais de forma que a vida útil corresponda a um

certo número projetado de repetições de carga.

A vida útil é um grau inaceitável de deterioração, quer sob o aspecto estrutural, quer sob o aspecto funcional. O fissuramento generalizado do revestimento asfáltico indica o fim da sua vida útil (BENEVIDES, 2000).

Existem muitos métodos desenvolvidos para o dimensionamento de pavimentos, que diferem nas maneiras de abordar o problema. A seguir estão descritas as definições por PINTO e PREUSSLER (2002).

A tarefa de dimensionamento de pavimentos é de alto grau de dificuldade, devido à grande quantidade de variáveis de naturezas diversas. A consideração simultânea de tensões devidas ao tráfego, como fadiga e deformação permanente, as variáveis climáticas, como temperatura e umidade, a resistência do solo de fundação e dos materiais de construção disponíveis, a magnitude e a repetição das cargas de tráfego, a durabilidade do revestimento, são apenas alguns exemplos do porque dessa dificuldade.

Os métodos de dimensionamento progrediram através de várias etapas, e podem ser classificados basicamente em três grupos.

→ Métodos empíricos:

Os métodos empíricos são os que utilizam correlações entre um parâmetro mensurável, como por exemplo, a deflexão ou a capacidade de suporte do subleito, e a espessura, de modo a permitir que o desempenho do pavimento tenha sucesso ao suportar o volume de tráfego previsto;

→ Métodos Teóricos – Mecanísticos:

Os métodos teóricos tiveram nos últimos anos um desenvolvimento considerável. Correlacionam valores teóricos calculados de tensões e de deformações em alguns pontos da estrutura, com a vida útil prevista ou com o número de repetições do eixo padrão até o final da vida útil do pavimento;

→ Métodos Mecanísticos – Empíricos:

São baseados em modelos de previsão de desempenho do tipo mecanístico - empírico, através de observação de trechos experimentais concebidos.

A partir destes grupos, PINTO e PREUSSLER (2002) citam os principais métodos que são utilizados no Brasil para os pavimentos flexíveis: o método do DNER (empírico) e o método da resiliência (mecanístico). Em linhas gerais, ambos os métodos estão apresentados a seguir.

a) Método do DNER

O método tem como base o trabalho "Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume", de autoria de W. J. Turnbull, C.R. Foster e R.G. Ahlvin, do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE) e conclusões obtidas na pista experimental da AASHTO.

Relativamente aos materiais integrantes do pavimento, são adotados coeficientes de equivalência estrutural tomando por base os resultados obtidos na pista experimental da AASHTO, com modificações julgadas oportunas.

A capacidade de suporte do subleito e dos materiais constituintes do pavimento é definida pelo CBR, adotando-se o método de ensaio preconizado pelo DNER, em corpos-de-prova moldados em laboratório para as condições de massa específica aparente e umidade especificada para o serviço no campo e submetidos a embebição durante quatro dias.

O subleito e as diferentes camadas do pavimento devem ser compactadas de acordo com os valores fixados nas "Especificações Gerais", recomendando-se que, em nenhum caso, o grau de compactação deve ser inferior a 100% (PINTO e PREUSSLER, 2002).

O pavimento é dimensionado em função do número equivalente (N) de operações de um eixo tomado como padrão, durante o período de projeto escolhido e obtido a partir dos estudos de tráfego. Esse número equivalente "N", necessário ao dimensionamento é definido pelo número de repetições equivalentes de um eixo padrão de 8,2 t (18.000 lb ou 80 kN). Para a sua determinação, são considerados fatores relacionados com a composição do tráfego e referidos a cada categoria de veículos, definida em função da carga transportada e do número de eixos dos veículos.

Os trechos experimentais da AASHTO e do USACE, forneceram subsídios para o desenvolvimento de fatores de equivalência de carga para converter cargas variadas do tráfego em cargas equivalentes padronizadas (PINTO e PREUSSLER, 2002).

O dimensionamento é feito através do gráfico da FIG. 4.3, onde em função do N e do CBR do subleito é determinada a espessura total (H_m). As demais H_n e H_{20} são calculadas em relação aos respectivos CBR do reforço do subleito e da sub-base. As espessuras estão identificadas na FIG. 4.4.

As espessuras da base (B), sub-base (h_{20}) e reforço do subleito (h_n) são calculadas resolvendo as inequações:

$$R.K_R + B.K_B \geq H_{20}$$

$$R.K_R + B.K_B + h_{20}.K_S \geq H_n$$

$$R.K_R + B.K_B + h_{20}.K_S + h_n.K_{Ref} \geq H_m$$

Os coeficientes estruturais adotados (K), têm como referência o da base (K_B) igual a 1 e os demais são assim designados com os seguintes valores:

Revestimento – $K_R = 2,00$

Sub-base – $K_S = 0,77$

Reforço – $K_{Ref} = 0,71$

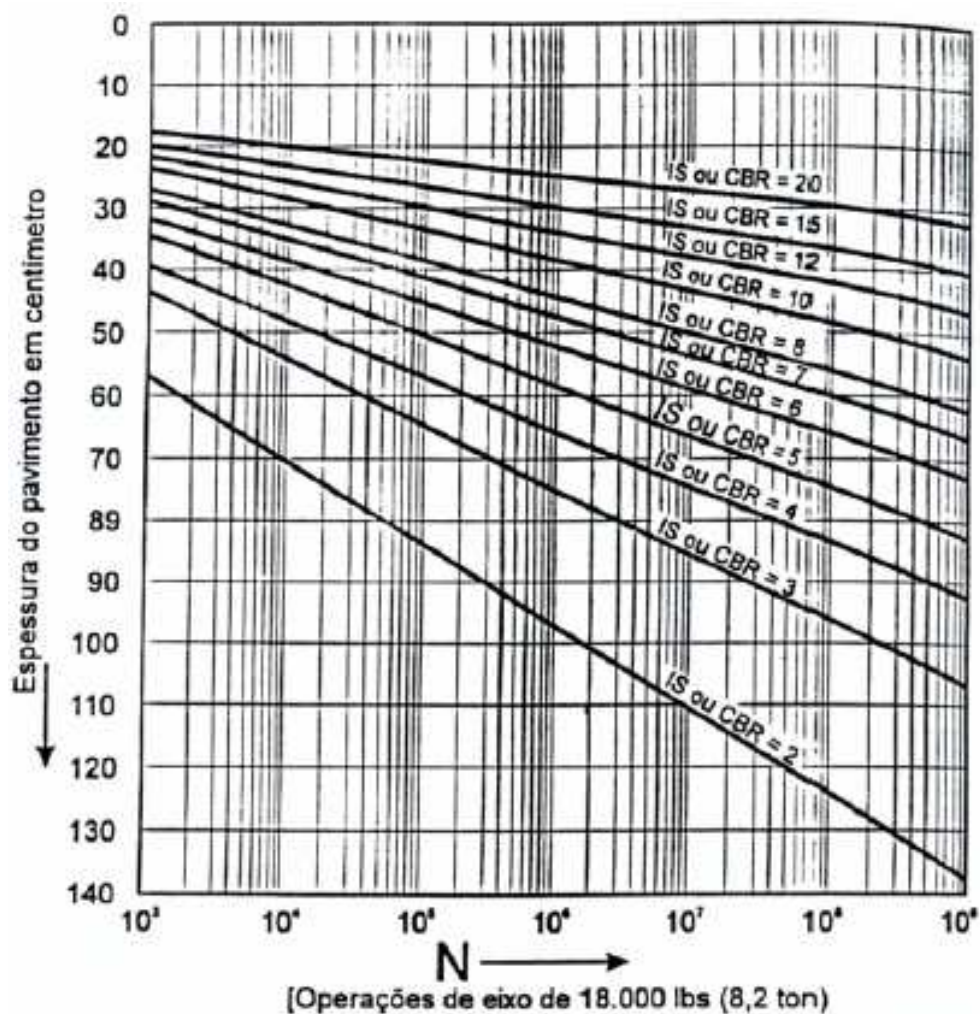


FIG.4.3 Determinação das espessuras em função do número "N" e do CBR – Método do DNER.

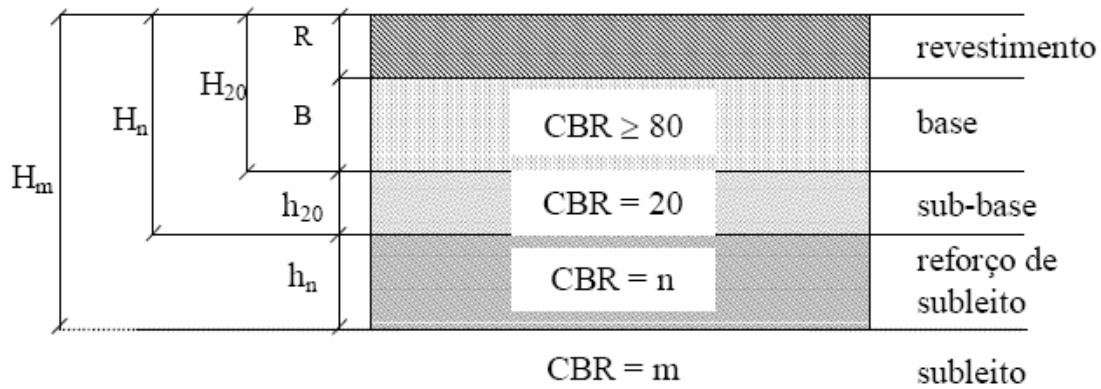


FIG.4.4 Identificação das espessuras – Método do DNER.

b) Método da resiliência

O método da resiliência, desenvolvido na COPPE/UFRJ pela Prof^a Laura M. G. da Motta em 1991 em sua tese de doutorado, tem como base o cálculo de tensões de deformações e de deslocamentos calcado em medidas das características dos materiais envolvidos, cargas e aspectos ambientais (BENEVIDES, 2000; PINTO e PREUSSLER, 2002).

O método objetiva proporcionar melhores parâmetros de projeto e uma consideração mais racional de dimensionamento, através da utilização de ensaios dinâmicos de caracterização dos materiais.

A variação de estruturas de pavimento e de novos materiais é permitida, diferente dos métodos empíricos que expressam características de outros países com outras condições climáticas e de materiais. O dimensionamento dos sistemas em camadas usando a teoria da elasticidade, possibilita a compatibilização das espessuras com as características dos materiais, podendo-se obter nos materiais disponíveis a melhor distribuição de tensões (BENEVIDES, 2000).

Os métodos mecanísticos englobam além dos ensaios dos materiais, os fatores ambientais, de tráfego, serventia e desempenho. O desempenho é a habilidade do pavimento de servir ao tráfego de forma satisfatória ao longo de um período de tempo, e a serventia determina, através de um índice, as condições de tráfego no pavimento em uma certa data.

Nos revestimentos, o método da COPPE/UFRJ utiliza o módulo resiliente ao invés da estabilidade Marshall usado no método empírico do DNER. Os ensaios de compressão diametral determinam os módulos resilientes (M_R) e a resistência à

tração estática (R_T), enquanto o número N admissível para o dimensionamento é obtido no ensaio de fadiga, fator determinante no fissuramento dos pavimentos brasileiros (BENEVIDES, 2000).

Para este método (FIG. 4.5), o programa FEPAVE (*Finite Element Analysis of Pavement*) pode ser utilizado, permitindo que em função dos módulos dos revestimentos, dos coeficientes K_1 e K_2 das equações de módulo de resiliência dos materiais componentes das outras camadas e do subleito, e das espessuras adotadas, seja verificado o dimensionamento.

Nos resultados de saída estão os valores de interesse no dimensionamento: deflexão (D), deformação específica de tração (ϵ_T), tensão vertical no subleito (σ_V), tensão de tração no revestimento (σ_T) e diferença de tensões no revestimento ($\Delta\sigma$, diferença entre a tensão radial de tração e a tensão vertical de compressão, do primeiro elemento sob a carga, na linha inferior do revestimento). A técnica proposta por Rosenblueth é aplicada, com o objetivo de permitir o cálculo automático do estado de tensões e de deformações, considerando a confiabilidade (C) (BENEVIDES, 2000; PINTO e PREUSSLER, 2002).

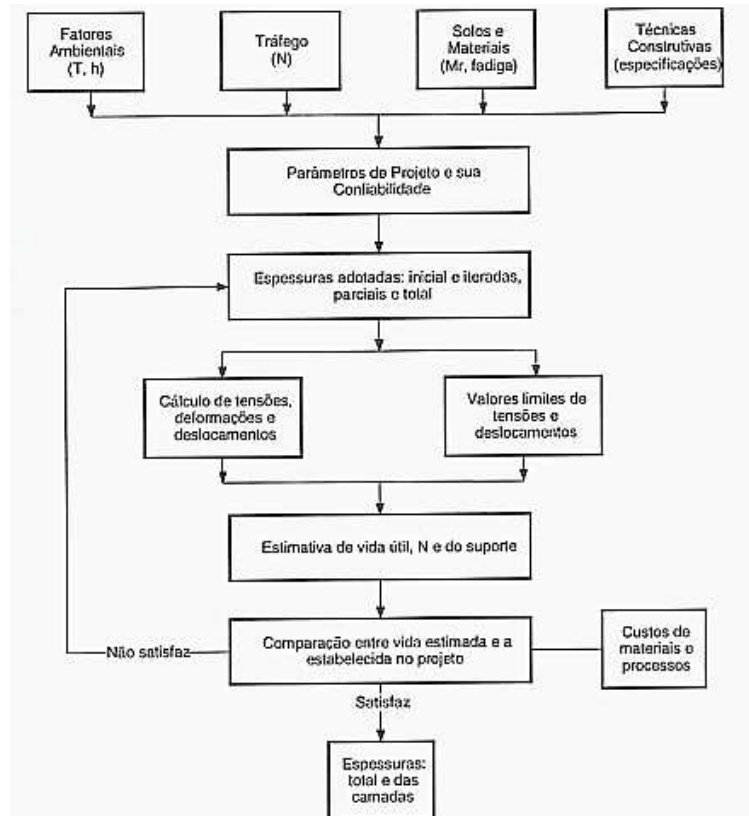


FIG.4.5 Fluxograma do método de dimensionamento da resiliência (MOTTA, 1991).

Atualmente, já está disponível uma versão do programa FEPAVE sob a forma de macro para planilha eletrônica, desenvolvido por Filipe Augusto C. de P. Franco, com uma interface muito simples e de fácil aprendizado pelo usuário. Algumas análises numéricas do próximo capítulo irão demonstrar a utilização deste programa.

Além do FEPAVE, diversos outros programas estão disponíveis para a realização do dimensionamento através dos modelos mecânicos. No Brasil, outro programa com freqüente registro de utilização é o ELSYM 5 (*Elastic Layered System*), que utiliza o método das diferenças finitas.

O ELSYM5 é um programa que foi desenvolvido na Universidade de Berkeley, Califórnia, EUA. Este modelo, tem como base as fórmulas teóricas generalizadas em 1943 por Burmister, admitindo até cinco camadas superpostas e permite o cálculo das tensões, deslocamentos e deformações para um sistema tridimensional de camadas elásticas. O programa fornece as tensões horizontais, verticais e de cisalhamento máximo, assim como as tensões principais em qualquer ponto do sistema. Os carregamentos são recebidos de uma ou mais cargas aplicadas uniformemente sobre uma área circular (até dez rodas simples), na superfície do sistema.

São utilizadas as coordenadas retangulares do sistema cartesiano XYZ, tendo como plano XY e $Z=0$, a parte superior onde as cargas são aplicadas, com o eixo Z estendendo-se verticalmente da superfície do sistema para baixo. As camadas são numeradas a partir do revestimento. O programa permite que ao se conhecer entre as cargas aplicadas dois dos três itens seguintes: cargas em kgf; tensão em kgf/cm^2 e o raio da área carregada em cm, calcular o terceiro.

Os materiais das camadas são homogêneos, isotrópicos e elásticos. As camadas são consideradas infinitas no sentido transversal, com profundidade finita e a camada inferior na horizontal e na vertical, infinita (ou presença de camada rígida).

Os dados de entrada são: carga, pressão dos pneus, nº de cargas, coordenadas (x, y) por carga, nº de camadas, espessura, coeficientes de Poisson e módulos de elasticidade de cada camada, posição na superfície (x, y) dos pontos de análise e a profundidade z destes pontos. Os dados de saída calculados por ponto, são: tensões normais, cisalhantes e principais; deslocamentos e deformações normais, cisalhantes e principais (BENEVIDES, 2000).

Para o dimensionamento através do método da resiliência, alguns parâmetros devem ser calculados basicamente em função do tráfego (número N) e das características do material presente no subleito.

Neste caso de dimensionamento mecânico isto se faz por verificação, ou seja, são calculadas e comparadas as tensões e deformações obtidas, com estas condições consideradas “limites” calculadas preliminarmente.

Para a verificação do número N em laboratório, deve ser analisada a vida de fadiga da mistura asfáltica que se está pretendendo utilizar.

A fadiga ocorre em função de um processo de deterioração da estrutura do material quando sofre a ação de cargas repetidas das rodas dos veículos, gerando tensões de tração na camada de revestimento betuminoso.

Os corpos de prova são moldados em laboratório de acordo com o método de Marshall, de forma cilíndrica, com dimensões aproximadas de 63 mm de altura e 100 mm de diâmetro.

O ensaio para estimar a vida de fadiga das misturas asfálticas consiste na determinação do número N de repetições da carga “F” que causa a ruptura do corpo-de-prova. A ação da força “F” gera tensões normais horizontais com valores de 10 a 50% da tensão de ruptura estática para misturas betuminosas. A amostra é submetida a cargas repetidas ao longo de duas geratrizes opostas de um cilindro reto através de um friso de carga.

O ensaio é realizado à tensão controlada (TC), ou seja, a carga aplicada se mantém constante e ocasiona acréscimo nas deformações resultantes no decorrer do ensaio. O ensaio com utilização da deformação controlada (DC) é mais complexo, sendo necessário um servo-mecanismo retroalimentador para que se possa ajustar a força aplicada em função de variações nas deformações.

Utiliza-se o ensaio de tensão controlada para pavimentos com camadas asfálticas rígidas em relação ao seu suporte, por possibilitar o controle das possíveis deformações ao resistirem às cargas aplicadas. Os de deformação controlada se aplicam mais aos pavimentos de revestimento delgado e fraco em relação à base (PINTO, 1991; BENEVIDES, 2000).

Tradicionalmente, a vida de fadiga expressa pelo número N de solicitações necessárias para a conclusão do ensaio, tem sido relacionada a um dos seguintes parâmetros conforme indicam os modelos a seguir:

$$N = K \times \left(\frac{1}{\sigma_T} \right)^n \quad \text{EQ. 4.1}$$

ou

$$N = K_1 \times \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{n_1} \quad \text{EQ. 4.2}$$

ou

$$N = K_2 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_2} \quad \text{EQ. 4.3}$$

ou

$$N = K_3 \times \left(\frac{\sigma_T}{\sigma_R} \right)^{n_3} \quad \text{EQ. 4.4}$$

onde:

N – número de repetições de carga necessárias à ruptura do corpo-de-prova (vida de fadiga);

σ_T – tensão de tração aplicada;

ε_i – deformação de tração;

$\Delta\sigma$ – diferença de tensões (entre tensão horizontal e vertical);

σ_R – resistência à ruptura estática do material;

K_i , n_i – parâmetros experimentais determinados a partir dos resultados dos ensaios.

Para o fator campo-laboratório é admitido um valor de 10^4 para ensaio de fadiga realizado à tensão controlada e à compressão diametral a 25°C (PINTO, 1991).

. Estes parâmetros majoram o N_f (vida de fadiga) obtido através de curvas em função das diferenças de tensões ou das deformações iniciais de tração, resultando no N admissível. O número N de projeto a ser comparado deve ter sido calculado com os fatores de equivalência do DNER (BENEVIDES, 2000).

Para a determinação dos outros parâmetros a serem pré-estabelecidos, a previsão da deformação permanente de forma indireta, pode ser considerada através de tensões verticais e deformações causadas pelas cargas aplicadas nos pavimentos.

A limitação da tensão vertical no topo do subleito é um critério bastante utilizado

devido ser a camada de menor resistência ao cisalhamento e, portanto, com aptidão para plastificação. HEUKELOM E KLOMP apud BATISTA (2004) indicam para pavimentos dimensionados pelo método do CBR, o modelo abaixo:

$$\sigma_{V_{ADM}} = \frac{0,006 \times M_R}{1 + (0,70 \times \log(N))} \quad \text{EQ. 4.5}$$

Para a determinação da deflexão máxima admissível pode-se adotar o modelo proposto em PINTO e PREUSSLER (2002):

$$\log(D_{ADM}) = 3,148 - 0,188 \times \log(N_p) \quad \text{EQ. 4.6}$$

De posse desses cálculos ditos “preliminares”, efetua-se enfim a análise da viabilidade técnica do pavimento em questão, ao serem lançadas as espessuras (por tentativa) pelo projetista, de posse das características dos materiais a serem empregados no seu empreendimento viário.

5 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Após a constatação dos diversos conceitos científicos e teóricos descritos na bibliografia referenciada, e da proposição de uma metodologia que venha a possibilitar de forma completa o entendimento e a possibilidade de aplicação de toda a tecnologia que está relacionada com o agregado artificial de argila calcinada, chega-se enfim à descrição dos resultados da parte experimental da presente dissertação.

Como se pode imaginar, esta foi a parte do estudo que exigiu a maior parte do tempo disponível, com diversas visitas a campo, inclusive em outros estados do país, ensaios em diversos tipos de laboratórios de grandes centros de pesquisa, e conseqüentemente a parte de todo um trabalho que mais contribui para o aprendizado durante a pesquisa, e que está sendo compartilhado através deste.

Deve-se então entender este capítulo, como uma verificação de toda a metodologia sugerida no capítulo anterior, ou seja, está sendo descrita uma breve caracterização da região em que foi feita a aplicação da metodologia e a seguir são mostrados os resultados dos ensaios realizados na 1^a e 2^a fase da metodologia proposta.

Com relação à 3^a fase, em que a metodologia sugere a fabricação do agregado, está sendo descrito como foi feita a primeira produção industrial (experimental) do agregado de argila calcinada que se tem registro, e consecutivamente, os custos originados com esta produção.

Por fim, são mostrados todos os ensaios elaborados com este agregado produzido especialmente para este estudo, desde a verificação da sua aplicabilidade em mistura do tipo solo-agregado, mistura asfáltica e alguns exemplos de como utilizá-lo em um pavimento típico da região em estudo.

Foi possível também esclarecer questões que ainda apresentavam dúvidas quanto à utilização deste tipo de agregado artificial, principalmente sobre as misturas asfálticas elaboradas com este produto, e da melhoria em relação à resistência mecânica, aproximando-se dos valores atingidos com o agregado natural.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE SANTARÉM (PA)

5.2.1 DADOS SÓCIO-ECONÔMICOS

Santarém, localizado no oeste paraense, foi elevada à categoria de cidade, em 24 de outubro de 1.848, e possui as seguintes características:

- altitude: 51 m;
- população: 186.518 habitantes, segundo o censo do IBGE de 2.000;
- área total: 24.422,5 km²;
- densidade demográfica: 9,90 hab/km².

Santarém está situada na foz do Rio Tapajós, em confluência com o maior rio em volume de água do mundo, o Rio Amazonas. Conta com uma temperatura média anual entre 25 a 28° C.

Santarém dista 703 Km de Belém e 595 Km de Manaus em linha reta. Com uma característica climática diferenciada do restante do estado, apresenta como dominante uma estação relativamente seca, mas compensada com chuvas abundantes nos demais períodos. Isso assegura a formação de floresta densas em Santarém, sinônimo de potencial madeireiro.

O acesso à Santarém pode ser por via fluvial (a partir de Belém), com embarcações de médio e grande porte, distando 1.526 km (ou 60 horas de navegação) através do Rio Amazonas; ou terrestre, através das rodovias federais e estaduais, BR-316, PA-140, PA-151, PA-256, PA-150, PA-263, BR-422, BR-230 (Transamazônica), BR-163 (Santarém-Cuiabá). Devido às precárias situações de grande parte desta malha rodoviária, o percurso pode ser realizado em 3 dias (no verão) ou 8 dias no inverno (período chuvoso).

A cidade vem alcançando desenvolvimento econômico acentuado na última década e constitui-se, atualmente, no mais importante centro comercial do Médio-Amazonas, registrando uma atuação industrial e agrícola em expansão, onde se destaca a produção de fibras e grãos, especialmente arroz e milho, borracha e mesmo madeira beneficiada. A extração da castanha-do-Pará e o pesca são importantes para a balança comercial do município. Esses fatores asseguram a Santarém a posição de 2^a cidade do estado em termos comercial, industrial e urbano, depois de Belém do Pará.

Um dos fatores que vem colocando o município em destaque nacional nos últimos anos, vem a ser a tão sonhada saída para o Atlântico norte através da conclusão da rodovia BR-163 Cuiabá – Santarém (FIG. 5.1), principalmente no intuito de baratear os custos do frete da soja que é plantada ao longo de toda a sua extensão, principalmente no norte do estado de Mato-Grosso. Este fato colocaria a produção nacional em enorme vantagem econômica em relação ao mercado exportador norte-americano, para o mercado consumidor europeu e asiático.

É neste intuito que Santarém, irá contribuir com o porto fluvial (FIG. 5.2) mais importante do país, e merecerá ainda mais destaque e investimentos, com a operacionalização da Rota 163, o que permitirá a integração norte/sul do Brasil.



FIG.5.1 BR-163 no estado do Pará em outubro de 2.004 (COMITÊ BR-163, 2004).



FIG.5.2 Porto de Santarém.

5.2.2 A QUESTÃO DOS MATERIAIS DE PAVIMENTAÇÃO NA REGIÃO

Geologicamente, Santarém situa-se de forma geral, em área de Formação Barreiras do período cretáceo - terciário, com predominância de arenitos finos e médios, siltitos e argilitos caulíníticos, vermelhos, amarelos e brancos, mal consolidados, possuindo horizontes de conglomerados e arenitos grosseiros, incluindo o arenito Manaus.

As faixas cretáceo - terciário sujeitas a clima quente e úmido, como o da região em exame, conduzem à morfologia de relevo maduro, onde são freqüentes as formas arredondadas com espessos mantos de sedimentação, prevendo cortes em solo sedimentar com possíveis instabilidades (8^o BECnst, 1978).

Materiais para aterros são abundantes e de boa qualidade. No que diz respeito à obtenção de materiais de construção existem graves restrições, principalmente quanto à quantidade e qualidade dos materiais necessários, tais como agregados graúdos.

Existe uma grande prática de emprego do seixo rolado como agregado na confecção do concreto de cimento Portland (FIG. 5.3) e esta escassez de agregados rochosos também afeta a engenharia viária local. Em entrevista pessoal, realizada em 06 de julho de 2.004, com o Secretário Municipal de Infra-Estrutura, Sr. Eládio Vasconcelos (SEMINF – Santarém – FIG. 5.4), houve a confirmação desta precariedade de materiais de pavimentação.

Segundo o Sr. Eládio, as soluções correntes como camadas de pavimentação fazem uso de solos lateríticos, por vezes até incorporados com cacos de produtos cerâmicos (FIG. 5.5) de rejeito das diversas olarias existentes, para prover alguma melhora na capacidade de suporte das vias municipais.

Como camada de revestimento, a grande maioria das vias é pavimentada com areia asfáltica usinada à quente – AAUQ (sem o emprego de fíler), prática essa que também é feita pelo próprio 8^o BECnst, que possui usinas próprias (FIG. 5.6) para a fabricação desta massa asfáltica. A vida útil destes revestimentos, no município, não consegue ser superior a 5 anos sem que haja alguma manutenção. A tentativa de incorporar fíler à massa asfáltica ocasionou relativa melhora na qualidade, porém o acréscimo de custo não foi aceito pelos usuários.

O único registro de utilização de concreto asfáltico com agregados rochosos é

observado na pista de pouso e decolagem do aeroporto de Santarém, uma vez que a jazida mais próxima da região, localizada em Monte Alegre (PA) é de propriedade da Aeronáutica. Os relatos confirmam que é inviável o transporte da brita, pelo modal rodoviário. Este frete é por via fluvial, e o custo final desta brita em Santarém chega até a R\$120,00/m³.

Com relação ao seixo, além da relativa insatisfação com seu uso como material de construção ou pavimentação, também se observa um elevado custo de aquisição, variando entre R\$85,00 até R\$117,00 segundo cotações no mercado local. Já existem limitações ambientais à sua comercialização, uma vez que este agregado em geral é proveniente da mineração em leito de rios.

Além da jazida de Monte Alegre, existe outro registro de jazida rochosa em Itaituba (PA), que curiosamente a origem do nome é Tupi, significando o "lugar dos pedregulhos". Existem porém sérias restrições ambientais à sua exploração, além da distância, de aproximadamente 400 km.

Ainda sobre o 8º BECnst, houve a visita a uma obra de pavimentação urbana (FIG. 5.7) para verificar no campo os materiais utilizados, mais especificamente, a respeito da camada de revestimento. Sobre a massa asfáltica praticada pelo 8º BECnst, dados da Seção Técnica indicam que o traço é formado com uma mistura de areias, sendo 60% de areia "grossa" e 40% de areia "fina"; cimento Portland como fíler; o ligante asfáltico utilizado é o CAP 20, e a taxa varia entre 8 a 10% em peso da mistura. A espessura mais comum, para vias municipais, é de 5 cm.



FIG.5.3 Agregado (seixo) utilizado como material de construção em Santarém.



FIG.5.4 Flagrante da visita à SEMINF em Santarém (PA).



FIG.5.5 Detalhe de depósito de cacos cerâmicos para uso em pavimentação.



FIG.5.6 Usina de asfalto do 8º BECnst para confecção do AAUQ.



FIG.5.7 Trecho de pavimentação urbana sendo executado pelo 8º BECnst.

5.2.3 O PÓLO CERÂMICO DE SANTARÉM

Assim como foi realizado para os pólos cerâmicos do estado do Rio de Janeiro, a viagem à região amazônica permitiu levantar dados sobre as jazidas de argila, as indústrias cerâmicas existentes e sua forma de trabalho, as tecnologias, equipamentos e combustíveis empregados.

Antes de ter conhecimento de que haveria esta oportunidade da visita à Santarém, já em dezembro de 2.003, por intermédio da Seção Técnica do 8º BECnst, foram enviados aproximadamente 345 kg de solos argilosos utilizados pelas olarias, para o desenvolvimento do presente estudo.

O interesse de a pesquisa ser voltada para Santarém, já foi explanada no item anterior com a deficiência dos agregados que foi constatada pessoalmente, adicionalmente ao fato de tentar prover uma solução a um dos Batalhões do Sistema de Engenharia de Construção do Exército Brasileiro, que experimenta a situação da carência de agregados naturais em suas obras de pavimentação.

Desta forma, no período da Operação Ricardo Franco II no município de Santarém, a intenção primária era a de levantar o maior número de dados possíveis para compor um pequeno cadastro sob os moldes do Projeto Argila-Belém, seguindo as sugestões dadas no final do item 4.3.2 (página 186). Simultaneamente, seriam feitas propostas de cooperação acadêmica aos produtores cerâmicos, para tentar obter uma produção experimental do agregado cerâmico em alguma das unidades, mesmo que à médio prazo.

Diversas visitas foram realizadas, e deve-se destacar a grande receptividade e acolhida de todos os empresários e ceramistas visitados, bem como o interesse em adquirir novos conhecimentos relativos à sua atividade industrial.

Como já era imaginado, grande parte das indústrias da região ainda operam com poucos recursos tecnológicos, empregando a lenha ou serragem como combustível, devido principalmente ao baixo custo e abundante quantidade de madeiras a poucos metros de distância. As empresas visitadas estão listadas na TAB. 5.1.

Como característica observada em grande parte das olarias que não dispõe de muitos recursos tecnológicos, ou até por falta de maior conhecimento na gestão cerâmica, foram notados grandes depósitos de peças inservíveis em cada uma dessas unidades (FIG. 5.8).

Em geral, foi notado que esta perda na produção era gerada pela ausência ou deficiência da etapa de secagem, já explicada nos capítulos anteriores. Também devido ao caráter de auxílio tecnológico da Operação Ricardo Franco, concebida pelo Instituto Militar de Engenharia, foram levadas algumas publicações técnicas sobre o segmento da cerâmica vermelha, que foram distribuídas aos ceramistas, bem como uma amostra do agregado de argila calcinada produzido em laboratório e repassadas diversas informações em auxílio à redução destas perdas observadas na produção (FIG. 3.52, 5.8 e 5.9).



FIG.5.8 Depósito de peças inservíveis e perdas da produção.



FIG.5.9 Flagrante da entrega de amostra de argila calcinada à empresário ceramista de Santarém.

TAB.5.1 Empresas cerâmicas visitadas em Santarém (PA)

Empresa	Matéria-prima utilizada	Peças produzidas
Cerâmica Tapajoara	Argila “gorda” + argila “magra”	Tijolos
Cerâmica Ciframa	Argila “gorda” + argila “magra”	Tijolos, blocos e telhas
Cerâmica Maicá	Argila “gorda” + argila “magra”	Tijolos
Telhas Santarém	Argila “gorda” + argila “magra”	Tijolos e telhas

Devido ao pouco tempo disponível nesta viagem, a contribuição em termos de base de dados de jazidas e empresas do setor não pode ser efetuada com uma razoável amostragem. Dessa forma, foi conseguido com o auxílio do CPRM um estudo que contemplava justamente essa prospecção de matéria-prima argilosa para

fins cerâmicos.

De acordo com NETO et al. (1997), o município de Santarém apresenta grande potencial em argilas. O trabalho referenciado, visou os depósitos que estão sendo explorados pelos ceramistas da região, estudando-se as suas características para a fabricação de tijolos maciços, tijolos furados e telhas.

As amostras em número de quinze (FIG. 5.10), coletadas nos depósitos das cerâmicas, foram enviadas para Belém para ensaios de verificação da possibilidade de seu emprego em cerâmica vermelha.

Onze locais de ocorrência de argilas (jazidas) foram amostrados. Para estas amostras, foram realizados apenas ensaios de caracterização preliminar, cujos resultados estão presentes no ANEXO 6.

A análise mineralógica foi realizada no Laboratório Central de Análises Mineraias da CPRM (LAMIN) e dividida em duas partes: a primeira é denominada de análise mineralógica global e foi obtida a partir do material pulverizado com preparação desorientada; a segunda parte, denominada de análise mineralógica para mineraias de argila, foi obtida por extração da fração fina (inferior a quatro micra) em meio aquoso, após duas horas de repouso da suspensão e orientação em lâminas delgadas, secas em estufa à 60°C. O resultado das duas partes está no ANEXO 7.

As conclusões do estudo revelam que dos depósitos alagados, destacam-se os de Arapemã e Bom Futuro, com material adequado para fabricação dos três produtos (tijolos maciços e furados e telhas). Entretanto, para o padrão de exigência do mercado local, considera-se que as amostras catalogadas como de uso possível, possam ser amplamente utilizadas, especialmente se misturadas com material de melhor qualidade, valorizando assim, os depósitos de Perequeté e Maicá.

Quanto aos depósitos de terra firme, todos situados na Formação Alter do Chão, destacam-se os depósitos de Cucurunã e São Braz, com material qualificado como de uso para tijolos furados e telhas. Aplica-se, aqui, o mesmo raciocínio anterior, potencializando seu emprego mais amplo nesse segmento industrial, especialmente se misturado a material de melhor qualidade.

As argilas da Formação Santarém, localizadas nos terrenos mais elevados da região, apesar de suas características plásticas, não são utilizadas na cerâmica local e não foi alvo do estudo (NETO et al., 1997).

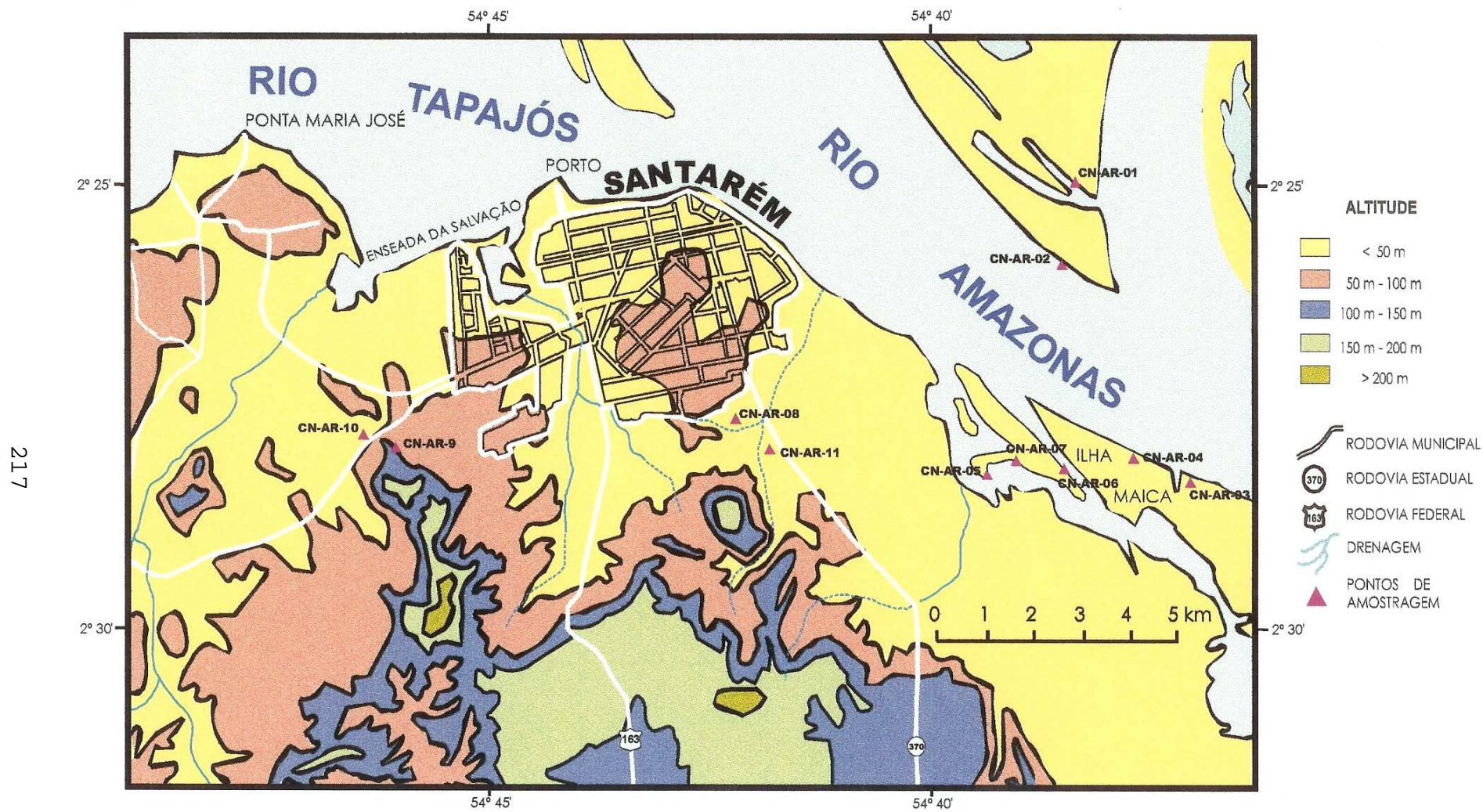


FIG.5.10 Pontos de amostragem de argilas em jazidas de Santarém (NETO et al., 1997).

5.3 1ª FASE: ENSAIOS REALIZADOS

5.3.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS PRELIMINARES

Após o recebimento de aproximadamente 345 kg de solos argilosos coletados em depósitos de olarias de Santarém, eles foram separados, pesados e identificados (FIG. 5.11) recebendo uma primeira desagregação manual, seguida de secagem ao ar (FIG. 5.12).



FIG.5.11 Pesagem e identificação das amostras de argila de Santarém.



FIG.5.12 Desagregação manual e secagem das argilas de Santarém.

Conforme pode ser notado na FIG. 5.12, foram enviados apenas dois tipos de solos: uma argila “gorda” escura (à esquerda) e outra argila “magra” clara (à direita). Sendo assim, estas argilas que inicialmente foram separadas em 10 amostras,

passaram a ser “denominadas” apenas em dois grupos, a saber:

- Amostra escura;
- Amostra clara.

Os resultados da caracterização destes solos estão na TAB. 5.2 segundo os limites da ABNT, para atender a primeira etapa da metodologia (ver TAB. 4.1).

Além das duas amostras de argilas, foi criada uma terceira amostra, que é a mistura das duas, com 50% em peso de cada argila. Tal representação visa elaborar uma mistura argilosa simulando o que é praticado nas olarias, e conseqüentemente, confeccionar o agregado de argila calcinada, com a mesma matéria-prima empregada nas indústrias de cerâmica vermelha de Santarém. Ela é dita sem adição, pois foram realizadas adições de materiais alternativos na seqüência dos ensaios, para verificar a diminuição da absorção.

Como informação adicional, deve-se ressaltar que essa prática observada em Santarém, além de tentar produzir uma matéria-prima otimizada, procura atender às questões de custo uma vez que a jazida de argila “gorda”, geralmente explorada no fundo dos rios, possui um custo mais elevado que a matéria prima argilosa “magra”.

Neste município, foi registrada uma diferença de custo que realmente justificava essa prática. A argila “magra” era adquirida a um custo que variava entre 67% até 20% do custo da argila mais plástica, conhecida como argila “gorda”. As fichas de caracterização dos solos, estão presentes no APÊNDICE 1.

TAB.5.2 Resultados da caracterização das amostras de Santarém (PA)

	Pedregulho (%)	Areia grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Faixa ABNT	> 4,8 (mm)	4,8 – 2,0 (mm)	2,0 – 0,42 (mm)	0,42 – 0,05 (mm)	0,05 – 0,005 (mm)	< 0,005 (mm)			
Amostra escura	0	0	0,35	13,77	12,82	73,06	59,8	30,6	29,2
Amostra clara	0,07	0,02	1,55	31,58	4,86	61,92	45,6	25,2	20,4
Mistura sem adição	0	0,04	1,39	27,45	8,30	62,82	44,7	22,7	22,0

Os dados da TAB.5.2 claramente mostram a alta plasticidade encontrada na amostra escura, e a redução da plasticidade provocada pela adição da amostra

clara. Em termos de retração e secagem esta adição vem a ser favorável, mas em contrapartida, pode ocasionar uma pequena redução na resistência mecânica do agregado a ser produzido.

Na TAB.5.3 e FIG.5.13 são apresentados os dados do enquadramento granulométrico segundo o Diagrama de Winkler.

TAB.5.3 Composição granulométrica das amostras de Santarém de acordo com o Diagrama de Winkler.

	Menor que 2 μm	2 a 20 μm	Maior que 20 μm
Amostra escura	65%	15%	20%
Amostra clara	53%	24%	23%
Mistura sem adição	50%	20%	30%

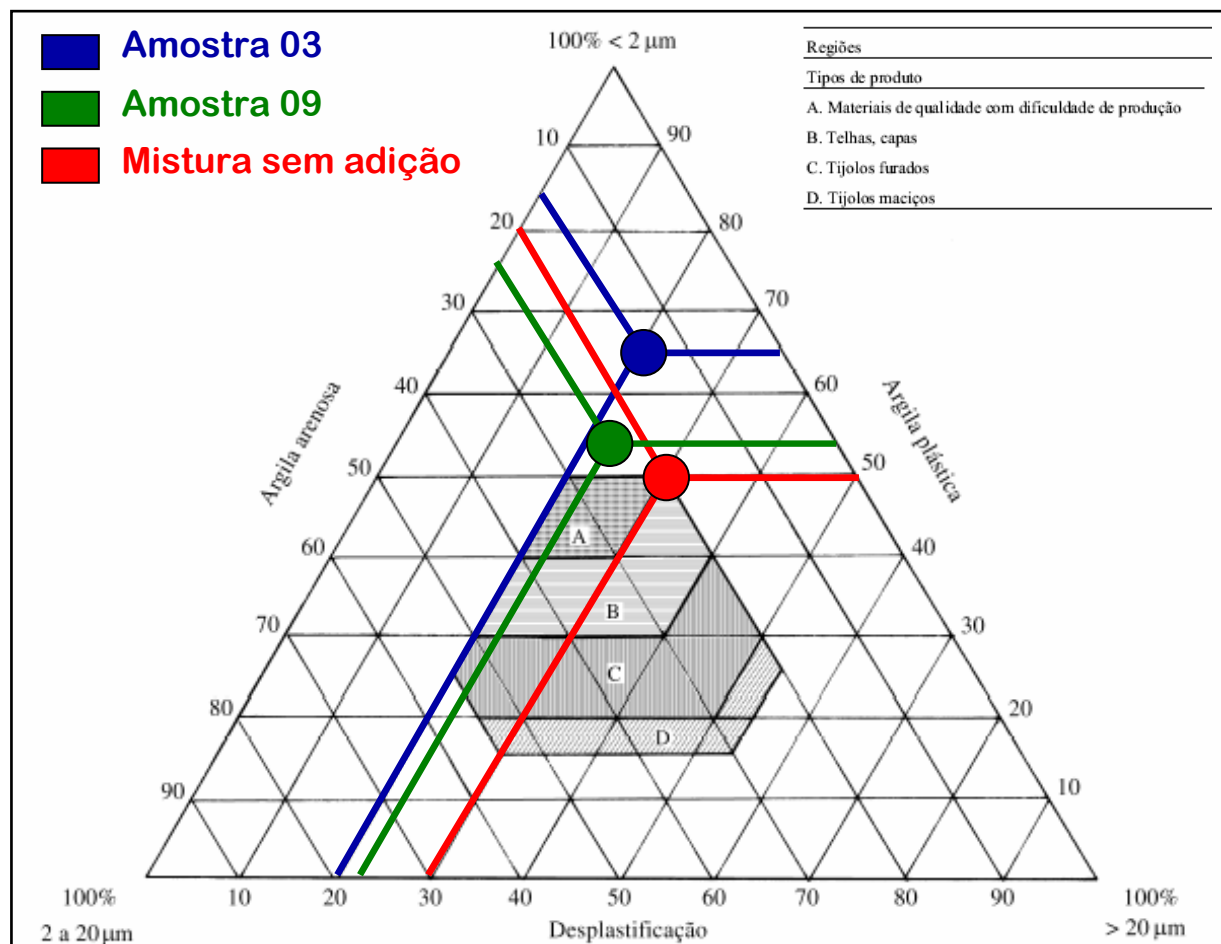


FIG.5.13 Desenho do diagrama com as amostras de argila de Santarém.

Verifica-se pelo diagrama que mesmo sem o conhecimento teórico, a prática do ceramista “posicionou” uma mistura “empírica”, proveniente de duas amostras com plasticidades e granulometrias diferentes, em uma região recomendada para a produção de telhas ou de materiais de maior qualidade.

Por outro lado, este processo de gestão “empírico” ocasiona o seguinte aspecto: deve-se lembrar que a mistura está situada em uma região em que para a produção de tijolos por exemplo, poderia haver uma adição em maior quantidade de argila “magra”, tanto para baratear os custos de produção e aquisição de matéria-prima, bem como para facilitar o processo de secagem e diminuir as perdas na produção que são extremamente acentuadas em diversas olarias da região.

Já para a produção do agregado de argila, acredita-se que esta seja uma posição extremamente satisfatória, uma vez que está sendo buscada a maior densificação possível do corpo cerâmico após a queima.

De posse desses resultados (IP > 15% e granulometria na região “B” e “A”) pode-se considerar a matéria-prima, neste caso, a mistura sem adição, como satisfatória nos ensaios preliminares, e as jazidas aptas para seguir para os ensaios complementares da 1ª Fase da metodologia.

5.3.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS COMPLEMENTARES

5.3.2.1 ANÁLISE QUÍMICA, MINERALÓGICA E TÉRMICA

Seguindo nos ensaios sugeridos para a 1ª Fase, parte-se agora para os ensaios das propriedades químicas e mineralógicas da matéria-prima selecionada e o seu comportamento térmico.

A análise química foi efetuada segundo dois métodos distintos, porém que encerram informações complementares e didaticamente, torna-se relevante disponibilizar os resultados provenientes de diferentes métodos.

Primeiramente, foram determinados os elementos químicos presentes na amostra, em aparelho de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de especificação Balzers Union FL-9496, sendo realizado no IME, no Departamento de Engenharia de Materiais (SE/4), e segundo o método da espectrometria de energia dispersiva de raios X (EDS).

O MEV é um equipamento capaz de produzir imagens de alta ampliação (até 300.000 vezes) e resolução. As imagens fornecidas pelo MEV possuem um caráter virtual, pois o que é visualizado no monitor do aparelho é a transcodificação da energia emitida pelos elétrons, ao contrário da radiação de luz a qual estamos habitualmente acostumados.

O princípio de funcionamento do MEV consiste na emissão de feixes de elétrons por um filamento capilar de tungstênio (eletrodo negativo), mediante a aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 a 30KV. Essa variação de voltagem permite a variação da aceleração dos elétrons, e também provoca o aquecimento do filamento. A parte positiva em relação ao filamento do microscópio (eletrodo positivo) atrai fortemente os elétrons gerados, resultando numa aceleração em direção ao eletrodo positivo. A correção do percurso dos feixes é realizada pelas lentes condensadoras que alinham os feixes em direção à abertura da objetiva. A objetiva ajusta o foco dos feixes de elétrons antes dos elétrons atingirem a amostra.

O EDS é um acessório essencial no estudo de caracterização microscópica de materiais. Quando o feixe de elétrons incide sobre um mineral, os elétrons mais externos dos átomos e os íons constituintes são excitados, mudando de níveis energéticos. Ao retornarem para sua posição inicial, liberam a energia adquirida a qual é emitida em comprimento de onda no espectro de raios-x. Um detector instalado na câmara de vácuo do MEV mede a energia associada a esse elétron. Como os elétrons de um determinado átomo possuem energias distintas, é possível, no ponto de incidência do feixe, determinar quais os elementos químicos estão presentes naquele local e assim identificar em instantes que mineral está sendo observado. O diâmetro reduzido do feixe permite a determinação da composição mineral em amostras de tamanhos muito reduzidos ($< 5 \mu\text{m}$), permitindo uma análise quase que pontual.

Dessa forma, este é um método de análise qualitativa e semi-quantitativa, com amostras de pequena dimensão. A FIG. 5.14 ilustra a preparação das amostras, e a FIG 5.15 revela a execução do ensaio no equipamento do IME.

Como informação adicional, explica-se que na seqüência da FIG. 5.14 (foto inferior à direita) está ocorrendo uma deposição de ouro em equipamento específico, para possibilitar o fluxo dos elétrons do feixe principal para o porta-amostras, e assim promover a determinação da composição química descrita acima.



FIG.5.14 Seqüência da preparação das amostras para o ensaio EDS.



FIG.5.15 Execução do ensaio EDS no equipamento MEV do IME.

A outra forma de análise química foi efetuada segundo o método da fluorescência, que é um método com maior representatividade da amostra a ser analisada, sendo então considerada uma análise qualitativa e também semi-quantitativa, porém mais precisa.

A análise por este método foi realizada em um espectrômetro de fluorescência

de raios-X Philips PW-2400, com tubo de Rh, no Laboratório de Fluorescência de Raios-X do Instituto de Geologia da UFRJ. O software utilizado para as análises semi-quantitativas foi o SemiQ, desenvolvido pela Philips. A perda ao fogo foi determinada através da obtenção do peso da amostra antes e depois da mesma ser levada a 950°C por meia hora.

Os elementos foram detectados a partir da fusão de 1,0g de pó, de cada amostra, misturada com 7g de fundente tetraborato de lítio. As condições analíticas para a dosagem dos elementos presentes nas amostras foram:

- detectores selado e de fluxo;
- cristais analisadores PET, Ge, PXI, PX3 e L1F200;
- potência do tubo 24 Kv e 90 mA ou 50 Kv e 50 mA, dependendo do elemento químico a ser detectado.

A TAB. 5.4 traz os resultados dos dois métodos utilizados no presente estudo, bem como os valores sugeridos da presente metodologia (ver TAB. 4.2).

TAB.5.4 Composição química pelos métodos EDS e Fluorescência

	P.F. (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)
Limite inferior da metodologia proposta	0,10	15,00	11,90	0,08	0,01	0,01	0,10	0,01	0,01
Mistura (EDS)	-	65,02	26,18	8,79	-	-	-	-	-
Mistura (Fluorescência)	9,92	57,26	25,96	3,60	0,19	1,08	-	-	0,92
Limite superior da metodologia proposta	27,00	77,80	56,00	9,62	20,10	3,50	16,30	11,80	16,9

Observa-se que foram atendidas todas as faixas especificadas na metodologia, com uma boa margem de folga, apesar de ocorrer uma relativa dispersão de valores entre os métodos de análise principalmente para o Fe₂O₃, o que já era esperado, devido ao exposto anteriormente neste item. O relatório do ensaio EDS e o respectivo difratograma estão presentes no APÊNDICE 2.

A análise dos argilominerais presentes na matéria-prima foi efetuada através da

técnica de difração de raios-X, utilizando um equipamento Philips Norelco no Laboratório de Fluorescência de Raios-X do Instituto de Geologia da UFRJ. O ensaio foi realizado através do método do pó, colocando a amostra em uma lâmina e tubo de cobre na intensidade da 40 kv e 20mA na velocidade de 1º/minuto.

Os difratogramas que revelam os argilominerais presentes nas amostras (TAB. 5.5), estão também ilustrados no APÊNDICE 2. Para melhor entendimento da mineralogia da amostra preparada para o estudo (mistura sem adição), são também apresentados os difratogramas das argilas que a originaram.

TAB.5.5 Argilominerais presentes nas amostras provenientes de Santarém

Amostra	Argilominerais presentes	Argilomineral predominante
Amostra clara	Caulinita, Ilita ou Quartzo	Caulinita
Amostra escura	Caulinita e Ilita	Ilita
Mistura sem adição	Caulinita e Ilita	Caulinita

Além de estar de acordo com as proposições da metodologia, conforme o que fora encontrado na bibliografia sobre o assunto, a mistura dos dois tipos de argila apresenta os argilominerais mais propensos à formação de um agregado cerâmico em que a atuação dos elementos fundentes possa diminuir a porosidade e a absorção do agregado de argila calcinada.

Já sendo considerada praticamente satisfatória a matéria-prima escolhida, na realização do último ensaio sobre as propriedades intrínsecas da argila (análise térmica), embora também sirva para a identificação dos argilominerais, se inicia a busca de informações sobre o futuro plano de queima a ser adotado na fabricação, através da verificação do comportamento desta argila sob tratamento térmico.

Inicialmente os ensaios foram confeccionados no Departamento de Engenharia Química do IME (SE/5), porém devido a algumas aferições necessárias a serem efetuadas nos equipamentos, não houve grande confiabilidade na precisão dos resultados obtidos. Mesmo assim, deve ser feita referência à disponibilidade de pessoal especializado sobre o assunto e dos equipamentos (FIG. 5.16) existentes para a realização desta etapa no IME.

Alternativamente, os ensaio de análise térmica diferencial e análise termogravimétrica, foram então realizados na Escola de Química da UFRJ

(UFRJ/EQ), sob a orientação do Prof. Dweck. Cabe citar que caso existam informações sobre a composição química e dos argilominerais, são de grande valia para a interpretação dos resultados provenientes da análise térmica.



FIG.5.16 Ensaio de análise térmica no IME: pesagem da amostra (acima); conjunto de equipamentos para ATD/ATG (centro); execução do ensaio de ATD (abaixo).

O resultado (FIG. 5.17) e a interpretação dos ensaios de análise térmica realizados na UFRJ/EQ, estão mostrados a seguir:

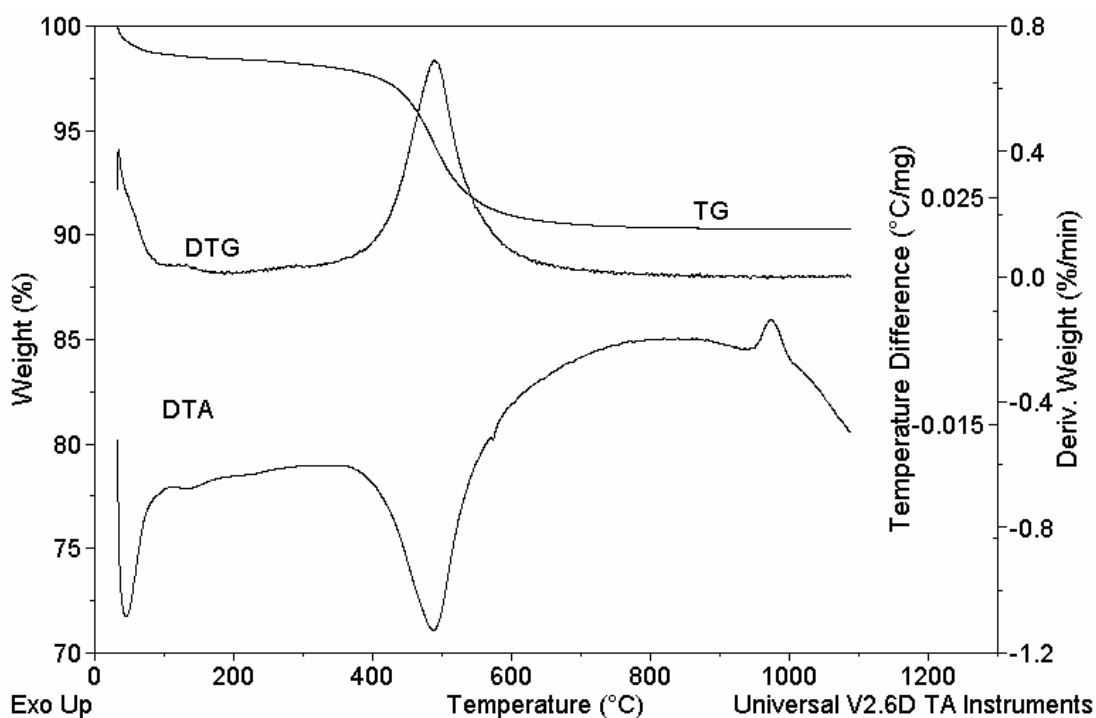


FIG.5.17 Curvas da análise térmica diferencial e termogravimétrica.

A figura acima apresenta a curva termogravimétrica (TG), derivada termogravimétrica (DTG) e de análise térmica diferencial (DTA) da mistura contendo 50% de cada tipo de argila proveniente de Santarém.

As análises foram feitas em equipamento de análises simultâneas TG/DTA da TA Instruments Modelo 2960, utilizando uma taxa de aquecimento de 10°C/min, desde 30°C até 1.100°C, utilizando uma vazão de 100ml/min de ar como gás de purga.

Para a obtenção da curva DTA, utilizou-se alfa alumina como amostra de referência. Por convenção do software do equipamento, picos representativos de perdas de massa na curva DTG são voltados para cima e na curva DTA, transformações exotérmicas são caracterizadas por picos para cima, e as endotérmicas, para baixo.

Observa-se inicialmente uma perda de 1,38% da massa inicial até 100°C, devida à liberação de água livre e/ou adsorvida nos poros, caracterizada por um pico DTA bem agudo endotérmico em cuja parte final começa um pico DTA menor endotérmico que termina por volta de 180°C, provavelmente devido à perda de água de hidratação de cátions retidos no espaço interlamelar das argilas.

Pela curva TG observa-se continuidade na pequena taxa de perda de massa até

aproximadamente 360°C, provavelmente devida à desidratação de outros minerais hidratados presentes. Entre 360°C e 800°C, ocorre a desidroxilação das argilas, caracterizada por uma perda de 7,65% da massa inicial de amostra nesse intervalo, e um pico DTA endotérmico. O pequeno pico endotérmico superposto que ocorre a 573 °C deve-se à transformação de quartzo alfa em beta. O pico exotérmico que ocorre entre 950°C e 1005°C, é decorrente da cristalização de mulita.

Dois fatos merecem especial destaque nesta análise:

→ esta cristalização da mulita, ocorrendo justamente no patamar da temperatura que se pretende efetuar a queima do agregado de argila calcinada, vem propiciar uma fase líquida que favorece a maior densificação do corpo cerâmico a ser produzido. Caso haja a possibilidade no forno a ser empregado, se a temperatura de trabalho for imediatamente superior a esta cristalização (1.006°C), será observado o maior preenchimento possível dos poros do agregado cerâmico;

→ deve-se salientar o que ocorre com as curvas termogravimétrica (TG) e derivada termogravimétrica (DTG), na temperatura de aproximadamente 500°C, ou seja, a perda de massa é praticamente irrelevante e este fato pode vir a acelerar o processo de queima na fase de produção, após a passagem por esta temperatura, tendo em vista que não seriam ocasionadas trincas ou tensões internas ao agregado. Além de ter sido comprovada como satisfatória para a produção do agregado de argila calcinada, fortuitamente, está sendo utilizada uma massa argilosa amplamente favorável à produção de corpos cerâmicos de alta qualidade.

Ainda nesta fase da metodologia, por ocasião da etapa de ensaios com os corpos de prova, será comprovado este comportamento da análise térmica, através das respostas obtidas nos ensaios de absorção e porosidade em temperaturas próximas a 1.000°C.

5.3.2.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS COM AGREGADOS (CORPOS DE PROVA) PRODUZIDOS EM LABORATÓRIO

Finalizando a aplicação da 1ª Fase da metodologia, são mostrados os resultados dos ensaios que atestam o desempenho do agregado que irá ser fabricado com esta matéria-prima que está sendo avaliada, através da simulação da “fabricação” do agregado de argila calcinada em escala reduzida de laboratório.

Para a confecção destes “agregados” em laboratório, ou como foram denominados na metodologia, “corpos de prova”, a seqüência operacional foi a seguinte (FIG. 5.18):

→ Destorroamento das amostras, até atingir uma determinada dimensão que permitisse a homogeneização e preparação da mistura composta pelas amostras clara e escura, com 50% em peso de cada. A extrusora de laboratório possui um acessório que efetua uma laminação primária, e foi utilizada neste estudo;

→ Adição de água, até atingir uma plasticidade capaz de propiciar uma extrusão otimizada na máquina extrusora de laboratório;

→ Moldagem de barras com seção hexagonal, e corte dos “agregados” com espessura variando entre 1 a 2cm. Foi também efetuada a moldagem de outras barras, também hexagonais, porém com seção de menor área para que houvesse uma variação na granulometria dos “agregados” a serem produzidos, tendo em vista as especificações de alguns métodos de ensaio;

→ Secagem ao ar por um período mínimo de 12 horas, dependendo da quantidade de água adicionada (anterior à extrusão) e da temperatura ambiente;

→ Secagem em estufa um período mínimo de 24 horas;

→ Após a secagem, calcinação em forno tipo mufla, desde a temperatura ambiente até a temperatura desejada, e permanecendo neste patamar por 35 minutos. Após este tempo, resfriamento dos “agregados” produzidos, dentro do próprio forno até uma temperatura que permita o manuseio e a retirada em um recipiente metálico;

Inicialmente, para a escolha da temperatura de trabalho, foram produzidos diversos “agregados” nas temperaturas de 800°C, 850°C, 900°C, 950°C e 1.000°C. Foi escolhido o ensaio de desgaste após fervura (DNER-ME 225/94) para a seleção da temperatura mais “econômica” que proporcionasse um agregado de qualidade satisfatória.

De acordo com os resultados (TAB. 5.6), a temperatura de 900°C foi escolhida por apresentar um reduzido percentual de desgaste; os desgastes atingidos por temperaturas superiores não apresentaram uma acentuada diferença, e principalmente, pelo fato desta temperatura ser praticada em fornos de olarias.



FIG.5.18 Seqüência para produção dos corpos de prova: máquina extrusora do IME, laminação, massa plástica, extrusão e moldagem, queima, corpos de prova.

TAB.5.6 Escolha da temperatura de trabalho para a produção do agregado

Temperatura	Tempo de queima	Perda de massa após fervura	Limite máximo
800°C	35 min	5,8%	6,0%
850°C	35 min	3,8%	
900°C	35 min	2,1%	
950°C	35 min	1,6%	
1.000°C	35 min	1,5%	

Sendo adotada esta temperatura de 900°C, seguiram-se os ensaios de verificação da resistência mecânica, com a produção de agregados de acordo com as quantidades e granulometrias necessárias a atender as normas listadas na TAB. 4.4. pela metodologia proposta.

Aproveitando esta série de ensaios a ser realizada conforme sugere a metodologia, foi vislumbrada a possibilidade de obter uma comparação do agregado de argila calcinada, com um agregado natural de origem rochosa. Dessa forma, houve a aquisição de uma amostra representativa de brita comercial de jazida do estado do Rio de Janeiro (em granulometrias diversas) que é convencionalmente utilizada em misturas asfálticas e concreto de cimento Portland desta região.

Os resultados dos ensaios realizados estão dispostos na TAB. 5.7. A título ilustrativo, seguem algumas fotos representativas desta série de ensaios com os agregados selecionados (FIG. 5.19, FIG. 5.20, FIG. 5.21, FIG. 5.22).

TAB.5.7 Resultados dos ensaios de resistência mecânica com agregados de argila calcinada e a brita comercial do Rio de Janeiro

Método	Ensaio	Argila calcinada (900°C – 35 min)	Brita comercial (Rio de Janeiro)	Limites (Sugeridos pela metodologia)
DNER-ME 222/94	Agregado sintético fabricado com argila – desgaste por abrasão	30 %	47%	Menor que 50%
DNER-ME 225/94	Agregado sintético de argila – determinação da perda de massa após fervura	2,1%	-----	Menor que 6%
DNER-ME 197/97	Agregados – determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos	23,5%	27%	Menor que 40%
DNER-ME 081/98	Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo	16 %	0,90%	Absorção menor que 18%
DNER-ME 096/98	Agregado graúdo – avaliação da resistência mecânica pelo método dos 10% de finos	114 kN	89 kN	Maior que 60 kN
DNER-ME 399/99	Agregados – determinação da perda ao choque no aparelho Treton	19 %	20 %	Menor que 60%
DNER-ME 400/99	Agregados – desgaste após fervura de agregado pétreo natural	-----	2,4%	Menor que 6%

Além de estar com o desempenho satisfatório em todos os limites estabelecidos, observa-se nos resultados da TAB. 5.17 que com as amostras de argila provenientes de Santarém (PA), foram produzidos agregados de argila calcinada que obtiveram resultados superiores ao agregado pétreo nos cinco ensaios de resistência mecânica à que foram submetidos.

Como já era esperada, a absorção do agregado cerâmico é extremamente elevada quando comparada ao agregado natural. Sobre esta propriedade, resultados adicionais foram objeto de estudo na presente dissertação (descritos no próximo item), embora não esteja sendo requerido como etapa constante da metodologia.



FIG.5.19 Seqüência operacional do ensaio de desgaste por abrasão no aparelho Los Angeles.



FIG.5.20 Ensaio da perda de massa por desgaste após fervura.



FIG.5.21 Avaliação da resistência mecânica (10% de finos e resistência ao esmagamento).



FIG.5.22 Determinação da perda ao choque no aparelho Treton.

5.3.2.3 ESTUDO ADICIONAL DA ABSORÇÃO E POROSIDADE

A partir dos resultados apresentados na TAB. 5.17, considera-se satisfatória a matéria-prima em análise, concluindo a 1ª Fase da metodologia proposta, estando com todos os dados necessários ao desenvolvimento da fase de produção industrial.

Contudo, como foi relatado na introdução deste trabalho, um dos objetivos deste estudo, era também contribuir com a evolução da tecnologia do agregado artificial de argila calcinada, através da procura de respostas para as questões relacionadas a alguns parâmetros determinantes para a sua qualidade final.

Um destes parâmetros vem a ser a porosidade e conseqüente absorção que além de poder ocasionar alguma queda da resistência mecânica do agregado, principalmente, é a propriedade que irá determinar a quantidade de ligante asfáltico a ser adicionado em uma mistura asfáltica, desenvolvida com este tipo de agregado.

A partir dos conceitos teóricos descritos (ver item 3.3.3.1), da prática ceramista observada durante as visitas técnicas, e da bibliografia especializada sobre o assunto, foram elaborados estudos experimentais para verificação da diminuição da absorção da argila calcinada, por vários caminhos:

- Adição de carvão mineral moído na argila;
- Adição de cal hidratada na argila;
- Adição de compostos químicos, mais especificamente, óxidos alcalinos;
- Variação do tempo de queima;
- Aumento da temperatura de queima.

→ Adição de carvão mineral moído na argila:

A adição ocorreu pela incorporação de 2% em peso de carvão mineral moído na mistura das argilas (mistura sem adição), antes da adição da água de amassamento para a extrusão. Foram também feitas variações na temperatura de queima, desde 900° C até 1.100° C.

O carvão mineral moído foi cordialmente fornecido pela Carbonífera Metropolitana S/A., que comercializa este produto especificamente para e melhora a produtividade na fabricação de telhas. Segundo as suas informações técnicas, o denominado “Carvão Mineral Especial” propicia a obtenção de um produto cerâmico de melhor qualidade e custo reduzido, além de benefícios em todo o processo de produção. O produto teve inclusive o pedido de registro de patente junto ao INPI.

Cabe lembrar que algumas indústrias cerâmicas visitadas do pólo cerâmico de Itaboraí (RJ), realmente praticavam a incorporação deste produto para a produção de telhas cerâmicas.

O material enviado possui granulometria fina (100% passante na peneira #80 da ABNT), e sob um aspecto apenas visual, houve uma aparente diminuição da retração após a secagem, e após a queima, uma diminuição da rugosidade externa dos corpos de prova, bem como da mudança para uma coloração mais clara após o resfriamento (FIG. 5.23).

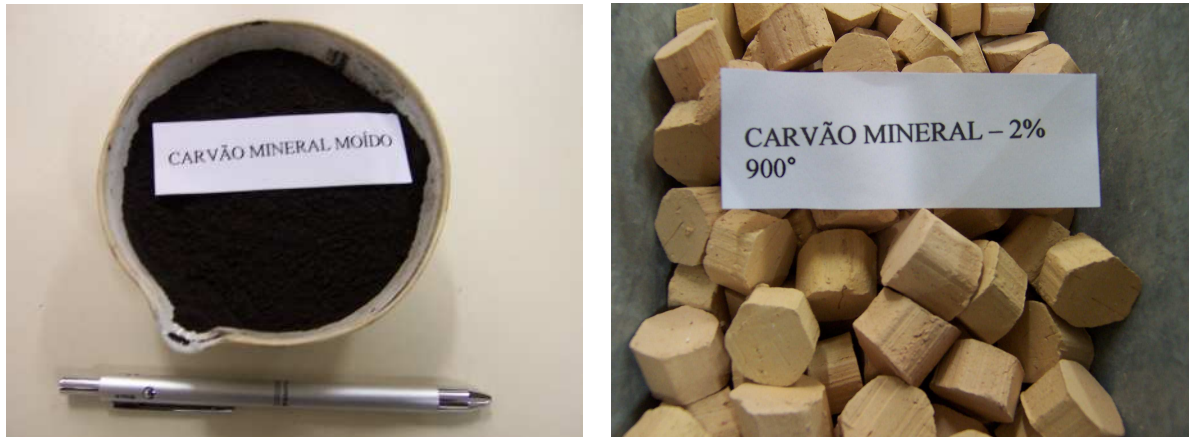


FIG.5.23 Amostra de carvão mineral e dos corpos de prova após queima com a incorporação deste produto.

Os resultados dos ensaios efetuados com esta alternativa estão dispostos no gráfico da FIG. 5.24. Os resultados obtidos foram praticamente idênticos aos dados enviados em relatório técnico da Carbonífera Metropolitana (1998).

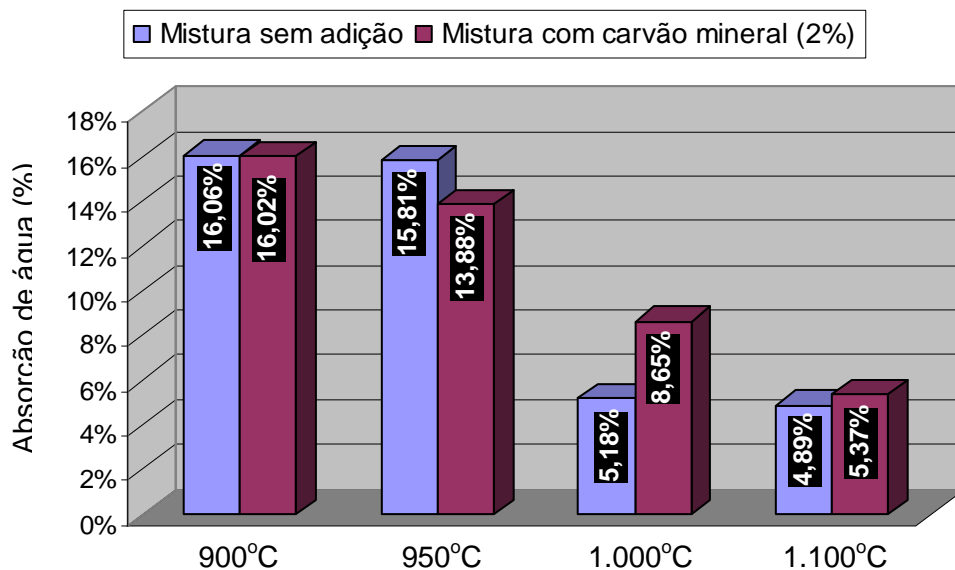


FIG.5.24 Variação da absorção de água do agregado de argila calcinada com a incorporação de carvão mineral moído.

→ Adição de cal hidratada na argila: Esta tentativa procurou de certa forma reproduzir o estudo divulgado por ALEXANDRE et al. (2004b). Foi feita a incorporação de 5% em peso de cal hidratada nas mesmas condições em que foi feito para o carvão mineral. Após a queima, foi notada uma acentuada fragilidade do

agregado produzido, sendo desnecessário o prosseguimento do estudo da absorção para esta alternativa, em particular.

→ Adição de compostos químicos, mais especificamente, óxidos alcalinos: A adição de óxidos alcalinos na mistura argilosa foi efetuada com a incorporação de óxido de potássio, num percentual de 2% na água de amassamento da argila a ser preparada para a extrusão. Os resultados obtidos indicaram um elevado aumento da absorção do agregado após a queima, da ordem de 30%, em relação à mistura original sem adição.

→ Variação do tempo de queima: Uma dúvida que também era proveniente de estudos anteriores, residia no tempo de queima do agregado de argila calcinada, no patamar estabelecido como temperatura de trabalho. Sendo assim, foram feitas variações no tempo de queima, sendo a temperatura mantida constante em 900°C. Os resultados estão apresentados na FIG. 5.25.

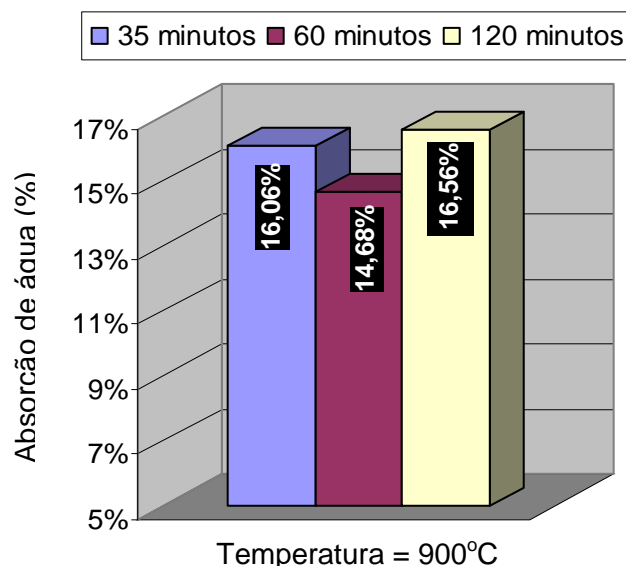


FIG.5.25 Variação da absorção de água com o tempo de queima.

→ Aumento da temperatura de queima: Mantido agora constante o tempo de queima, foi feita uma variação na temperatura de queima dos agregados, apresentando os resultados mostrados na FIG. 5.26 obtidas a partir do ensaio de absorção de água (FIG. 5.27).

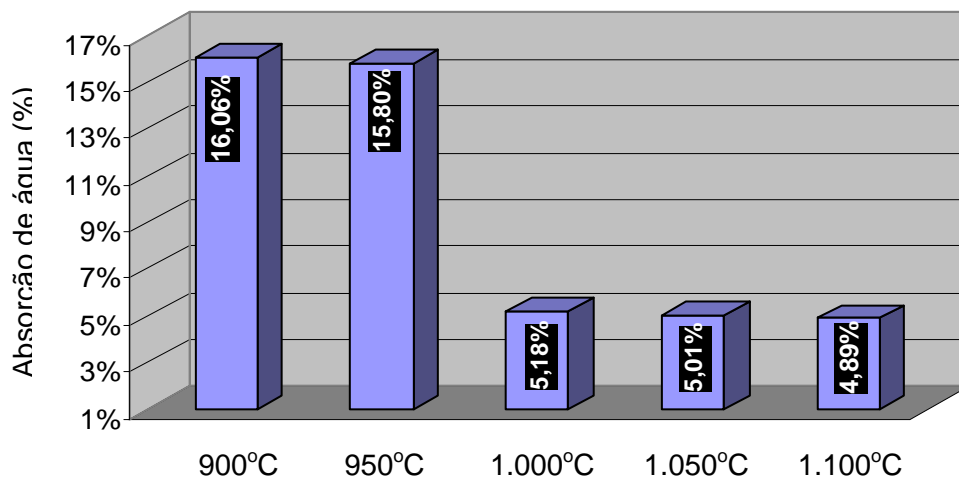


FIG.5.26 Variação da absorção de água com a temperatura de queima.

É extremamente oportuno e interessante lembrar neste momento, dos ensaios de análise térmica diferencial e termogravimétrica, cujos resultados estão dispostos nas curvas da FIG. 5.17:

“→ ocorre um pico exotérmico entre 950°C e 1005°C, que é decorrente da cristalização de mulita;

→ esta cristalização da mulita, ocorrendo justamente no patamar da temperatura que se pretende efetuar a queima do agregado de argila calcinada (950°C), vem propiciar uma fase líquida que favorece a maior densificação do corpo cerâmico a ser produzido;

→ caso haja a possibilidade no forno, a temperatura de trabalho deve ser imediatamente superior a esta cristalização (1.006°C), onde provavelmente deve ser observado o maior preenchimento possível dos poros do agregado cerâmico.”

Estas informações merecem ainda mais destaque, ou melhor, o ensaio de análise térmica da matéria-prima, que demonstra a sua relevância, tendo em vista que esta avaliação da absorção com a variação da temperatura fora realizada vários meses antes da análise térmica, o que evidencia e comprova o comportamento térmico da matéria-prima proveniente de Santarém (PA).

Conclui-se este item ratificando que para esta matéria-prima em análise, o método que se mostrou mais eficiente para reduzir a absorção, dentre os processos testados, foi o aumento da temperatura de queima.



FIG.5.27 Execução do ensaio de absorção e densidade aparente do agregado de argila calcinada.

5.4 2ª FASE: PROCESSO ADOTADO PARA A PRODUÇÃO INDUSTRIAL

Tendo em mente que a viabilização de uma usina para a fabricação dos agregados de argila calcinada, ou até mesmo a recuperação da usina do DNER, no tempo de uma dissertação de mestrado seria impossível, esta fase da metodologia proposta, inicialmente, estava sendo preparada para a sugestão de projetos e/ou desenho de protótipos, de forma semelhante e até baseando-se nas usinas do estudo do DNER (1981).

Conforme já explanado, as visitas efetuadas nos pólos cerâmicos fundamentaram uma nova alternativa: a de produzir os agregados em olarias, preferencialmente já instaladas e em operação.

Essa alternativa foi principalmente planejada, para atender as pequenas demandas de prefeituras ou comunidades localizadas na região norte do país, que encontram dificuldades tanto logísticas quanto peculiares à esta região de selva, e não têm como dispor de um elevado aporte de recursos para a aquisição de uma usina pré-fabricada para a produção do agregado de argila calcinada.

A partir da visita ao pólo cerâmico de Santarém, a tecnologia do agregado de argila calcinada foi apresentada aos ceramistas, e a sua aceitação inicial foi praticamente unânime, o que não seria difícil de se imaginar, uma vez que estava sendo mostrada não somente uma solução para um problema técnico da engenharia

local, mas também uma nova alternativa de mercado para estes empresários, com qualidade técnica comprovada através de seguidos anos de pesquisas, e com um custo que seria inferior para o consumidor final, em comparação à aquisição de agregados britados de rochas.

Foi nesta situação, que em visita a uma das indústrias, em 05 de julho de 2004, de propriedade do Sr. Francisco Araújo Vieira, houve o interesse do mesmo em efetuar esta pioneira produção experimental para posterior avaliação em laboratório.

Ainda acreditando que esta produção seria viabilizada em médio prazo, até com o intuito de não prejudicar o funcionamento da referida indústria, em menos de 3 semanas houve novo contato, sendo transmitida a informação de que já haviam sido fabricados aproximadamente 400kg de agregados, já britados, prontos para serem enviados e avaliados no laboratório do IME. Registrava-se dessa forma, em julho de 2.004, a primeira produção industrial do agregado artificial de argila calcinada.

5.4.1 CARACTERÍSTICAS DA PRODUÇÃO

A seguir, são listadas as principais características informadas, por ocasião da fabricação elaborada na Unidade de Produção (UP) que foi disponibilizada à realização da produção experimental. Tais informações foram repassadas por intermédio de um questionário enviado à UP. As devidas considerações de custo são levantadas no próximo item de aplicação da metodologia proposta.

→ Matéria-prima utilizada:

Na oportunidade da produção experimental, a matéria-prima utilizada pela UP para as suas peças (tijolos, blocos e telhas) foi a mesma empregada na fabricação do agregado de argila calcinada. A massa argilosa é composta apenas de uma única argila, que é oriunda de jazida próxima ao Rio Amazonas, de posse da própria empresa, e com as respectivas licenças ambientais à esta exploração mineral.

Cabe revelar neste instante, que a matéria-prima que estava sendo avaliada até o presente momento neste capítulo, não é a mesma da jazida em que foram produzidos os agregados na UP. Além de não ter sido possível gerir o processo de exploração e utilização da mesma matéria-prima (mistura sem adição) na UP, é necessário lembrar que tratavam-se de duas empresas distintas, que faziam uso de sua própria matéria-prima.

Somado aos satisfatórios resultados atingidos com o agregado proveniente da UP (TAB. 5.8), sendo em sua maioria, qualitativamente superior ao observado na TAB. 5.7, julgou-se desnecessário a repetição de todas as etapas anteriores da metodologia proposta, entendendo-se que, didaticamente, foram minuciosamente elucidadas todas as etapas constituintes da 1ª Fase da metodologia proposta, com este capítulo de aplicação da mesma.

A argila é extraída e transportada da jazida até o depósito em pátio coberto na própria UP em que é praticado um curto período de sazonalidade.

→ Preparação da matéria-prima:

A UP dispõe de todos os equipamentos convencionais (e já citados) à preparação da matéria-prima para a extrusão de tijolos ou telhas.

→ Moldagem e extrusão:

Foram moldadas barras cilíndricas duplas, com seção em forma de “8”, e de comprimento médio de 22 cm. Houve a necessidade de uma adaptação na máquina extrusora, com o advento de uma boquilha fabricada especificamente para esta produção experimental, em serralheria da própria UP.

→ Secagem:

A secagem das barras foi considerada satisfatória, sendo efetuada apenas à temperatura ambiente, embora exista uma unidade estufa na UP. Vale lembrar as altas temperaturas registradas em Santarém, por ocasião da visita.

A secagem das telhas na UP é efetuada em prateleiras de madeira dispostas à temperatura ambiente inicialmente, e em seguida levadas à estufa.

→ Queima:

A UP dispõe de novos e modernos fornos tipo túnel para a queima das peças cerâmicas convencionais. Estas peças são empilhadas em “vagões” que são deslocados sobre trilhos até o interior dos fornos que são fechados e vedados por ocasião da queima.

A queima das barras cilíndricas foi efetuada até um patamar cuja temperatura atingiu 950°C. Tais barras foram empilhadas na parte superior dos vagões (na mesma posição em que são empilhadas as telhas), e foram queimadas juntamente com os tijolos e telhas da produção convencional da UP.

A UP efetua o controle da temperatura através de medidores dispostos em diversos pontos do forno túnel. O tempo de queima durou em média 36 horas, mas

isto foi devido à necessidade de aproveitamento da fornada para a produção dos tijolos e telhas, que nesta UP, exigem convencionalmente este tempo de cozimento.

A queima foi realizada com o aumento gradativo da temperatura, e o forno em geral é aberto quando a temperatura atinge aproximadamente 300°C. Este procedimento também é o usual na fabricação dos produtos da UP.

→ Combustível:

O combustível utilizado por ocasião da produção experimental foi a lenha. Eventualmente também utilizaram resíduos de madeiras. Ambos são adquiridos com relativo baixo custo, devido à grande diversidade de madeiras nas proximidades da UP.

Na ocasião da visita, novos queimadores estavam sendo instalados no forno túnel, para habilitar o uso da serragem e gás natural. Segundo relato do proprietário, esta mudança para o uso da serragem, estaria relacionada ao custo de aquisição do material na região que é insignificante, sendo apenas considerado o valor do frete.

Com este advento, os custos de produção sofreriam uma acentuada queda. Conforme dados revelados na visita, a fornada de uma unidade móvel (vagão) produz de 13.000 a 20.000 peças, consumindo aproximadamente 20 m³ de lenha.

→ Caracterização dos agregados produzidos:

Após o recebimento de uma amostra representativa desta primeira produção experimental, foram iniciados os ensaios de verificação da resistência mecânica dos mesmos em laboratório. A TAB. 5.8 traz os resultados destes ensaios.

Assim como está mostrado no fluxograma representativo da metodologia na FIG. 4.1, o quadro (7) representa esta etapa em que o agregado está apto para o emprego como material de pavimentação.

Como convenção, na presente dissertação, esta amostra de agregado cerâmico produzido na UP de Santarém, recebe a denominação de “Argila Calcinada Industrial”, conforme pode ser notado nos próximos ensaios e no item de emprego como material de pavimentação.

TAB.5.8 Ensaio de resistência mecânica com a Argila Calcificada Industrial

Método	Ensaio	Argila Calcificada Industrial	Limites (Sugeridos pela metodologia)
DNER-ME 222/94	Agregado sintético fabricado com argila – desgaste por abrasão	28 %	Menor que 50%
DNER-ME 225/94	Agregado sintético de argila – determinação da perda de massa após fervura	1,2 %	Menor que 6%
DNER-ME 197/97	Agregados – determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos	21,4%	Menor que 40%
DNER-ME 081/98	Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo	11,3 %	Absorção menor que 18%
DNER-ME 096/98	Agregado graúdo – avaliação da resistência mecânica pelo método dos 10% de finos	106,1 kN	Maior que 60 kN
DNER-ME 399/99	Agregados – determinação da perda ao choque no aparelho Treton	18,6 %	Menor que 60%

Concluindo a exposição da aplicação da 2ª Fase da metodologia, apresenta-se a seqüência de fotos a seguir (FIG. 5.28, FIG. 5.29, FIG. 5.30, FIG. 5.31, FIG. 5.32, FIG. 5.33) que mostram as particularidades descritas acima, da Unidade de Produção onde foram fabricados os agregados de argila calcificada.



FIG.5.28 Detalhe do depósito de argila. De frente, o Sr. Francisco Vieira, proprietário da UP.



FIG.5.29 Dispositivo para secagem das peças ao ar.



FIG.5.30 Foto do vagão fora do forno com as peças empilhadas.



FIG.5.31 Vista geral dos dois fornos tipo túnel e do sistema de trilhos para o deslocamento dos vagões.



FIG.5.32 Dispositivo de controle da temperatura embutido na parede do forno túnel.



FIG.5.33 Detalhe da lenha empregada como combustível e da instalação do novo sistema de queima (acima).

5.5 3ª FASE: ANÁLISE DOS CUSTOS ENVOLVIDOS NA PRODUÇÃO

Com o agregado de argila calcinada produzido, este capítulo de aplicação da metodologia proposta, entra na sua 3ª e última Fase de desenvolvimento. Para a previsão de um custo estimado da fabricação do agregado de argila calcinada, foram necessários alguns dados relativos do processo produtivo, em sua maioria listados no item anterior, bem como de uma planilha mensal composta dos custos da UP, com informações de gastos diretos e indiretos relacionados a um tijolo maciço produzido na UP. Esta comparação com o tijolo maciço foi considerada a mais aproximada pelos seguintes aspectos:

→ As barras cilíndricas foram extrusadas através de uma boquilha que foi adaptada da abertura do tijolo maciço, ou seja, com uma “boca” de aproximadamente 05cm x 10cm; o corte dessas barras também obedeceu a medida convencional do tijolo maciço, em aproximadamente 22 cm;

→ Dentro de um volume aproximado de um paralelepípedo com dimensões de 05cm x 10cm x 22cm, haviam 8 barras cilíndricas maciças, interligadas por um filamento cerâmico que as mantinham conexas dentro deste volume;

→ A secagem e a queima das barras seguiu a linha operacional dos tijolos maciços, inclusive sendo levados no mesmo vagão para o interior do forno, apenas diferindo na posição em que foram empilhados neste vagão.

Partindo dessas premissas, couberam ainda as seguintes considerações:

→ Efetuar as devidas transformações de massa e volume, entendendo que em um paralelepípedo imaginário de um tijolo maciço, haviam vários espaços vazios entre as barras cilíndricas;

→ Pesar uma amostra dessas 8 barras ainda interligadas, sendo verificada uma massa variando entre 1.000g a 1.050g. A massa de 1.050g foi adotada para as devidas transformações, para que pudesse ser verificado o custo máximo que seria atingido por esta produção experimental.

→ Foi notada na UP, um relativo “empolamento”, comparativamente partindo das barras queimadas e interligadas, em relação a um recipiente de volume conhecido, preenchido com o agregado de argila calcinada industrial já “britado”.

→ Este “empolamento”, obviamente, não está sendo entendido como uma expansão do material calcinado, mas sim uma diferença de volume percebido entre um corpo maciço, e este mesmo corpo cerâmico fragmentado, agora dentro de um recipiente de volume conhecido, em que existe a “acomodação” dos agregados, e entre os mesmos, são “criados” espaços vazios anteriormente inexistentes.

→ Tal “empolamento” foi denominado de “Fator de conversão”, e segundo as medições realizadas, estava próximo de 0,6. Exemplificando, caso fosse calcinado um bloco maciço de 1m³, este bloco após britado, originaria 1,6m³ de agregado de argila calcinada industrial.

→ Como este “Fator de conversão” não foi oriundo de tratamento estatístico, foi considerada uma faixa de limites para este fator, no intuito de evitar uma minoração inadequada no custo final de produção do agregado de argila calcinada.

Enfim, foi estabelecido um limite estimativo inferior e superior, onde o “Fator de Conversão” varia entre 0,25 e 0,6. Citando novamente o exemplo do bloco maciço de 1m³, após britado, provavelmente originaria entre 1,25m³ ou até 1,6m³ de agregado de argila calcinada industrial, e estas considerações são levadas a efeito com a planilha de custos mensais da UP, dispostas a seguir (TAB. 5.9 e FIG 5.34):

TAB.5.9 Planilha de custos mensais da produção de tijolo maciço na UP.

Item de custo	Valor mensal
Folha de pagamento	R\$ 5.200,00
Argila	R\$ 4.055,69
Frete da argila	R\$ 2.703,79
Energia da fábrica	R\$ 5.110,59
Lenha com frete	R\$ 3.500,00
Manutenção	R\$ 1.068,63
Combustível	R\$ 1.234,25
Encargos sociais	R\$ 1.270,34
Diversos	R\$ 1.805,00
Propaganda	R\$ 1.335,00
Transporte	R\$ 284,65
Peças	R\$ 480,00
Telefonia	R\$ 338,72
Material de escritório	R\$ 124,74
Uniformes	R\$ 300,00
Associação e Sindicato	R\$ 189,45
Médico do trabalho	R\$ 480,00
Internet	R\$ 30,00
Água (COSANPA)	R\$ 29,37
SOMA	R\$ 29.540,22

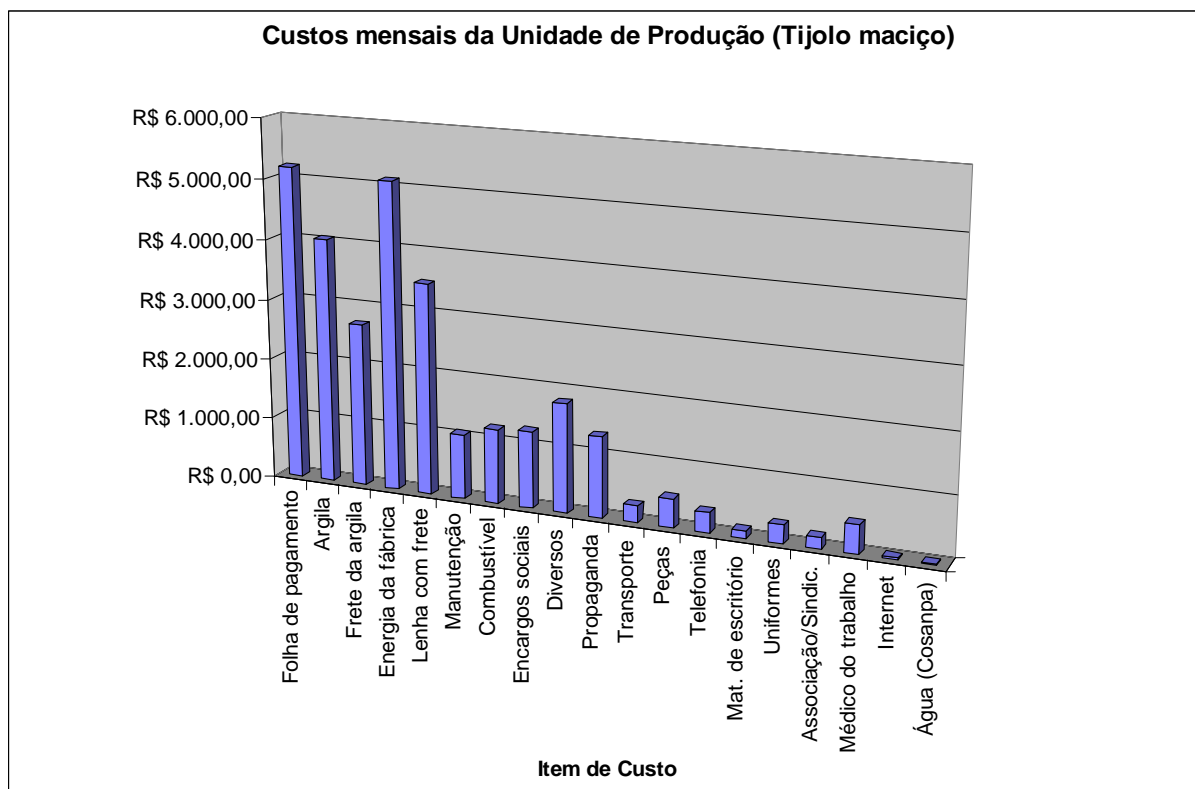


FIG.5.34 Gráfico proveniente da planilha de custos mensais da fabricação de tijolo maciço na UP de Santarém (PA).

Sabendo que estas anotações são referente em peso, a uma produção de aproximadamente 486 toneladas de tijolos maciços no período de análise, e de posse das considerações tecidas anteriormente, resta efetuar os seguintes cálculos:

$$\text{Custo/ton} = \text{R\$ } 60,78$$

$$\text{Massa específica aparente} - \mu_{ap} \text{ (ton/m}^3\text{)} = 1,05$$

$$\text{Fator de conversão (limite inferior)} = 0,25$$

$$\text{Fator de conversão (limite superior)} = 0,60$$

$$\text{Custo/m}^3 \text{ (maciço)} = \text{R\$ } 63,82$$

$$\text{Custo/m}^3 \text{ britado (limite inferior)} = \text{R\$ } 51,06$$

$$\text{Custo/m}^3 \text{ britado (limite superior)} = \text{R\$ } 39,89$$

A partir destes dados, deve-se ter em mente que um conjunto complexo de variáveis é que podem determinar o valor de venda ao consumidor final, tais como: a demanda local, aperfeiçoamentos no processo produtivo e o custo/benefício que será atingido com a mudança do material combustível. Acredita-se que uma margem de 15 a 30% seja admissível como estimativa inicial.

5.6 3^A FASE: EMPREGO DO AGREGADO COMO MATERIAL DE PAVIMENTAÇÃO

A última etapa a ser descrita sobre o plano experimental está relacionada com a simulação do agregado artificial de argila calcinada industrial em diversas situações de emprego como material de pavimentação.

Estando satisfatórios os resultados de resistência mecânica do agregado produzido, conforme visualizado nos resultados da TAB. 5.8, o presente item além de apresentar a aplicação deste agregado em mistura solo-agregado e mistura asfáltica, vem trazer respostas sobre alguns objetivos listado no início deste trabalho.

Os resultados atingidos podem propiciar ao técnico, uma base de dados para poder fazer uso das normas vigentes e analisar os resultados à luz dos métodos de dimensionamento, alguns deles resumidamente citados no item 4.5.2.

Os resultados dos ensaios realizados estão de acordo com a seguinte seqüência, e grande parte deles, disponibilizados nos APÊNDICES deste texto:

→ Mistura solo-agregado:

- Ensaio de compactação
- Ensaio de ISC
- Ensaio de módulo de resiliência

→ Mistura asfáltica:

- Beneficiamento dos agregados
- Projeto de dosagem Marshall
- Determinação da densidade da mistura pelo método de Rice
- Ensaio de resistência à tração, módulo de resiliência e fadiga
- Ensaio de degradação após compactação Marshall

→ Análise numérica com o FEPAVE:

- Dimensionamento do pavimento de trecho da BR-163
- Dimensionamento de pavimento-tipo

5.6.1 MISTURA SOLO-AGREGADO

A mistura solo-agregado desta etapa foi planejada para prever o comportamento do material obtido segundo a composição em peso de 50% de solo da região em estudo (BR-163 PA), e 50% de agregados de argila calcinada.

Comparativamente, uma mesma mistura foi concebida com a brita comercial do Rio de Janeiro, que já estava sendo usado como base comparativa nos ensaios de resistência mecânica (TAB. 5.7).

Além da brita e do agregado de argila calcinada industrial, mais duas amostras de agregados de argila calcinada foram utilizados, formando assim, 4 misturas distintas. Estas duas últimas amostras, são agregados de argila calcinada fabricados em laboratório (conforme explicado no item 5.3.2.2) nas temperaturas de 900°C e 1.000°C, com um tempo de calcinação de 35 minutos no patamar da temperatura de trabalho.

O solo utilizado, escolhido aleatoriamente, é proveniente de amostras coletadas no sub-leito da BR-163 no trecho do estado do Pará, amostras estas utilizadas no estudo de CHAGAS (2004).

A amostra em questão é a denominada de “Km 174”. Os principais dados sobre este solo estão na TAB. 5.10 (granulometria, limites de Atterberg e ISC do solo) e na FIG. 5.35 (relatório do ensaio de módulo resiliente com a amostra do Km 174).

TAB.5.10 Granulometria, LL, LP e ISC do solo utilizado.

Amostra (Km)	GRANULOMETRIA						LIMITES DE ATTERBERG		ISC
	Pedregulho (%)	Areia grossa (%)	Areia média (%)	Areia fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	LL	LP	
	> 4,8 (mm)	4,8 - 2,0 (mm)	2,0 - 0,42 (mm)	0,42 - 0,05 (mm)	0,05 - 0,005 (mm)	< 0,005 (mm)			
174	1,00	4,00	41,00	31,89	8,05	14,06	NP	NP	15%

Fonte: CHAGAS, 2004.

σ_3 (MPa)	σ_d (Mpa)	V.Médio (mm)	D.E.R.	M.R. (MPa)
0,021	0,021	0.015618	0.000080	258
0,021	0,041	0.052879	0.000270	152
0,021	0,062	0.092213	0.000471	131
0,034	0,034	0.031163	0.000159	215
0,034	0,069	0.094074	0.000481	143
0,034	0,103	0.141583	0.000724	142
0,051	0,051	0.066609	0.000340	151
0,051	0,103	0.136375	0.000697	148
0,051	0,154	0.186569	0.000953	162
0,069	0,069	0.080068	0.000409	168
0,069	0,137	0.156095	0.000798	172
0,069	0,206	0.210117	0.001074	192
0,103	0,103	0.095191	0.000486	212
0,103	0,206	0.180192	0.000921	224
0,103	0,309	0.266004	0.001360	227
0,137	0,137	0.103811	0.000531	259
0,137	0,275	0.204624	0.001046	262
0,137	0,412	0.313234	0.001602	257

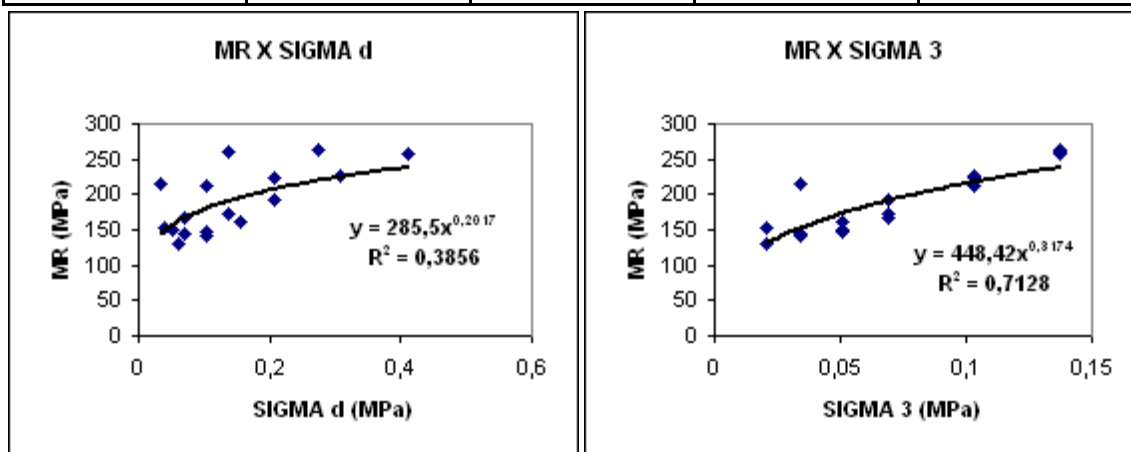


FIG.5.35 Relatório e curvas do ensaio de módulo com a amostra de sub-leito do Km 174 da BR-163/PA (CHAGAS, 2004).

Na seqüência, a FIG. 5.36 ilustra o planejamento montado para as misturas de solo-agregado, com os respectivos resultados de ISC e módulo. O módulo de resiliência que está apresentado na figura é o valor médio obtido. Em alguns casos, foi retirado o primeiro valor, quando considerado discrepante. As fichas dos ensaios de compactação, ISC, assim como o relatório do ensaio de módulo de resiliência para cada mistura, estão disponíveis nos APÊNDICES 3 e 4 da presente dissertação.

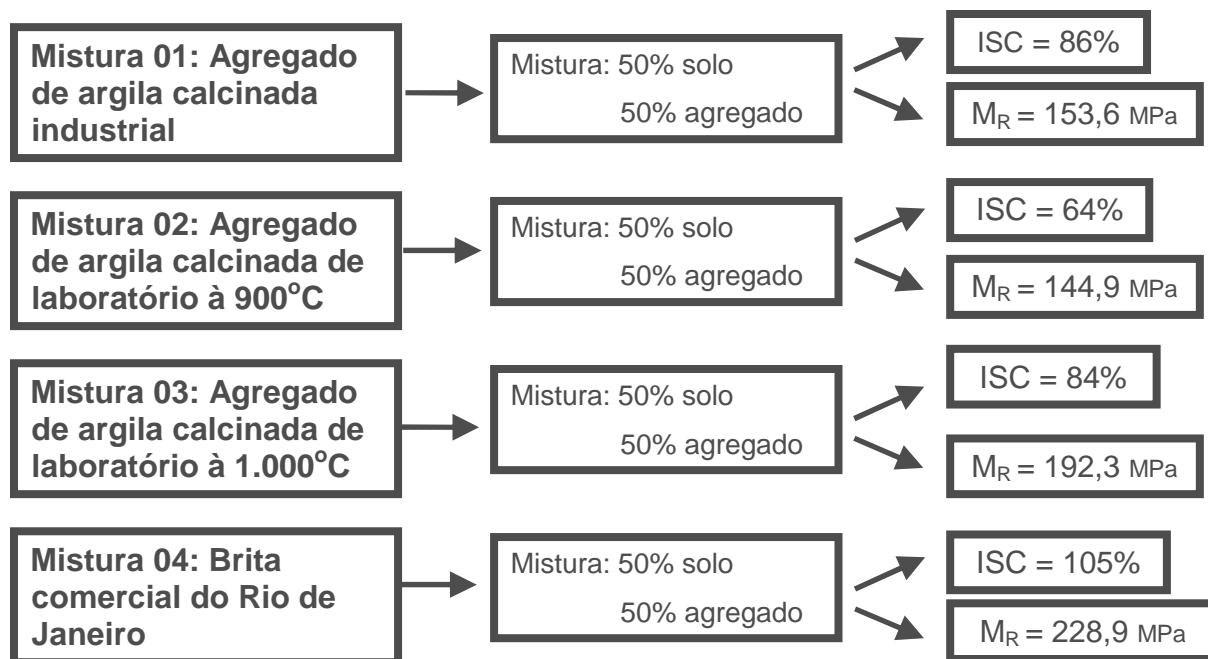


FIG.5.36 Esquema representativo dos ensaios com os resultados de ISC e $M_{R_{médio}}$ das misturas solo-agregado.

Conforme pode ser notado nas fichas dos ensaios de compactação e ISC (APÊNDICE 3), a quantidade de água necessária para atingir a umidade ótima da mistura é maior para os agregados com maior absorção (menor temperatura de queima) e simultaneamente, é observada a redução do índice de suporte, bem como do valor médio do módulo de resiliência.

Apesar deste aspecto, todas as misturas submetidas à compactação na energia intermediária, tornaram-se aptas para compor camada de base segundo a norma vigente (DNER ES 303/97) caso seja atendida a situação de solicitação máxima de tráfego a que foi enquadrada a curva granulométrica da mistura (ISC > 60% para $N \leq 5 \times 10^6$). Os percentuais e a curva granulométrica de projeto são apresentados na TAB. 5.11 e na FIG. 5.37. As fotos desta etapa experimental estão na seqüência.

TAB.5.11 Composição granulométrica das misturas solo-agregado.

Peneira	Faixa E		Faixa F		Tolerância da faixa	Projeto da mistura		
	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Lim. Inf.	Lim. Sup.		Peso retido (g)	Peso pass. (g)	Percentual
2"	100%	100%	100%	100%	7%	0,0	6.000,0	100%
1"	100%	100%	100%	100%	7%	0,0	6.000,0	100%
Nº 4	55%	100%	60%	100%	5%	1.800,0	4.200,0	70%
Nº10	40%	100%	55%	100%	5%	200,0	4.000,0	67%
Nº 40	20%	50%	30%	70%	2%	1.907,0	2.093,0	35%
Nº 200	6%	20%	8%	25%	2%	1.600,0	493,0	8%

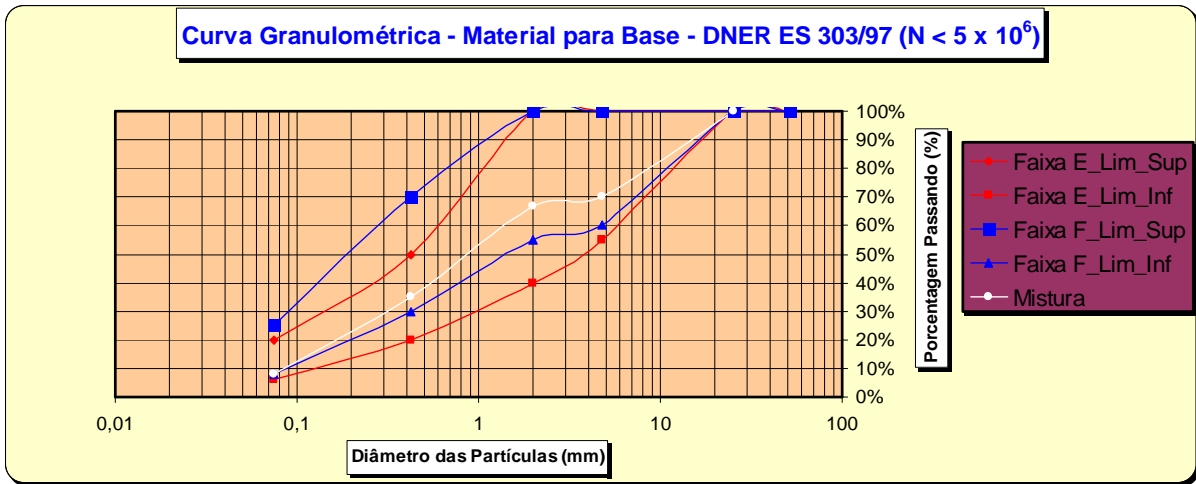


FIG.5.37 Curva granulométrica de projeto das misturas solo-agregado e os limites da faixa especificada para o tráfego escolhido.



FIG.5.38 Mistura solo-agregado com brita comercial do RJ – detalhe da preparação, homogeneização e a mistura na umidade ótima.



FIG.5.39 Mistura solo-agregado com a argila calcinada industrial: separação e posterior homogeneização das amostras de agregado e de solo do sub-leito da BR-163.



FIG.5.40 Preparação para ensaio de módulo: Mistura na umidade ótima; molde tripartido para conformação do corpo-de-prova (CP) de 10cm x 20cm; compactador elétrico do CP.



FIG.5.41 Equipamento triaxial do IME para a realização do ensaio de módulo de resiliência. Detalhe de um CP após o ensaio.

5.6.2 MISTURA ASFÁLTICA

A preparação da mistura asfáltica na etapa de aplicação da metodologia, foi iniciada com um beneficiamento julgado necessário, devido à forma com que os agregados estavam vindo da UP em Santarém.

Conforme já foi explicado, em estudos anteriores sobre o agregado de argila calcinada, a confecção de barras ou elementos esféricos pode ser prejudicial no tocante ao índice de forma que será atingido pelo agregado. Sendo assim, como foram registradas na produção a formação de barras cilíndricas, o agregado após britagem tornou-se extremamente lamelar e com superfície externa arredondada, o que também poderia interferir na estabilidade ou no desempenho do concreto asfáltico a ser dosado.

Foi então adotado um procedimento em laboratório, apenas visual, de “re-britagem” dos agregados fabricados. Não houve, entretanto, nenhuma recalcação após esta quebra, para não interferir na resistência mecânica ou absorção original do agregado produzido em Santarém. Mesmo porque, aparentemente, a parte interna do agregado apresentava um cozimento uniforme. As fotos a seguir (FIG. 5.42, FIG. 5.43 e FIG. 5.44) mostram essa diferença de forma entre o agregado original, e o agregado “beneficiado”.



FIG.5.42 Forma do agregado original proveniente de Santarém. Nota-se a presença ainda de algumas peças cilíndricas e de superfícies externas arredondadas.



FIG.5.43 Forma do agregado de argila calcinada industrial após o beneficiamento (re-britagem) em laboratório.



FIG.5.44 Detalhe do beneficiamento dentro das granulometrias a serem empregadas por ocasião da dosagem da mistura asfáltica.

Tendo em mente alguns dos objetivos a serem atingidos com o estudo específico da mistura asfáltica, são listadas as seguintes considerações, baseadas no estudo de BATISTA (2004):

→ Foi elaborada uma mistura, do tipo concreto asfáltico usinado a quente, que seguiu a metodologia de dosagem Marshall, empregando o CAP-20 (da REDUC) como ligante;

→ Para que fosse possível a adequação granulométrica na Faixa “B” do DNER, foi necessário adotar a adição de fíler de cimento portland resultando em uma composição de agregados com 5% de fíler e 95% de agregados de argila calcinada;

→ A densidade de todos os agregados de argila (graúdos e miúdos) da mistura foram considerados como um único valor, retirados do ensaio baseado no Método da Louisiana (ANEXO 8), que foi criado para a determinação da densidade de agregados graúdos de argila expandida;

→ A densidade máxima teórica da mistura foi calculada com base neste valor, e nas densidades e percentuais do ligante e do fíler;

→ Na tentativa de moldar um corpo-de-prova com um teor de 9% de ligante, por ocasião da desmoldagem, o corpo-de-prova foi também desmontado devido à escassez de ligante;

→ Seguindo os passos do método, foi obtido um teor ótimo de 9,7% de ligante asfáltico;

→ Pela determinação da densidade teórica da mistura através do cálculo ponderado, este teor de 9,7% indicou um teor de vazios de 4%.

Deve-se também lembrar o processo de produção em laboratório adotado na pesquisa citada (BATISTA, 2004), em que os agregados eram levados para a queima, após a secagem, com o forno já pré-aquecido na temperatura final, de forma semelhante ao que é observado na produção do agregado de argila expandida. Este processo exigia ainda uma re-calcinação após britagem, por considerar que não havia um cozimento uniforme dos agregados internamente.

Como a metodologia proposta no capítulo anterior, sugere a observância do processo de queima tal como é realizada nas indústrias cerâmicas, ou seja, com o aumento gradual da temperatura, entende-se que a absorção dos agregados produzidos industrialmente neste estudo, apresentam valores significativamente menores.

Inicialmente, houve então a intenção de verificar a influência dessa redução da absorção, na nova taxa de ligante a ser atingida, seguindo os mesmos passos do processo descrito acima.

Lembra-se então que este fato era um dos objetivos a ser experimentado no presente estudo, bem como a verificação de uma composição granulométrica com 100% de agregados de argila, inclusive como fíler.

Sendo assim, a seqüência adotada foi a de providenciar e separar as quantidades necessárias de agregados para reproduzir em laboratório a mesma curva granulométrica na Faixa B do estudo anterior; obter uma amostra similar de CAP-20; preparar o projeto de dosagem Marshall; verificar a taxa de ligante obtida; verificar os parâmetros de resistência à tração, módulo de resiliência e fadiga.

A seqüência da elaboração da dosagem Marshall, realizada no laboratório do IPR/DNIT, está reproduzida no APÊNDICE 5. A curva granulométrica adotada de BATISTA (2004) pode ser visualizada no APÊNDICE 5.1 – Ficha Nr. 06, e os agregados preparados previamente para atender a esta curva estão na FIG. 5.45.



FIG.5.45 35 Kg de agregados de argila calcinada industrial separados por peneiras para atender a curva de projeto (à esquerda no IME, e à direita no IPR/DNIT).

Sobre a realização desta etapa experimental da mistura asfáltica, são feitos os seguintes comentários:

- Como não haviam sido registrados problemas até o presente estudo sobre a adesividade do agregado de argila, não foi realizado inicialmente o ensaio completo de imersão em temperatura controlada por 72 horas;
- Na verdade, para o agregado de argila calcinada, este ensaio ainda não

havia sido realizado em nenhuma pesquisa. Posteriormente, o ensaio completo foi realizado, e foi constatado um severo descolamento de películas asfálticas sob banho de temperatura controlada durante as 72 horas preconizadas pela norma. Com a incorporação de 1% de dope em relação ao peso de ligante da mistura, este problema foi completamente sanado;

- Para a tentativa dos 3 teores da dosagem Marshall, foram escolhidos os percentuais de 9%, 10% e 11%. Como não houve a perda do corpo de prova por ocasião da desmoldagem no teor de 9%, foi ainda tentado o teor de 8%, que também não desmontou, porém foi notada pouca quantidade de ligante na mistura, antes da compactação;

- Novamente foi adotado um valor único para a densidade efetiva de todos os agregados, medido através do método da Louisiana (LDH TR-312-69) que está traduzido no ANEXO 8.

- Como não haviam outros tipos de agregados, para o cálculo da densidade máxima teórica da mistura, foram apenas considerados dois componentes: o percentual e a densidade de ligante e o percentual e a densidade (pelo método LDH) dos agregados;

- Sob estas considerações, foram compactados 12 corpos de prova (3 CP para cada teor) que proporcionou um teor ótimo de 8,7% de ligante e um teor de vazios de 4,4%, seguindo as especificações da dosagem Marshall;

- Neste teor de ligante considerado ótimo, foram compactados 35 CP, para a verificação da Estabilidade Marshall, Resistência à Tração à 25°C / 30°C / 35°C, Módulo de Resiliência à 25°C / 30°C / 35°C e Fadiga;

- Como também já foi mencionado, outro objetivo do estudo das misturas asfálticas, era a de confirmar a confiabilidade do cálculo da densidade máxima teórica para as misturas asfálticas com este tipo de agregado;

- Somado a essa intenção inicial, ao analisar um CP com o teor de 8,7% (com $V_v = 4,4\%$ segundo o método Marshall), realmente havia a “desconfiança” de que o percentual de vazios naquele volume era de apenas da ordem de 4% a 5%. Como o resultado do ensaio da densidade aparente fora confirmado por diversas tentativas, o provável erro só poderia estar no cálculo da densidade teórica da mistura.

Portanto, como pode ser notado no APÊNDICE 5.1, existe uma denominação de

1ª Alternativa da Densidade Teórica da Mistura. A partir daí foram feitas mais 2 tentativas de cálculo da densidade teórica, que para estes casos também é conhecida como Densidade Máxima Teórica Calculada (DMTC).

Os agregados graúdos, miúdos e retidos na peneira N^o 10 foram separados e medidas as suas densidades aparentes e reais, tal como efetuado com o agregado convencional.

Na 2ª Alternativa da DMTC, a densidade efetiva foi considerada uma média ponderada (1/3 e 2/3) entre a densidade aparente e real para os agregados graúdos e retidos na peneira N^o 10, sugerida em PINTO (2003), quando se trata de agregados porosos. A planilha desta alternativa está mostrada no APÊNDICE 5.2.

Na 3ª Alternativa da DMTC, a densidade efetiva foi calculada pela média aritmética da densidade aparente e real (para os agregados graúdos e retido na N^o 10), de forma idêntica ao que é observado para os agregados convencionais. Seus resultados e indicação do novo teor ótimo de ligante estão mostrados no APÊNDICE 5.3.

Finalmente, restava a opção descrita em diversas pesquisas recentes, e denominada de Densidade Máxima Medida por ensaio (DMM), conhecido como Método de Rice, e normatizado pela ASTM D 2041/00 (aqui também traduzido e disponibilizado no ANEXO 9) que alguns autores citam ser indicada quando se trata de agregados muito porosos. A 4ª Alternativa com os resultados do ensaio de Rice estão no APÊNDICE 5.4.

Utilizando a densidade máxima medida, que pode ser considerada a mais adequada, pelas condições em que é obtida, o processo de enquadramento da dosagem no teor de vazios 3% a 5% conduz a um teor de ligante superior a 12%. Entretanto, durante o projeto de dosagem, já havia sido verificado um excesso de ligante nas misturas elaboradas com o teor de 11%.

Ou seja, os dois métodos (Marshall e Rice) podem ser considerados, de certa forma, “miscíveis”. Caso o projeto de dosagem esteja verificando a densidade da mistura e conseqüentemente o teor de vazios pelo Método de Rice, para este tipo de agregado cerâmico, haverá uma incompatibilidade do teor de ligante “julgado” ótimo, se for enquadrado nos teores de vazios entre 3% a 5%, conforme preconiza o método Marshall.

De acordo com os relatos do próximo capítulo, as sugestões para pesquisas

futuras certamente indicam a busca de novos projetos de dosagem que considerem especificamente as propriedades desses agregados alternativos, ou como é observado em alguns países, a dosagem pelo desempenho, sem a obrigatoriedade de atender limites estabelecidos por outros tipos de materiais, com propriedades completamente diferentes.

Antes de tecer novos comentários sobre a diferença dos resultados entre as alternativas, e dos resultados obtidos na resistência à tração, módulo e fadiga, são apresentadas algumas fotos que ilustram toda esta parte experimental da dosagem do concreto asfáltico.



FIG.5.46 Execução da dosagem pelo método Marshall com teor de ligante de 8% (esq.) e 9% (dir.).



FIG.5.47 Execução da dosagem pelo método Marshall com teor de ligante de 10% (esquerda) e 11% (direita).



FIG.5.48 Corpos de prova com teores de 8%, 9%, 10% e 11% de ligante asfáltico (esquerda) e todos os CP's no teor de 8,7% (direita).



FIG.5.49 Detalhe de um corpo de prova com o teor de ligante pela dosagem Marshall de 8,7%.

O método de Rice (ANEXO 9) permite determinar a massa específica máxima medida e a densidade da mistura asfáltica não compactada a 25°C (G_{MM}). São propriedades fundamentais cujos valores são influenciados pela composição da mistura em termos de tipo e quantidade de materiais agregados e betuminosos.

A massa específica máxima é usada no cálculo dos vazios de ar na mistura asfáltica compactada; no cálculo da quantidade de ligante absorvido pelo agregado; e para dar valores de projeto para compactação das misturas asfálticas.

O ensaio se resume em colocar uma amostra de mistura asfáltica, quantidade esta que depende do tamanho nominal máximo do agregado, em condição fofa em um recipiente tarado. É acrescentado água suficiente, a uma temperatura de cerca de 25°C, para submergir a amostra completamente. Em seguida é aplicado gradualmente vácuo para reduzir a pressão residual dentro do recipiente para 30mmHg ou menos que será mantido por 15±2 minutos sob agitação mecânica. Ao fim deste tempo, o vácuo é gradualmente solto.

O volume da amostra da mistura asfáltica é obtido completando o nível do recipiente com água e pesando ao ar. Tanto a temperatura e a massa são anotadas. Destas medições de massa e volume, é calculada a massa específica ou densidade real da mistura a 25°C.

Um procedimento adicional do ensaio deve ser adotado para o caso do agregado de argila calcinada, assim como para outros agregados porosos, uma vez que durante esta imersão pode ocorrer a absorção de água nos poros do agregado.

Esse procedimento consiste na retirada de toda a água do recipiente em que foi feito o vácuo, tomando o cuidado de não perder nenhuma partícula de massa da mistura, depositando-o em um recipiente, espalhando e revolvendo constantemente de forma que a água superficial seja secada, mediante também o auxílio de uma ventilação sobre a massa asfáltica úmida.

A partir das simulações da densidade máxima teórica da mistura do presente estudo, tanto calculadas quando a medida, foi notada maior proximidade da DMM com a 3ª Alternativa (APÊNDICE 5.3) em que é praticado o cálculo da densidade efetiva a partir da média aritmética das densidades aparentes e reais dos agregados graúdos e retidos na peneira de N° 10.

O gráfico apresentado na FIG. 5.50 facilita a visualização deste comparativo entre as alternativas de cálculo e a densidade medida.

Na seqüência, as fotos do ensaio preconizado pela ASTM D 2041/00, que foram realizados no laboratório de asfaltos da COPPE/UFRJ.

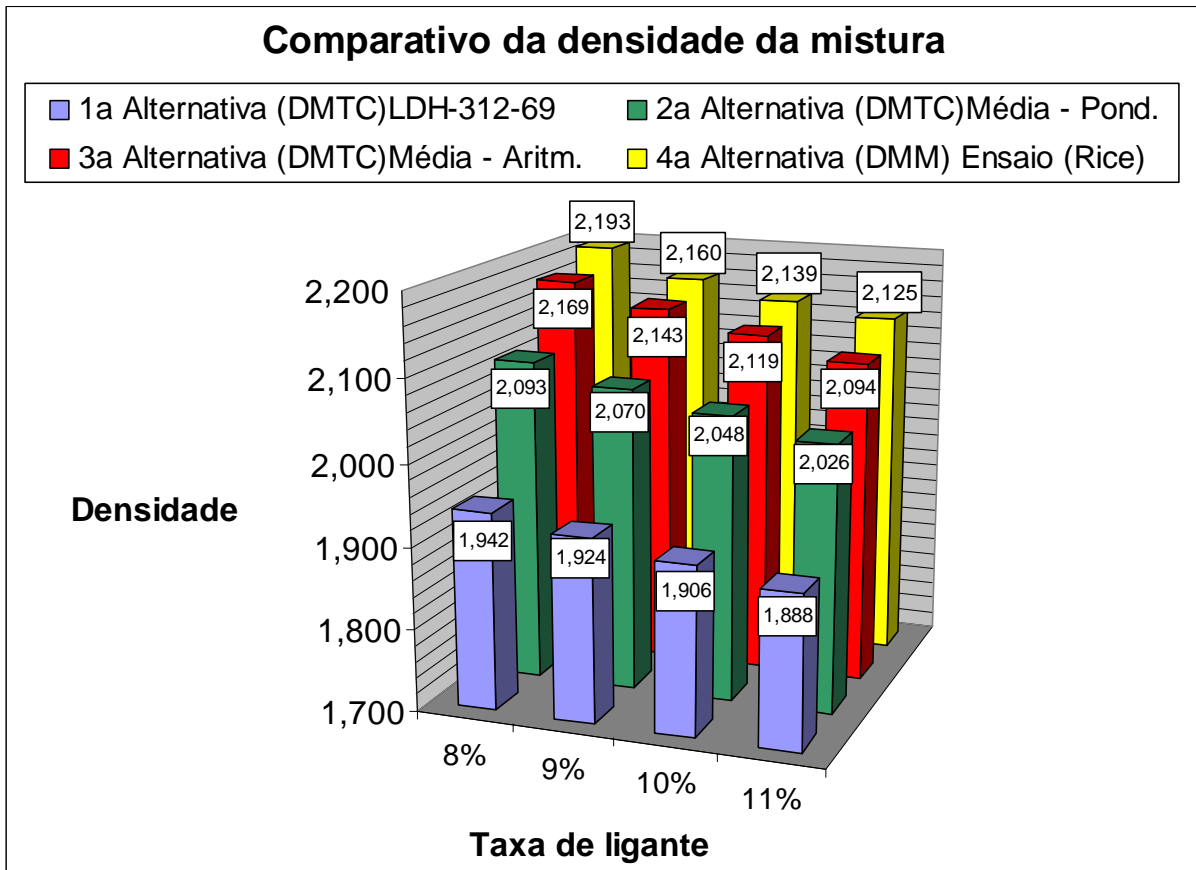


FIG.5.50 Gráfico comparativo entre as alternativas de cálculo (DMTC e DMM).

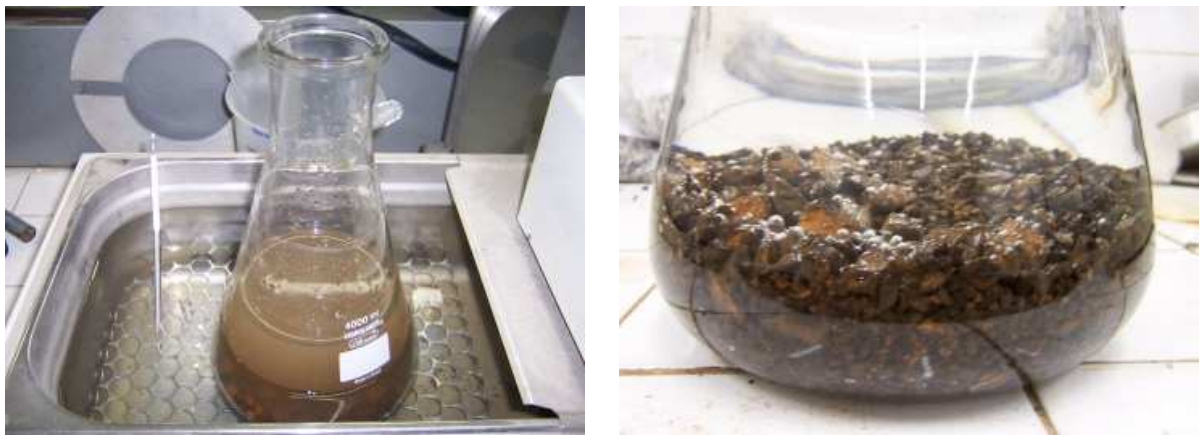


FIG.5.51 Execução do ensaio Rice: banho com temperatura controlada; aplicação de vácuo na mistura.



FIG.5.52 Ensaio Rice: Procedimento adicional para agregados porosos.

Os últimos resultados a serem apresentados sobre a mistura asfáltica preparada, estão diretamente relacionados com o desempenho a ser obtido com um pavimento concebido com estes materiais.

Resta então apresentar os resultados atingidos nos ensaios de módulo de resiliência, da estimativa da vida de fadiga, e a aplicação destes resultados em análise numérica com o programa FEPAVE.

Ainda em termos da resistência mecânica do agregado utilizado, são também apresentados os valores de degradação após a compactação Marshall com o ligante asfáltico.

Embora em termos de custo, o teor de ligante da mistura asfáltica com a argila calcinada industrial tenha atingido uma pequena redução percentual (1%) considerando-se o mesmo método de dosagem empregado na pesquisa anterior; à luz dos parâmetros mecanísticos, foi observado um significativo aumento da capacidade de suporte e resistência mecânica em que os resultados registrados atingiram valores praticamente similares a algumas misturas convencionais encontradas na literatura, cuja dosagem foi elaborada com o agregado natural.

Dessa forma, julga-se pertinente dispor conjuntamente dos resultados de BATISTA (2004) que divulga os primeiros resultados de massa asfáltica com argila calcinada e PINTO (1991) que mostra valores observados em misturas asfálticas com agregados tradicionais, mostrados na TAB. 5.12, onde estão os valores de resistência à tração e módulo de resiliência. Tais misturas também empregaram como ligante o CAP 20.

TAB.5.12 Comparativo de desempenho de concretos asfálticos para a R_T e M_R .

Parâmetro	PINTO (1991) Concreto asfáltico com brita	BATISTA (2004) Concreto asfáltico com a argila calcinação de laboratório	Concreto asfáltico com a argila calcinada industrial
$R_T - 25^\circ\text{C}$ (MPa)	0,81	0,65	0,76
$R_T - 30^\circ\text{C}$ (MPa)	0,63	0,33	0,47
$R_T - 35^\circ\text{C}$ (MPa)	0,42	0,22	0,33
$M_R - 25^\circ\text{C}$ (MPa)	3.520	2.086	3.225

Ressalta-se que os valores encontrados nesta tabela para o presente estudo são os valores médios obtidos a partir da avaliação de um conjunto de corpos de prova, cujos resultados estão disponíveis no APÊNDICE 5.1 – Ficha N^o 12.

Da mesma forma, para a vida de fadiga, as curvas das três pesquisas são dispostas (no APÊNDICE 6) pela relação $N_{\text{GOLPES}} \times \text{Dif. de tensões}$, em MPa. Para a mistura asfáltica do presente estudo, como foi observada uma acentuada dispersão dos valores em determinados níveis de tensão, mais especificamente para 10% e 40%, foram “simuladas” algumas outras curvas, tentando eliminar valores discrepantes.

Estas outras curvas, na verdade são listadas apenas a nível de comparação, uma vez que não houve qualquer tratamento estatístico para eliminar estes valores. A curva que está representando a equação do concreto asfáltico com argila calcinada industrial leva em consideração todos os pontos advindos do ensaio realizado no equipamento.

A comparação com os dois estudos citados pode ser visto no APÊNDICE 6. No próximo capítulo, serão apresentadas algumas conclusões e comentários sobre esta comparação.

Antes da análise numérica, é apresentado o último ensaio realizado com a mistura asfáltica: a degradação verificada após a compactação no equipamento Marshall. Apesar da norma (DNER-ME 401/99) não estabelecer um limite de aceitação para a degradação verificada, ALBUQUERQUE (2005), relata que alguns pesquisadores já constataram que a compactação realizada pelo compactador

Marshall propicia de certa forma uma condição de impacto mais severa do que é observada em campo. Sendo assim, limites de 6% já foram citados como o mais apropriado para a aceitação da degradação do agregado, após a compactação no equipamento Marshall com ligante asfáltico.

Após a extração do ligante em 7 corpos de prova moldados com o teor de 8,7% para o agregado de argila calcinada industrial, foi tirado um valor médio destes corpos de prova e comparado com a curva de projeto inicial. Estes valores estão apresentados na TAB. 5.13.

Conforme pode ser notado, além da soma da degradação das peneiras preconizadas pela norma citada, ALBUQUERQUE (2005) propõe em seu estudo a avaliação da degradação em todas as peneiras constantes dos percentuais do projeto, o que também foi efetuado para o agregado cerâmico.

TAB.5.13 Índice de degradação Marshall com o agregado de argila calcinada.

DEGRADAÇÃO MARSHALL	Peneira	Média dos 07 CP	Projeto
			Soma
	2"		
	1 1/2"	100%	100%
	1"	100%	100%
	3/4"	100%	100%
	1/2"	85%	86%
	3/8"	78%	75%
	Nº 4	58%	52%
	Nº10	34%	25%
	Nº 40	17%	16%
Nº 80	13%	11%	
Nº 200	11%	8%	
Índice Degradação	Norma	3,67	

Ressalta-se que a norma contempla apenas os deslocamentos nas peneiras 3/4", 3/8", Nº 4, Nº 10, Nº 40 e Nº 200 e prevê a compactação dos corpos de prova com 50 golpes, fato este que ratifica ainda mais a resistência do agregado que foi submetido a 60 golpes do compactador original Marshall do IPR.

5.6.3 ANÁLISE NUMÉRICA

Concluindo a fase de aplicação e conseqüentemente o desenvolvimento da metodologia proposta pela presente dissertação, estão sendo exemplificados até que o aumento na resistência mecânica do agregado, com a evolução da pesquisa, pode propiciar uma economia de custos com a aplicação de um material mais nobre para a pavimentação.

Tomando por base novamente um dimensionamento realizado com o estudo de BATISTA (2004) em que já havia sido comprovada tecnicamente a sua utilização em um projeto de grande vulto, tal como a BR-163/PA, são trazidos desta referência os dados necessários à avaliação computacional do dimensionamento (TAB. 5.14).

TAB. 5.14 Dados do projeto de pavimentação da BR-163/PA

Camada do pavimento	Módulo Resiliente (MPa)	Coef. Poisson (μ)
Revestimento com concreto asfáltico tradicional com brita (PINTO, 1991)	3.520	0,30
Revestimento com concreto asfáltico de argila calcinada (BATISTA, 2004)	2.086	0,30
Revestimento com concreto asfáltico de argila calcinada industrial (do presente estudo)	3.225	0,30
Base (granular)	300	0,35
Sub-base (granular)	220	0,35
Reforço do sub-leito	180	0,40
Sub-leito	147	0,45

Fonte: Adaptado de BATISTA, 2004.

A partir de um $N = 8,85 \times 10^6$ deve-se lembrar a necessidade de efetuar alguns cálculos preliminares (citados anteriormente neste texto), tomando por base o módulo do sub-leito, o número N do tráfego, a estimativa da vida de fadiga do material, obtida em laboratório, e o fator campo-laboratório.

Comparando as propriedades dos três materiais sob a hipótese de utilização como revestimento, listam-se as suas características (equação da curva de fadiga –

$N \times \sigma$ – em MPa), necessárias ao cálculo de alguns parâmetros que serão condicionantes ao dimensionamento:

→ PINTO (1991): $N = 1.400 \times (\Delta\sigma)^{-2,61}$

→ BATISTA (2004): $N = 542,83 \times (\Delta\sigma)^{-2,89}$

→ AC Industrial (APÊNDICE 6): $N = 671,42 \times (\Delta\sigma)^{-3,63}$

Sabendo-se que para estas equações, pelas propriedades do sub-leito e das características do tráfego; para cada tipo de revestimento, são estabelecidos os valores limites, calculados de forma trivial em planilha eletrônica, e destacados em vermelho nos quadros seguintes que detalham a memória de cálculo realizada (consultar EQ 4.1 à EQ 4.6).

BATISTA (2004) propõe uma determinada estrutura para o pavimento deste trecho da BR-163/PA, com a utilização do agregado de argila calcinada de laboratório no concreto asfáltico que compõe a camada de revestimento, obtendo resultados satisfatórios com base na análise numérica.

Com os dados do agregado de argila calcinada industrial, foi admitido, segundo a análise numérica, uma estrutura mais econômica com a redução na espessura do concreto asfáltico e, inclusive, com a supressão de uma camada (reforço do sub-leito). As espessuras iniciais (BATISTA, 2004) e do presente estudo, estão representadas na TAB 5.15.

TAB. 5.15 Comparativo entre as estruturas do pavimento para a BR-163/PA

Camada do pavimento	BATISTA (2004) Argila calcinada de laboratório	Argila calcinada industrial do presente estudo
Revestimento com concreto asfáltico utilizando agregado de argila calcinada (laboratório ou industrial)	≥ 7,5 cm	5,0 cm
Base (granular)	15 cm	15 cm
Sub-base (granular)	20 cm	20 cm
Reforço do sub-leito	20 cm	—

Simulação de dimensionamento da BR - 163/PA		
1) Características gerais		
log Dadm	=	1,841
Dadm (0,01 mm)	=	69,498
σ_{vadm} (Kgf/cm²)	=	1,504
2) Características particulares (devido às propriedades do concreto asfáltico)		
a) PINTO (1991): Concreto asfáltico com brita		
N Proj	=	8.850.000
Shift Factor	=	10.000,00
1/($\Delta\sigma_{adm}$) ⁿ	=	1,572E-03
($\Delta\sigma_{adm}$) ⁿ	=	636,158
$\Delta\sigma_{adm}$ (Kgf/cm²)	=	11,86
1/(ϵ) ⁿ	=	4,338E+10
(ϵ) ⁿ	=	2,305E-11
ϵ (cm/cm)	=	0,000084
b) BATISTA (2004): Concreto asfáltico com AC de laboratório		
N Proj	=	8.850.000
Shift Factor	=	10.000,00
1/($\Delta\sigma_{adm}$) ⁿ	=	1,630
($\Delta\sigma_{adm}$) ⁿ	=	6,134E-01
$\Delta\sigma_{adm}$ (Kgf/cm²)	=	8,44
1/(ϵ) ⁿ	=	2,950E+11
(ϵ) ⁿ	=	3,390E-12
ϵ (cm/cm)	=	0,00011
c) Concreto asfáltico com argila calcinada industrial		
N Proj	=	8.850.000
Shift Factor	=	10.000,00
1/($\Delta\sigma_{adm}$) ⁿ	=	1,318
($\Delta\sigma_{adm}$) ⁿ	=	0,759
$\Delta\sigma_{adm}$ (Kgf/cm²)	=	9,27
1/(ϵ) ⁿ	=	1,106E+15
(ϵ) ⁿ	=	9,040E-16
ϵ (cm/cm)	=	0,000071

Ao efetuar um dimensionamento com estes valores limites no programa FEPAVE (em uma versão macro para planilha eletrônica), e simulando a RETIRADA DA CAMADA DE REFORÇO DE SUB-LEITO, surgem os seguintes valores de tensões e deformações. Para melhor entendimento das estruturas, as telas de saída encontram-se disponíveis a seguir:

→ 1ª Análise: Conc. asfáltico com argila calcinada de laboratório:

COPPE - UFRJ Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **BR-163: Análise 1**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 04 fev 2005 às 23:00:24h - FEPAVE - Proj0015**

TEMPO PROC: **0,88 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kg/cm ³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	0,05	0	0,3	3	0	0	0	0	2086
2	0,15	0	0,35	3	0	0	0	0	300
3	0,2	0	0,35	3	0	0	0	0	220
4	4,32	0	0,45	3	0	0	0	0	147

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa
Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão: **-32,61478** centésimo de mm
Deformação Específica de Tração: **0,0002064**
Diferença de Tensões no Revestimento: **0,6463453** MPa
Tensão Vertical no Subleito: **0,0375894** MPa
Tensão no Revestimento: **-0,2165067** MPa
Tensão Vertical - 2 Rodas: **0,054312 0,0591** MPa

Não atende!

→ **2ª Análise: Concreto asfáltico com brita na mesma situação estrutural e de carregamento:**

COPPE - UFRJ
Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **BR-163: Análise 2**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 04 fev 2005 às 23:14:07h - FEPAVE - Proj0016**

TEMPO PROC: **0,98 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm ³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	0,05	0	0,3	3	0	0	0	0	3520
2	0,15	0	0,35	3	0	0	0	0	300
3	0,2	0	0,35	3	0	0	0	0	220
4	4,32	0	0,45	3	0	0	0	0	147

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	-32,28895 centésimo de mm	} → Satisfatório
Deformação Específica de Tração:	0,0002629	
Diferença de Tensões no Revestimento:	1,0913163 MPa	
Tensão Vertical no Subleito:	0,0359221 MPa	
Tensão no Revestimento:	-0,6518967 MPa	
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,052448 0,0572 MPa	

→ **3ª Análise: Concreto asfáltico com argila calcinada industrial na mesma situação estrutural e de carregamento:**

COPPE - UFRJ
Planilha FEPAVE

Por Filipe Franco em 6/Maio/2004

Dados Principais

PROJETO: **BR-163: Análise 3**

ANÁLISE: **Modo Determinístico**

TENSÕES GRAVS: **Não Considerar**

UNIDADES: **kgf, m, MPa**

SIMULAÇÃO #: **Realizada em 04 fev 2005 às 23:45:51h - FEPAVE - Proj0020**

TEMPO PROC: **0,90 seg**

Estrutura

CAMADA	ESPESSURA m	DENSIDADE kgf/cm ³	POISSON	MODELO	K1	K2	K3	K4	MÓDULO MPa
1	0,05	0	0,3	3	0	0	0	0	3220
2	0,15	0	0,35	3	0	0	0	0	300
3	0,2	0	0,35	3	0	0	0	0	220
4	4,32	0	0,45	3	0	0	0	0	147

Carregamento

Tipo: **Eixo Rodoviário Padrão**

Pressão de Contato da Carga: **0,56** MPa

Raio da Área de Contato: **0,108** m

Resumo dos Resultados de Tensões e Deformações

Deflexão:	-32,17388 centésimo de mm	} → Satisfatório
Deformação Específica de Tração:	0,0001486	
Diferença de Tensões no Revestimento:	0,8225056 MPa	
Tensão Vertical no Subleito:	0,035856 MPa	
Tensão no Revestimento:	-0,3779342 MPa	
Tensão Vertical - 2 Rodas	0,052272 0,0571 MPa	

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal do estudo realizado foi o de prover, de forma objetiva e simplificada, a elaboração de um roteiro operacional que propicie a alternativa do agregado artificial de argila calcinada ao técnico que esteja em processo de análise dos materiais de pavimentação a serem empregados em seu empreendimento viário, principalmente se estiver em localidades de escassez de agregados naturais, ou nos casos de restrições ambientais à exploração das jazidas minerais rochosas.

A presente dissertação apresenta um compêndio sobre a origem e a evolução da tecnologia do agregado artificial de argila calcinada, bem como de outras alternativas que podem servir como agregados artificiais para a engenharia rodoviária, além de apresentar grande parte dos conceitos que estão relacionados com a pesquisa e a produção de um agregado proveniente de solos argilosos.

Apesar da parte teórica abarcar diferentes áreas do conhecimento da engenharia, devido ao fato dessa pesquisa mostrar-se multidisciplinar, espera-se que, através dos exemplos mostrados, sobretudo relacionados com a região do país em estudo, haja um entendimento dos principais parâmetros que exercem influência na obtenção de um agregado artificial de argila calcinada satisfatório, para emprego em pavimentação.

São então apresentadas a seguir, as principais conclusões a que se chegou, assim como as recomendações julgadas pertinentes, de modo a permitir uma avaliação global da gratificante pesquisa realizada durante cerca de dois anos de investigação experimental e teórica, norteadas pelos objetivos listados na introdução da presente dissertação.

6.2 CONCLUSÕES

► Conforme foi demonstrado no Capítulo 5, a metodologia sugerida (objetivo principal deste estudo) mostrou-se capaz de orientar a obtenção do agregado de argila calcinada, tendo ainda a vantagem de propor algumas linhas de ações

alternativas, caso ocorram respostas negativas durante todo o processo.

► Repara-se através da bibliografia pesquisada que algumas tentativas de agregados artificiais para tentar substituir o agregado pétreo na pavimentação, conseguem resolver apenas casos muito particulares, ou voltados de forma muito específica para determinada região onde possa ser encontrada a matéria-prima necessária à produção desse agregado em questão.

► Conforme foi relatado na revisão bibliográfica, a exploração dos agregados naturais, vem cada vez mais sendo considerada como um sério problema ao meio ambiente. Embora a alternativa do agregado de argila calcinada esteja empregando uma matéria-prima que é encontrada com relativa facilidade, devido a grande quantidade de ocorrências de solos argilosos, deve ser ratificado da mesma forma, que a exploração das jazidas de argila, devem ocorrer com um correto planejamento ambiental, inclusive com a recuperação de áreas degradadas.

► As faixas de aceitação sugeridas para os parâmetros estabelecidos na metodologia proposta evidenciam a facilidade de se encontrar jazidas de solos argilosos capazes de serem avaliadas como satisfatórias. De forma contrária ao que é observado para o agregado de argila expandida, não são necessárias características piro-expansivas na constituição química e mineralógica do solo argiloso. Ou seja, a procura por jazidas que atendam os requisitos do agregado de argila expandida, pode recair no mesmo problema, tal como a procura de jazidas de rochas na região norte do país.

► A análise da composição química e mineralógica da matéria-prima é de extrema relevância, não somente para atender as faixas de aceitação, mas também para prever algumas propriedades físicas do agregado a ser produzido, principalmente no tocante a sua resistência mecânica.

► Conforme pode ser observado na bibliografia e nos resultados registrados, o solo que apresenta composição química com um significativo teor de elementos fundentes, ou ainda de óxidos alcalinos, assim como a presença de argilominerais

do grupo das ilitas, caulinitas e montmorilonitas, pode propiciar a obtenção de um agregado com resistência mecânica adequado à pavimentação. A presença destes argilominerais e elementos químicos também exercem relativa influência na densificação e diminuição da porosidade e absorção dos corpos cerâmicos.

► A análise térmica (diferencial e termogravimétrica) constitui-se em uma ferramenta extremamente útil, para informar como deverá ser tratado termicamente o agregado a ser calcinado, independentemente do forno ou método utilizado. Além de ser um reconhecido método de identificação dos argilominerais presentes na matéria-prima, a análise térmica traz valiosas informações quanto ao “plano de queima” a ser adotado durante a calcinação do agregado, ou seja, quais são as faixas de temperaturas que determinam perda de massa, densificação do agregado, além de informar a partir de que ponto pode ser admitida uma taxa de elevação da temperatura com maior velocidade.

► Os três ensaios: análise química, térmica e mineralógica, de forma conjunta, são praticamente indispensáveis à avaliação da matéria-prima para produção do agregado de argila calcinada. Em termos econômicos, podem proporcionar significativas reduções no custo de produção do agregado através de uma gestão otimizada, como por exemplo, evitar que durante a fase de produção seja percebido que a matéria-prima que está sendo utilizada não é adequada.

► A observância de uma correta etapa de secagem, se possível através de uma unidade estufa, está diretamente relacionada com a qualidade e a resistência mecânica do agregado a ser produzido.

► A respeito do estudo específico sobre a porosidade e absorção do agregado de argila calcinada, os materiais que foram incorporados, por tentativa empírica, à massa cerâmica (carvão mineral moído, cal hidratada e óxido de potássio) não proporcionaram significativa redução da absorção de água. O aumento do tempo de queima, no patamar da temperatura de trabalho, também não proporcionou nenhuma redução desta característica para a matéria-prima testada. Apenas com o aumento da temperatura, foi possível observar uma brusca redução da absorção. Tal

fato, pode ser facilmente revelado pela análise térmica da matéria-prima.

▶ A taxa de absorção de água, pode servir como parâmetro para verificar se está havendo redução da porosidade do agregado cerâmico e/ou aumento da densidade aparente. A absorção de asfalto deve ser previamente avaliada por outros parâmetros, antes da execução do projeto de mistura asfáltica, até para que seja possível adequar a granulometria, em função das taxas de ligantes observadas. Duas formas de verificação desta absorção são os ensaios disponibilizados nos ANEXOS 8 e 9 (Método da Louisiana e Método de Rice).

▶ O modelo da usina móvel do DNER de fabricação do agregado de argila expandida pode ser perfeitamente adotado para a fabricação do agregado de argila calcinada, desde que sejam feitas as adaptações necessárias para a realização de todas as etapas observadas na metodologia proposta.

▶ A forma de calcinação em que o agregado após secagem é lançado ao forno para a queima já na temperatura final, não é apropriada. Mesmo que aparentemente haja um aumento na produtividade e redução nos custos com a queima, os ensaios de análise térmica comprovam que ocorrem diversas reações e transformações físico-químicas na matéria-prima durante o aquecimento gradual, que se não forem respeitadas podem ocasionar o surgimento de tensões que resultam em trincas, fissuras, aumento da porosidade, aumento da absorção e queda da resistência mecânica. Embora possam ser incluídas etapas de re-calcinação (que irá gerar não somente um custo de queima adicional, mas também outros custos operacionais no processo produtivo), os danos causados ao agregado fraturado não são completamente reversíveis, e a reduzida qualidade atingida com este agregado mesmo que re-calcinado não compensa a economia inicial.

▶ A hipótese de produção do agregado de argila calcinada em uma indústria cerâmica convencional, foi sendo consolidada durante as visitas realizadas em olarias. Sendo sugerida na metodologia, provou ser viável tecnicamente e vantajosa economicamente. O agregado obtido apresentou resultados de resistência mecânica similares e até superiores aos observados em uma amostra de agregado britado de

rocha do Rio de Janeiro. A partir da estimativa contábil desta produção experimental realizada em Santarém (PA), ficou demonstrado que a aquisição do m³ de brita na região, ultrapassa 100% do custo por m³ anotado na produção do “agregado de argila calcinada industrial”.

► Sobre a fase de emprego do agregado de argila calcinada industrial como material de pavimentação em mistura solo-agregado, novamente foi notado desempenho satisfatório habilitando-o a ser utilizado em camada de sub-base ou base, a partir da mistura com solo de subleito. O experimento também foi efetuado com a mistura deste mesmo solo com brita comercial do Rio de Janeiro, sob as mesmas condições (energia intermediária, mesma curva granulométrica e quantidade de 50% de solo na mistura), mas neste caso, uma relativa diferença foi observada no desempenho das duas misturas, que pode ser creditada à umidade ótima mais elevada na mistura com o agregado de argila, devido a sua característica mais absorvente em relação a brita.

► A moldagem de barras cilíndricas, foi considerada inadequada, por originar após britagem, um agregado com formato excessivamente lamelar. Por ocasião do beneficiamento dos agregados para a confecção das misturas asfálticas, julgou-se necessário inicialmente adequar em laboratório, a forma dos agregados. Não houve re-calcinação após esta “britagem” para preservar as características de resistência mecânica originais do agregado, além do fato de que o cozimento interno após a quebra, visualmente, mostrou-se uniforme.

► A mistura asfáltica que foi planejada para este estudo, foi elaborada para contemplar pela primeira vez, uma dosagem de concreto asfáltico cujo traço foi composto exclusivamente por agregados de argila calcinada industrial (inclusive como fíler) e apresentou resultados extremamente satisfatórios.

► Assim como a pesquisa anterior (BATISTA, 2004), o projeto de dosagem do concreto asfáltico foi baseado no método Marshall, sob as mesmas condições de: tipo de ligante asfáltico (CAP-20 da REDUC-RJ), granulometria (todos os percentuais iguais – Faixa B), cálculo da densidade dos agregados (Método da

Louisiana) e cálculo da densidade da mistura (densidade máxima teórica calculada - DMTC), no intuito de verificar o teor ótimo de ligante para um agregado com menor absorção, bem como os parâmetros de resistência à tração, módulo resiliente e estimativa da vida de fadiga.

► Além de ser obtido um teor ótimo de ligante 1% mais baixo do que o obtido por BATISTA (2004), foram constatados resultados superiores em todos os parâmetros mecânicos. Os resultados de resistência à tração e módulo resiliente, ambos à 25°C, atingiram valores muito próximos aos observados por PINTO (1991) em uma certa mistura elaborada com agregados naturais.

► A partir desta similaridade dos módulos de resiliência, foi possível realizar uma análise comparativa das curvas de fadiga obtidas por estas misturas. Apesar do concreto asfáltico elaborado com argila calcinada industrial apresentar vida de fadiga superior para menores diferenças de tensões ($\Delta\sigma$), foi notada uma relativa dispersão dos resultados obtidos em alguns níveis de tensão (10% e 40%), e conseqüentemente uma menor sensibilidade da curva de fadiga obtida, em que a partir do ponto de concorrência das duas curvas, mostra uma maior vida de fadiga para o concreto asfáltico com agregado natural, onde ocorrem as maiores diferenças de tensões.

► Foram apresentadas algumas “tentativas” para a obtenção do teor ótimo da mistura, variando o cálculo da densidade máxima teórica da mistura. Uma destas alternativas foi a verificação da densidade máxima teórica medida (DMM) por ensaio (Método de Rice). O método é considerado mais apropriado para misturas asfálticas com agregados porosos, e por este cálculo, o teor de vazios contido na mistura, seriam muito elevados se comparados aos valores especificados pela dosagem Marshall (3% a 5%). Outra alternativa foi feita com a DMTC convencionalmente a partir da média aritmética das densidades reais e aparentes dos agregados e foi a que mais se aproximou da DMM. Entretanto, caso seja tentado o enquadramento nos limites dos teores de vazios Marshall, o teor “ótimo” da mistura é atingido com taxas excessivas de ligante asfáltico.

► Com o resultado do ensaio de degradação após compactação Marshall, foi confirmada a capacidade de suporte do agregado produzido, inclusive com resultados também similares aos obtidos com a brita, comprovando a sua eficácia em relação aos agregados de rejeitos cerâmicos, que além do fato de serem rejeitos, durante a produção, não são produzidos com o intuito de servirem como agregados.

► As taxas de ligante obtidas com o agregado de argila calcinada (8% a 9%), aparentemente podem parecer excessivamente elevadas quando comparadas às observadas nos concretos asfálticos com o agregado natural (4% a 7%). O que deve ser lembrado e ratificado é a relação de massa e volume que diferem estas duas misturas em particular, e aí entende-se a espessura a ser observada na camada de revestimento do pavimento, que a princípio deve ser a mesma. Tomando como exemplo um corpo-de-prova Marshall convencional, em que para as misturas com a brita, observa-se em geral uma massa de 1.200g, já para o concreto asfáltico preparado com a argila calcinada, a massa que corresponde ao mesmo volume, é de aproximadamente 900g, incluindo o ligante asfáltico. Ou seja, uma taxa de 8% de ligante em um corpo-de-prova com argila calcinada ($900g \times 0,08 = 72g$), corresponde em peso à uma taxa de 6,7% ($72g \div 1.200g = 6,7\%$) de ligante em um corpo-de-prova com 1.200g, e com a mesma espessura.

► Seguindo este raciocínio, e supondo que esta taxa de 6,7% elevaria em 1% uma taxa média de concreto asfáltico com brita (5,7%), deve-se lembrar agora da relação de custos entre a aquisição da brita na região do estudo, e o custo atingido com a produção experimental, relação esta acima de 100%, já citada neste capítulo. Considerando ainda que os agregados correspondem, em peso, a mais de 90% de ambas misturas asfálticas em questão, é trivial concluir a vantagem financeira na adoção do concreto asfáltico de argila calcinada, lembrando terem sido atingidos resultados de desempenho similares nas duas misturas asfálticas.

► A análise numérica efetuada com o programa FEPAVE atestou os resultados atingidos nos ensaios de módulo e fadiga do concreto asfáltico elaborado com 100% de agregado de argila calcinada industrial. Isto ocorreu através de simulações comparativas com dados de BATISTA (2004) e PINTO (1991), onde verificou-se que

com o dimensionamento de pavimentos típicos da região em estudo, existe a possibilidade de se adotar exatamente, as mesmas espessuras se porventura o dimensionamento for simulado com um concreto asfáltico utilizando a brita como agregado.

► O resultado da análise numérica efetuada também com o FEPAVE, particularmente para o dimensionamento da BR-163, simulado a partir do tráfego conhecido, além de ser também verificada esta situação de equivalência estrutural entre os concretos asfálticos (com agregado natural ou com agregado de argila) foi verificada a possibilidade de eliminar a camada de reforço do subleito, inicialmente prevista, pelo método empírico de dimensionamento do DNER, baseado no ISC.

► Apesar da ampla vantagem financeira já explicada em relação à aquisição da brita pelo agregado de argila calcinada, as considerações feitas no cálculo estimativo proporcionaram uma majoração, e chegou-se a um custo médio estimativo de R\$ 45,00/m³. Segundo dados provenientes do proprietário da indústria responsável por esta produção experimental, vários são os fatores que são capazes de prover uma acentuada queda neste valor. Entre elas, cita-se a mudança do sistema de queima para a serragem que tornaria ínfimo o custo de aquisição de material combustível para a queima (restando apenas o seu frete) e a aquisição da matéria-prima que pode ocorrer a um custo mais reduzido.

► Além disso, apesar de não ter sido possível estimar a produtividade atingida com a pequena produção experimentada, também foi explicado pelo proprietário, que através das características operacionais de sua linha de produção, em que se destacam os fornos tipo túnel, os carros “vagões” e o sistema de deslocamento sob “trilhos”, torna-se perfeitamente adaptável a implantação do produto “Argila Calcinada Industrial” com uma produtividade (em m³/dia) similar a de uma usina pré-fabricada, sem afetar o funcionamento da produção convencional, principalmente pela atratividade que este produto, com qualidade técnica comprovada, iria proporcionar por ocasião da sua introdução como nova opção de mercado.

6.3 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

► A realização de novas aplicações, a exemplo do que foi mostrado no Capítulo 5, pode validar e fundamentar cada vez mais a metodologia proposta, e principalmente propor correções ou aperfeiçoamentos caso sejam identificados quaisquer erros conceituais ou experimentais.

► Assim como foi uma proposta desafiadora a tentativa acadêmica de realizar uma produção à nível industrial do agregado de argila calcinada até agora somente experimentado em nível laboratorial, a meta de se construir em curto ou médio prazo um trecho experimental com este material alternativo de pavimentação deve ser encarada com afinco e com caráter prioritário, para que seja possível propor esta solução à infra-estrutura de transportes dos diversos municípios da região norte do país e desta forma capacitar a execução de empreendimentos viários que de outra forma seriam economicamente inviáveis, devido a conhecida escassez de jazidas de materiais pétreos. A participação em projetos como a Operação Ricardo Franco promovida pelo Instituto Militar de Engenharia pode ser providencial para a realização deste objetivo.

► A evolução do estudo do agregado artificial de argila calcinada e sua utilização em misturas asfálticas, como também de outros agregados ditos “alternativos”, deve culminar com a elaboração ou proposta de norma que considere as particularidades destes agregados mais porosos e absorventes (citando como exemplo a normalização do agregado RCD), baseando-se principalmente na avaliação do desempenho atingido, assim como é observado nas normas francesas, em detrimento das normas que preconizam valores ou faixas de especificações de misturas que utilizam o agregado natural proveniente da britagem de rochas.

► Sugere-se continuar o estudo da diminuição da absorção com outros aditivos, desta vez mais especificamente observando a influência na absorção do ligante asfáltico. Verificar até que ponto a curva granulométrica ou a substituição de alguma fração por outro tipo de agregado (areia ou fíler) pode favorecer a diminuição da taxa de ligante.

► Cuidados especiais devem ser tomados com a questão da adesividade deste tipo de agregado ao ligante asfáltico. Recomenda-se o estudo relacionado ao dano pela umidade induzida (ASTM D 4867 – *Standard test method for effect of moisture on asphalt concrete paving mixtures*), para avaliar o efeito da adesividade agregado-ligante mesmo com o uso de dopes, e ao mesmo tempo a influência que um teor de vazios mais elevado pode ocasionar no desempenho das misturas asfálticas dosadas com agregados artificiais.

► Verificar o índice de degradação após a compactação das misturas solo-agregado e comparar com os valores atingidos pelos agregados naturais convencionais.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 8º BATALHÃO DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO - 8º BECnst. **Projeto de engenharia rodoviária. BR-163 Porto de Santarém – Serra Piquiatuba – Relatório Mensal Nº 01.** Santarém, 1978.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry - ATSDR. 2001. **Toxicological Profile for benzidine.** Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. Disponível: <http://www.atsdr.cdc.gov/tfacts62.html> [capturado em 10 dezembro 2003].
- ALBUQUERQUE, Alexandre Pedro Foradini de. **Influência da energia e da temperatura de compactação nas propriedades mecânicas dos concretos asfálticos.** 2005. 229 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, 2005.
- ALEXANDRE, Jonas. **Análise de matéria-prima e composições de massa utilizada em cerâmicas vermelhas.** 2000. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense - Campos dos Goytacazes (RJ), 2000.
- ALEXANDRE, Jonas. **Caracterização das argilas do município de Campos dos Goytacazes para utilização em cerâmicas vermelhas.** 1997. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense - Campos dos Goytacazes (RJ), 1997.
- ALEXANDRE, Jonas, OLIVEIRA, André L. L., RAMOS, I. **Avaliação do processo de queima em um forno modelo caieira.** In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 46º CBC, 2002a. São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2002. v. 1, p. 1744-1760.
- ALEXANDRE, Jonas, OLIVEIRA, André L. L., RAMOS, I. **Avaliação do processo de queima em um forno modelo Hoffmann.** In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 46º CBC, 2002b. São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2002. v. 1, p. 1588-1600.
- ALEXANDRE, Jonas, MAIA, Paulo C. de A., PINHEIRO, Aline D. **Avaliação da durabilidade de materiais cerâmicos da região de Campos dos Goytacazes.** In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 48º CBC, 2004a, Curitiba. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2004. Trabalho Nr. 5-27. [CD-ROM].
- ALEXANDRE, Jonas, TOLEDO, Romildo, SABOYA JÚNIOR, Fernando A., PEREIRA, Mário. **Utilização de planejamento em rede Simplex na previsão de propriedades mecânicas de peças cerâmicas vermelhas.** Cerâmica, Setembro 2001, v.47, n.303, p.170-174. ISSN 0366-6913

ALEXANDRE, Jonas, XAVIER, Gustavo de C., MANHÃES, André L. F., VIEIRA, Carlos M. F. **Incorporação da cal na massa de conformação de cerâmica vermelha**. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 48^o CBC, 2004b, Curitiba. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2004. Trabalho Nr. 5-11. [CD-ROM].

ALEXANDRE, Jonas, XAVIER, Gustavo de C., JÚNIOR, Milton P. S., TOLEDO, Rosane. **Uso de massas cerâmicas da região de Campos dos Goytacazes para fins artesanais**. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 48^o CBC, 2004c, Curitiba. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2004. Trabalho Nr. 5-08. [CD-ROM].

ALVARENGA, Jéus C. de Alencar. **Um estudo de avaliação estrutural e econômica de pavimentos flexíveis de escória de aciaria**. 2001. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

ÂNGULO, Sérgio C., **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 155p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.

ÂNGULO, Sérgio C., ZORDAN, Sérgio E., JOHN, Vanderley M. **Desenvolvimento Sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. São Paulo, 2001. Disponível: http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/artigo%20IV_CT206_2001.pdf [capturado em 01 dez. 2004].

ÂNGULO, Sérgio C. et al. Construction and demolition waste management in Brazil. **Waste Management World**. Março/Abril, 2003. p.54-57.

ANTON, Mijster. **Artificial stone or filler for the construction industry based on fly-ash**. 1984. Patent number: EP0102092. European Patent Office. Disponível: <http://v3.espacenet.com/origdoc?DB=EPODOC&IDX=EP0102092&F=0&QPN=EP0102092> [capturado em 20 setembro 2004].

AMORIM, Luciana Viana et al. Reciclagem de rejeitos da construção civil para uso em argamassas de baixo custo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.3, n.2, p.222-228, 1999. Disponível: <http://www.agriambi.com.br/revista/v3n2/222.pdf> [capturado em 01 dez. 2004]

ARANTES, José Luiz G., DAMASCENO, Benedito C., KREBS, Antônio S. J. **Projeto Argila – Belém**. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Departamento Nacional da Produção Mineral – 5^o Distrito Norte. Belém, 1972.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standard test method for effect of moisture on asphalt concrete paving mixtures**. ASTM D 4867, 1988.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures.** ASTM D 2041-00. 2000.

ASSOCIAÇÃO DE DESENVOLVIMENTO REGIONAL PARA CONCLUSÃO DA BR-163. **Comitê para desenvolvimento e conclusão da BR-163.** 1997. Disponível: <http://www.comitebr163.com.br> [capturado em 10 dez. 2003].

ASPHALT INSTITUTE. **Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types.** 2nd Edition. 3rd Printing. Manual Series N^o 2 (MS-2). College Park, Maryland, 1963. 177 p.

BATISTA, Fernando Gomes da Silva. **Caracterização física e mecânica dos agregados de argila calcinada produzidos com solos finos da BR-163/PA.** 2004. 159 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, 2004.

BENEVIDES, Sérgio Armando de Sá e. **Análise comparativa dos métodos de dimensionamento dos pavimentos asfálticos: empírico do DNER e da resiliência da COPPE/UFRJ em rodovias do estado do Ceará.** 2000. 176 p. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000.

BERNUCCI, Liedi Liégi Bariani. **Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego.** 1995. 237p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1995.

BUSTAMANTE, Gladstone M., BRESSIANI, José Carlos. **A indústria cerâmica brasileira.** Cerâmica Industrial, v. 5, n. 3, p. 31-36, Maio/Junho 2000.

CAMPELO, Nilton de S., SEYE, O., SANTOS, E.C.S., HORBE, A.C., ARAGÃO, A.F., PINHEIRO, S.C., CABRAL, E.M. **Ensaio tecnológicos em cerâmica vermelha do pólo cerâmico dos municípios de Iranduba e Manacapuru.** In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 48^o CBC, 2004, Curitiba. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2004. Trabalho Nr. 5-41. [CD-ROM].

CARBONÍFERA METROPOLITANA S/A. **Relatório de caracterização física do carvão mineral especial.** Relatório Nr. 98D021 – Centro de Tecnologia Cerâmica. Criciúma – SC, 1998.

CASTELO BRANCO, Verônica Teixeira Franco. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado.** 2004. 135 p. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

- CERÂMICA ESTRUTURAL. 2005. Pólo Produções. Disponível: http://www.poloceramico.com.br/ler_ce.php?ler_materia=sim&materia_id. [capturado em 03 jan. 2005].
- CHAGAS, Luís Cláudio de Matos. **Estudo do comportamento mecanístico de solos da região amazônica e seu inter-relacionamento com suas propriedades físicas e mecânicas**. 2004. 229 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, 2004.
- CINASITA. Histórico. Disponível: <http://www.cinasita.com.br/historic/index.htm>. [capturado em 03 dez. 2004].
- CINEXPAN. Produtos. Disponível: <http://www.cinexpan.com.br>. [capturado em 03 dez. 2004].
- COSIPA. Catálogo Técnico, 2004. Disponível: <http://www.cosipa.com.br/Pagina/0,1574,17-767-3567,00.html> [capturado em 15 out. 2004]
- COSTA, F.W.A, Silva M.A.V. da, MELLO, M.A. **Agregado de argila calcinada da Amazônia: análise dos parâmetros de fadiga e resiliência em misturas asfálticas**. 2000. Projeto de Fim de Curso – Instituto Militar de Engenharia, 2000.
- DAFICO, Dario de Araújo. **Estudo da dosagem do concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da casca de arroz**. 2001. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- DIAS, João Fernando. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo**. 2004. 263p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004.
- DIAS, João Fernando, AGOPYAN, V., BERNUCCI, L.L.B., SILVA, T.J. da. **Procedimento alternativo para otimizar misturas de solo-agregado**. In: Reunião Anual de Pavimentação, 35ª RAPv, 2004, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2004. Trabalho Nr. 100. [CD-ROM].
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Normas diversas tipo método de ensaio**. Disponível: <http://www.dnit.gov.br/ipr/normas/metodo.htm> [capturado 2004]
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Pesquisa de viabilidade de implantação da fábrica de argila expandida na região amazônica – Relatório Final**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – Divisão de Pesquisa. Rio de Janeiro, 1981.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **Pesquisa de viabilidade de implantação da fábrica de argila expandida na região amazônica – Relatório Parcial Nº 2.** Instituto de Pesquisas Rodoviárias – Divisão de Pesquisa. Rio de Janeiro, 1980.
- FABRÍCIO, João Menescal. **Desenvolvimento da usina protótipo móvel para fabricação de agregados de argila.** In: Reunião Anual de Pavimentação, 21^a RAPv, 1986, Salvador. Anais... Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 1986. v. 1, p. 150-188.
- FROTA, Consuelo A. da, NUNES, Fábio R. G., SILVA, Cleudinei L. da. **Estudo da substituição do seixo por agregados sintéticos de argila calcinada em misturas asfálticas.** In: Reunião de Pavimentação Urbana, 12^a RPU, 2003, Aracaju. Anais... Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2003. [CD-ROM].
- FROTA, Consuelo A. da, SILVA, Cleudinei L., SANTOS, Maria das G. R., SILVA, Robson V. P. da. **Caracterização de solos para obtenção de agregado sintético de argila calcinada.** In: Reunião Anual de Pavimentação, 35^a RAPv, 2004, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2004. Trabalho Nr. 022. [CD-ROM].
- FUNDAÇÃO DE TECNOLOGIA DO ESTADO DO ACRE - FUNTAC. **Diagnóstico das indústrias cerâmicas de Rio Branco.** Rio Branco: FUNTAC, 1990. 53 p.
- FUNDAÇÃO DE TECNOLOGIA DO ESTADO DO ACRE - FUNTAC. **Projeto pedra de barro – Análise de viabilidade técnica e econômica.** Versão preliminar. Rio Branco: FUNTAC, 2001. 63 p.
- GRIM, Ralph E. **Applied clay mineralogy.** New York: McGraw-Hill Book Company, 1962. 422 p. il.
- GÜNTHER, W.M.R. **Minimização de resíduos e educação ambiental.** In: Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública, 7^o, 2000, Curitiba. Anais... Curitiba, 2000.
- HENDRICKS, C.F. **Certification system for aggregates produced from building waste and demolished buildings.** In: Environmental aspects of construction with waste materials, 1994. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 821-834.
- JOHN, Vanderley Moacyr. **Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil.** In: Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, 1999, São Paulo. Anais... São Paulo: IBRACON, 1999. v.2, p.44-55.
- JOHN, Vanderley Moacyr. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** 2000. 102p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.

- JUNIOR, Philip Arena. **Expanded clay hot mix study – final report**. Louisiana Department of Highways. Research and Development Section. In: Research Report Nº 37. Louisiana, 1969.
- KANDHAL, Prithvi S., KHATRI, Maqbool A. **Evaluation of asphalt absorption by mineral aggregates**. National Center for Asphalt Technology. NCAT Report Nº 91-4, Auburn University, Alabama, 1991.
- KANDHAL, Prithvi S., KHATRI, Maqbool A. **Improved rice method for determining theoretical maximum specific gravity of asphalt paving mixtures**. National Center for Asphalt Technology. NCAT Report Nº 92-3, Auburn University, Alabama, 1992.
- KINNIBURGH, William. **Improvements in and relating to the production of expanded clay**. 1961. Patent number: GB862723. European Patent Office. Disponível:
<http://v3.espacenet.com/origdoc?DB=EPODOC&IDX=GB862723&F=0&QPN=GB862723> [capturado em 09 setembro 2004].
- LEE, Dah-Yinn, KANDHAL, Prithvi S., GUINN, James A., DUNNING, Robert L. **Absorption of asphalt into porous aggregates**. Strategic Highway Research Program. SHRP-A/UIR-90-009, National Research Council, Washington, D.C., 1990.
- LOUISIANA DEPARTMENT OF HIGHWAYS – LDH. **Determination of specific gravity of coarse lightweight aggregate**. LDH TR-312-69.
- MACGLASHAN, William F. **Improvements in and relating to aggregates for concrete or other cementitious masses**. 1935. Patent number: GB429015. European Patent Office. Disponível:
<http://v3.espacenet.com/origdoc?DB=EPODOC&IDX=GB429015&F=8&QPN=GB429015> [capturado em 08 setembro 2004].
- MACHADO, Alexandre T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. 2000. 135p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.
- MARQUES, Geraldo Luciano de O. **Procedimentos de avaliação e caracterização de agregados minerais usados na pavimentação asfáltica**. 2001. 1º Seminário de Qualificação Acadêmica ao Doutorado - COPPE/UFRJ, 2001.
- MAURÍCIO, Ronaldo da C., MOL, A. C., PEREIRA FILHO, J. C. **Panorama do Setor de Cerâmica Vermelha para Construção Civil no Estado do Rio de Janeiro**. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 48º CBC, 2004a, Curitiba. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2004. Trabalho Nr. 5-42. [CD-ROM].

- MAURÍCIO, Ronaldo da C., MOL, A. C., PEREIRA FILHO, J. C. **Perfil do pólo produtor de cerâmica vermelha para construção civil de Campos dos Goytacazes**. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 48^o CBC, 2004b, Curitiba. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2004. Trabalho Nr. 5-63. [CD-ROM].
- MÁS, Edgard. **Qualidade e tecnologia em cerâmica vermelha**. Apostila 5 – Custos, qualidade, valor agregado e serviços. Criciúma: Editora Pólo Produções Ltda, 2002. 50 p. il.
- MEDINA, Jacques de. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997. 380 p. il.
- MEHTA, P.K. **Rice husk ash - A unique supplementary cementing material**. In: Advances in concrete technology. Canmet. Ottawa, 1992, p. 407-431.
- MENEZES, Romualdo R., FERREIRA, Heber S., NEVES, Gelmires de A., FERREIRA, Heber C. **Caracterização de argilas plásticas do tipo "ball clay" do litoral paraibano**. Cerâmica, Setembro 2003, v.49, n.311, p.120-127. ISSN 0366-6913.
- MENEZES, Romualdo R., NEVES, Gelmires de A. FERREIRA, Heber C. **O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2002, v.6, n.2, p.303-313.
- MESSIAS, Laiete Soto, **Recuperação de gases quentes em fornos intermitentes. Aplicação na indústria de cerâmica estrutural**. Cerâmica Industrial, v. 1, n. 2, p. 31-37, Maio/Junho, 1996.
- MILLOT, Georges. **Géologie des argiles**. Altérations, sédimentologie, géochimie. Paris: Masson et C^{ie} Éditeurs, 1964. 499 p. il.
- MINERAIS DO PARANÁ S.A. - MINEROPAR. **Caracterização tecnológica de materiais cerâmicos**. Disponível: <http://www.pr.gov.br/mineropar/htm/rocha/materias.html> [capturado em 09 jun. 2004]
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balço Energético Nacional - BEN**. 2003. Ministério de Minas e Energia. Disponível: <http://200.198.223.12/ben/> [capturado em 10 jan. 2005]
- MORENO, H. **O foco ambientalista da construção civil**. In: Seminário Materiais & Design – Interface no desenvolvimento do produto, 1998, São Carlos. Anais... São Paulo: FIESP, SEBRAE, 1998. p.174-182.

- MOTTA, José Francisco M., ZANARDO, Antenor, JÚNIOR, Marsis C. **As matérias-primas cerâmicas. Parte I: O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos.** Cerâmica Industrial, v. 6, n. 2, p. 28-39, Março/Abril 2001.
- MOTTA, José Francisco M., ZANARDO, Antenor, JÚNIOR, Marsis C., TANNO, Luiz C. **As matérias-primas cerâmicas. Parte II: Os minerais industriais e as massas da cerâmica tradicional.** Cerâmica Industrial, v. 7, n. 1, p. 33-40, Janeiro/Fevereiro 2002.
- MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas.** 1991. 382 p. Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1991.
- MOTTA, Laura Maria Goretti da., TONIAL, Ilonir, LEITE, Leni M., CONSTANTINO, Rômulo S. **Princípios do projeto e análise Superpave de misturas asfálticas.** Tradução comentada. 1996. Petrobrás, 1996.
- MOORE, William M. **Fired-clay aggregates for use in flexible bases.** Texas Highway Department – THD. Research Report Nº 81-12. Synthetic Aggregate Research. Study 2-8-65-81. Colei Station: Texas Transportation Institute, 1969.
- NARDI, José Vidal. **Cinza: uma alternativa na construção de pavimentos – noções gerais.** In: Reunião Anual de Pavimentação, 23^a RAPv, 1988, Florianópolis. Anais... Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 1998. v. 1, p. 287-310.
- NASCIMENTO, Ricardo Ribeiro do. **Soluções para pavimentação com o agregado de argila calcinada em Rio Branco (AC).** 2005. 155 p. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
- NERI, Judas T. da C. F. **Gás natural – um enfoque sobre o projeto cerâmicas do CTGÁS.** Centro de Tecnologias do Gás - CTGÁS, 2003. Disponível: http://www.ctgas.com.br/tecnologia/um_enfoque_sobre_o_projeto_ceramicas_do_ctgas.pdf [capturado em 09 dez. 2004]
- NERI, Judas T. da C. F., SILVA, Wellington P. da, SANTOS, Zanoni T. S. dos, MEDEIROS, Gilson G. de. **Conversão de fornos cerâmicos para gás natural – a experiência do CTGÁS no Rio Grande do Norte.** In: Rio Oil & Gas Conference, 2000, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2000.
- NETO, Carlos S. S., REZENDE, Nélio das G. de A. da M. **Características das argilas utilizadas na cerâmica vermelha em Santarém.** Programa de integração mineral em municípios da Amazônia. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM. Superintendência Regional de Belém, 1997.

- NORTON, Frederick Harwood. **Introdução à tecnologia cerâmica**. São Paulo: Edgar Blücher, Ed. da Universidade de São Paulo, 1973. 324p. il.
- NÚCLEO DE INFORMAÇÃO EM CERÂMICA DO CEARÁ - NICE. **Diagnóstico industrial setorial de cerâmica da região do município de Russas (CE)**. 2002. Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial – NUTEC, Governo do Estado do Ceará. Disponível: <http://orion.nutec.ce.gov.br/nice/diagnosticodeceramica/diagnostico.htm> [capturado em 15 set. 2004]
- ODEMARK, Sven Nils. **Estudos das propriedades elásticas dos solos e do dimensionamento de pavimentos de acordo com a teoria da elasticidade**. Boletim Técnico Nº 14. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 1995. 66 p.
- OLIVEIRA, Antônio P. N. de, MONTEDO, Oscar R. K., PIZETE, Joselito, CASAGRANDE, Marcos. **Matérias-primas empregadas na fabricação de tijolos e blocos de construção: características e influência sobre as propriedades do produto final**. 2003 Centro de Tecnologia Cerâmica - SENAI – Criciúma. Disponível: <http://www.ctc.org.br/Artigos/TijolosBlocos.PDF> [capturado em 17 mar. 2004].
- PATRIOTA, Marcelo de B., MOTTA, Laura Maria G. da, FILHO, Ivaldo D. da S. P. **Efeito da adição de borracha reciclada de pneus pelo processo seco à mistura asfáltica tipo CBUQ**. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, XVIII ANPET, 2004, Florianópolis. Anais... Rio de Janeiro: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2004. v. 1, p. 65-76.
- PINTO, Salomão. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. 1991. 478 p. Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1991.
- PINTO, Salomão. **Materiais pétreos e concreto asfáltico: conceituação e dosagem**. Rio de Janeiro: SMA do Instituto Militar de Engenharia, 2003. 82 p. il.
- PINTO, Salomão, PREUSSLER, Ernesto Simões. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 2 ed. Rio de Janeiro: Copiadora e Artes Gráficas Ltda., 2002. 269 p. il.
- PINTO, Salomão, MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Catálogo de curvas de fadiga**. Boletim Técnico Nº 16. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 1995. 20 p.
- PINTO, T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1999.

- PRACIDELLI, Sebastião, MELCHIADES, Fábio G. **Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha**. Cerâmica Industrial, v. 2, n. 12, p. 31-35, Janeiro/Abril 1997.
- PRETZ, Ricardo. **Potencial bioenergético do setor arrozeiro do Rio Grande do Sul: uma abordagem termelétrica**. 2001. 78p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S. e BROWN, E. R.; LEE D. Y. e KENEDY T. W. **Hot mix asphalt materials, mixture design and construction**. NAPA Research and Education Foundation, Lanham, Maryland, 2nd edition, 1996.
- ROCHA, Janaíde Cavalcante et al. **Reaproveitamento das cinzas pesadas do complexo Jorge Lacerda na elaboração de materiais de construção: aspectos tecnológicos e ambientais**. In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, XV SNPTEE, 1999, Foz do Iguaçu. Disponível: http://www.xviiisnp tee.com.br/acervo_tecnico/memoria/xv/grupoii/gpt04.pdf [capturado em 10 outubro 2004].
- SCHWARTZKOPFF, Hugo. **Concretes with burnt clay particles as an aggregate**. 1937. Patent number: GB465318. European Patent Office. Disponível: <http://v3.espacenet.com/origdoc?DB=EPODOC&IDX=GB465318&F=8&QPN=GB465318> [capturado em 08 setembro 2004].
- SECRETARIA DE ESTADO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, DAS MINAS E ENERGIA DO GOVERNO DO ESTADO DE SANTA CATARINA - SECTME. **Diagnóstico do setor de cerâmica vermelha em Santa Catarina**. Relatório, Florianópolis: SECTME, 1990. 58 p.
- SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL – SENAI. **Curso de tecnologia em cerâmica vermelha**. 1999. Departamento Regional do Piauí - Centro de Tecnologia da Cerâmica. SENAI-PI, Teresina.
- SILVA, Prepredigna Delmiro Elga Almeida da. **Contribuição para o aperfeiçoamento do emprego do programa FEPAVE2 em estudos e projetos de pavimentos flexíveis**. 1995. 127 p. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1995.
- SOARES, Sebastião R., JÚNIOR, Armando B. de C., MARTINS, Andreza, BREITENBACH, Francine E., LUPATINI, Giancarlo. **Análise do Ciclo de Vida de Produtos (revestimento, blocos e telhas) do Setor Cerâmico da Indústria de Construção Civil. Relatório Parcial I/IV**. 2002. Engenharia Sanitária-Ambiental - Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- SOARES, A.L.C.P, BATISTA, F.G.S., CABRAL, G. da L.L, **Estudo da viabilidade técnica do agregado de argila calcinada para a pavimentação da Amazônia**. 1998. Projeto de fim de curso - Instituto Militar de Engenharia, 1998.

- SOUTHERN LIGHTWEIGHT AGGREGATE CORPORATION. **A method and apparatus for the production of lightweight aggregate.** 1957. Patent number: GB 786500. European Patent Office. Disponível: <http://v3.espacenet.com/origdoc?DB=EPODOC&IDX=GB786500&F=0&QPN=GB786500> [capturado em 09 setembro 2004].
- SOUZA, W. B. N., SILVA, E. C., GOMES, Uílame U. **Caracterização de Argilas e de Produtos de Cerâmica Vermelha oriundos do município de São Gonçalo do Amarante (RN).** In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 48^o CBC, 2004, Curitiba. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2004. Trabalho Nr. 5-07. [CD-ROM].
- SOUZA SANTOS, Pérsio de. **Ciência e tecnologia das argilas.** 2. ed. rev. atual. Volume 1. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1989. 496 p. il.
- SOUZA SANTOS, Pérsio de. **Ciência e tecnologia das argilas.** 2. ed. rev. atual. Volume 2. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1992a. 365 p. il.
- SOUZA SANTOS, Pérsio de. **Ciência e tecnologia das argilas.** 2. ed. rev. atual. Volume 3. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1992b. 235 p. il.
- TEXAS HIGHWAY DEPARTMENT – THD. **A recommended synthetic coarse aggregate classification system.** 1969.
- TEXAS HIGHWAY DEPARTMENT – THD. **Use of lightweight aggregates.** Research Reports 51-1 to 51-4. Project 2-14-63-51, 1951.
- VALVERDE, Fernando Mendes. **Balanco mineral brasileiro 2001 – agregados para construção civil.** Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção (ANEPAC). São Paulo, 1997. Disponível: http://www.dnpm.gov.br/dnpm_legis/Balan%C3%A7o01/pdf/agregados.pdf [capturado em 15 maio 2004].
- VIEIRA, Álvaro. **Agregados de argila calcinada: produção e utilização em pavimentação rodoviária na região amazônica.** 2000. 1^o Seminário de qualificação acadêmica ao doutorado - COPPE/UFRJ, 2000.
- VIEIRA, Álvaro. **Agregados de argila calcinada: uma alternativa para a pavimentação rodoviária na região amazônica.** In: Reunião Anual de Pavimentação, 32^a RAPv, 2000, Brasília. Anais... Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2000. v. 1, p. 62-73.
- VIEIRA, Álvaro, LIMA, Maria José C. P. A. **Curso de tecnologia de solos.** Apostila - Convênio IME–DNER. Volumes 1 e 2. Instituto Militar de Engenharia, 1998.
- VIEIRA, Carlos M. F., FEITOSA, Hygina S., MONTEIRO, Sérgio N. **Avaliação da secagem de cerâmica vermelha através da curva de Bigot.** 2003a. Cerâmica Industrial, v. 8, n. 2, p. 42-46, Janeiro/Fevereiro, 2003.

- VIEIRA, Carlos M. F., FEITOSA, Hygina S., MONTEIRO, Sérgio N. **Efeito da adição de argila fundente ílítica em cerâmica vermelha de argilas caulínicas.** 2004a. Cerâmica, Setembro 2004, v.50, n.315, p.239-246. ISSN 0366-6913
- VIEIRA, Carlos M. F., HOLANDA, José N. F. de, PINATTI, Daltro G. **Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes – RJ.** Cerâmica, Março 2000, v.46, n.297, p.14-17. ISSN 0366-6913.
- VIEIRA, Carlos M. F., SOARES, Tatiane M., MONTEIRO, Sérgio N. **Massas cerâmicas para telhas: características e comportamento de queima.** 2003b. Cerâmica, Dezembro 2003, v.49, n.312, p.245-250. ISSN 0366-6913
- VIEIRA, Carlos M. F., SOARES, Tatiane M., MONTEIRO, Sérgio N. **Utilização de granito em massa cerâmica para telhas.** 2004b. Cerâmica Industrial, v. 9, n. 1, p. 28-32, Janeiro/Fevereiro, 2004.
- WU, Yiping, PARKER, Frazier, KANDHAL, Ken. **Aggregate toughness/abrasion resistance and durability/soundness tests related to asphalt concrete performance in pavements.** National Center for Asphalt Technology. NCAT Report N^o 98-4, Auburn University, Alabama, 1998.
- YAMAMOTO, J.K. et al. Environmental impact reduction on the production of blended portland cement in Brazil. **Environmental Geosciences**, v. 4, n. 4, p. 192-206, 1997.
- YAWATA CHEMICAL INDUSTRY CO. LTD. **Method and apparatus for producing light weight aggregate by utilizing slag.** 1966. Patent number: GB1048294. European Patent Office. Disponível: <http://v3.espacenet.com/origdoc?DB=EPODOC&IDX=GB1048294&F=0&QPN=GB1048294> [capturado em 08 setembro 2004].

8 APÊNDICES

8.1 APÊNDICE 1: FICHAS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS



APÊNDICE 1: Caracterização do solo

EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FORTIFICAÇÃO E CONSTRUÇÃO (SE/2)

FICHA Nº 01

ORIGEM: Santarém (PA)	OPERADOR: Cap Lima
INTERESSADO: Cap Lima	DATA: 11 Fev 04
AMOSTRA: 03 - ESCURA	VISTO:

Amostra Total Seca		Umidade Higroscópica		Resumo Granulometria			
Amostra Total Úmida (g)	1.500,00	Peso Cápsula Nr. 109 (g)	77,98	Pedregulho		Areia Fina	
Retido nr. 10 (g)		Cápsula e Solo Úmido (g)	156,26	Acima 4,8 mm		0,42 - 0,05 mm	13,77
Passando Nr. 10 Úmida (g)	1.500,00	Cápsula e Solo Seco (g)	150,88	Areia Grossa		Silte	
Água (g)	103,09	Solo Seco (g)	72,90	4,8 - 2,0 mm		0,05 - 0,005 mm	12,82
Passando Nr. 10 Seca (g)	1.396,91	Água (g)	5,38	Areia Média		Argila	
Amostra Total Seca (g)	1.396,91	Umidade Higroscópica(%)	7,38	2,0 - 0,42 mm	0,35	Abaixo 0,005mm	73,06
		Fator de Correção	0,9313	Total			100,00

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA TOTAL (AT)

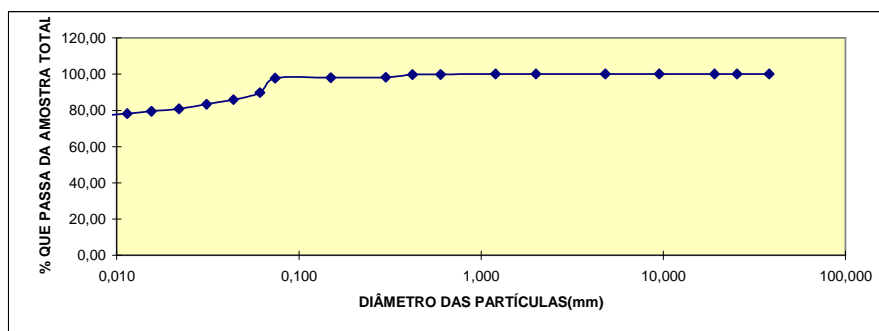
Peneiras	Material Retido			% Que Passa Amostra Total	Peneiras (mm)
	Peso (g)	% Amostra Total	% Acumulada		
1 1/2 pol				100,00	38,10
1 pol				100,00	25,40
3/4 pol				100,00	19,10
3/8 pol				100,00	9,50
Nr. 4				100,00	4,80
Nr. 10				100,00	2,00
Total Ret. #10					

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL (AP)

Peneiras	Material Retido			% Que Passa		Peneiras (mm)
	Peso (g)	% Amostra Total	% Acumulada	Amostra Parcial	Amostra Total	
Nr. 16				100,00	100,00	1,2
Nr. 30	0,12	0,18	0,18	99,82	99,82	0,6
Nr. 40	0,11	0,17	0,35	99,65	99,65	0,42
Nr. 50	0,90	1,38	1,73	98,27	98,27	0,3
Nr. 100	0,20	0,31	2,04	97,96	97,96	0,15
Nr. 200	0,11	0,17	2,21	97,79	97,79	0,074

SEDIMENTAÇÃO

Tempo Decorrido (min)	Leitura Densímetro	Temperatura (Celsius)	Correção	Densímetro Nr. 1			
				Leitura Corrigida	Altura de Queda (cm)	% Que Passa Amostra Total	Diâmetros Partículas(mm)
0,5	37,5	26	-2,5	35,0	11,90	89,72	0,0611
1,0	36,0	26	-2,5	33,5	12,20	85,88	0,0437
2,0	35,0	26	-2,5	32,5	12,40	83,31	0,0312
4,0	34,0	26	-2,5	31,5	12,30	80,75	0,0219
8,0	33,5	26	-2,5	31,0	12,30	79,47	0,0155
15,0	33,0	26	-2,5	30,5	12,50	78,19	0,0114
30,0	32,5	25	-2,5	30,0	12,60	76,91	0,0081
60,0	31,0	25	-2,5	28,5	12,90	73,06	0,0058
240,0	29,5	26	-2,5	27,0	13,20	69,22	0,0029
1.500,0	28,0	24	-2,95	25,1	13,50	64,22	0,0012





APÊNDICE 1: Caracterização do solo

EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FORTIFICAÇÃO E CONSTRUÇÃO (SE/2)

FICHA Nº 02

ORIGEM: Santarém (PA)	OPERADOR: Cap Lima
INTERESSADO: Cap Lima	DATA: 11 Fev 04
AMOSTRA: 09 - CLARA	VISTO:

Amostra Total Seca		Umidade Higroscópica		Resumo Granulometria			
Amostra Total Úmida (g)	1.500,00	Peso Cápsula Nr. 115 (g)	76,64	Pedregulho		Areia Fina	
Retido nr. 10 (g)	1,29	Cápsula e Solo Úmido (g)	126,64	Acima 4,8 mm	0,07	0,42 - 0,05 mm	31,58
Passando Nr. 10 Úmida (g)	1.498,71	Cápsula e Solo Seco (g)	124,99	Areia Grossa		Silte	
Água (g)	49,46	Solo Seco (g)	48,35	4,8 - 2,0 mm	0,02	0,05 - 0,005 mm	4,86
Passando Nr. 10 Seca (g)	1.449,25	Água (g)	1,65	Areia Média		Argila	
Amostra Total Seca (g)	1.450,54	Umidade Higroscópica(%)	3,41	2,0 - 0,42 mm	1,55	Abaixo 0,005mm	61,92
		Fator de Correção	0,9670	Total			100,00

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA TOTAL (AT)

Peneiras	Material Retido			% Que Passa Amostra Total	Peneiras (mm)
	Peso (g)	% Amostra Total	% Acumulada		
1 1/2 pol				100,00	38,10
1 pol				100,00	25,40
3/4 pol				100,00	19,10
3/8 pol				100,00	9,50
Nr. 4	0,96	0,07	0,07	99,93	4,80
Nr. 10	0,33	0,02	0,09	99,91	2,00
Total Ret. #10	1,29				

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL (AP)

Amostra Parcial (Ph) = 70

Amostra seca parcial = 67,69

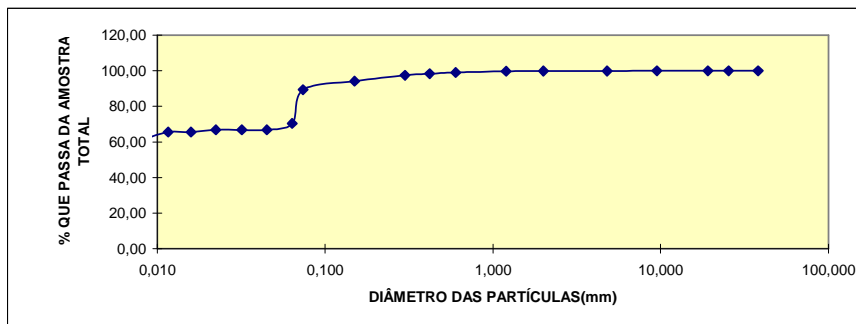
Peneiras	Material Retido			% Que Passa Amostra Parcial	% Que Passa Amostra Total	Peneiras (mm)
	Peso (g)	% Amostra Total	% Acumulada			
Nr. 16	0,13	0,19	0,19	99,81	99,72	1,2
Nr. 30	0,47	0,69	0,89	99,11	99,03	0,6
Nr. 40	0,45	0,66	1,55	98,45	98,36	0,42
Nr. 50	0,60	0,89	2,44	97,56	97,48	0,3
Nr. 100	2,25	3,32	5,76	94,24	94,15	0,15
Nr. 200	3,24	4,79	10,55	89,45	89,37	0,074

SEDIMENTAÇÃO

Densidade dos Grãos 2,55

Densímetro Nr. 1

Tempo Decorrido (min)	Leitura Densímetro	Temperatura (Celsius)	Correção	Leitura Corrigida	Altura de Queda (cm)	% Que Passa Amostra Total	Diâmetros Partículas(mm)
0,5	31,5	26	-2,5	29,0	13,30	70,42	0,0638
1,0	30,0	26	-2,5	27,5	13,30	66,78	0,0451
2,0	30,0	26	-2,5	27,5	13,30	66,78	0,0319
4,0	30,0	26	-2,5	27,5	13,10	66,78	0,0224
8,0	29,5	26	-2,5	27,0	13,20	65,56	0,0159
15,0	29,5	26	-2,5	27,0	13,20	65,56	0,0116
30,0	28,0	26	-2,5	25,5	13,50	61,92	0,0083
60,0	28,0	26	-2,5	25,5	13,50	61,92	0,0059
240,0	27,5	26	-2,5	25,0	13,60	60,71	0,0029
1.500,0	23,5	26	-2,5	21,0	14,50	50,99	0,0012





APÊNDICE 1: Caracterização do solo

EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FORTIFICAÇÃO E CONSTRUÇÃO (SE/2)

FICHA Nº 03

ORIGEM: Santarém (PA)	OPERADOR: Cap Lima
INTERESSADO: Cap Lima	DATA: 17 Fev 04
AMOSTRA: Mistura sem adição	VISTO:

Amostra Total Seca		Umidade Higroscópica		Resumo Granulometria			
Amostra Total Úmida (g)	2.400,00	Peso Cápsula Nr. 115 (g)	56,50	Pedregulho Acima 4,8 mm		Areia Fina 0,42 - 0,05 mm	27,45
Retido nr. 10 (g)	0,92	Cápsula e Solo Úmido (g)	106,50	Areia Grossa 4,8 - 2,0 mm	0,04	Silte 0,05 - 0,005 mm	8,30
Passando Nr. 10 Úmida (g)	2.399,08	Cápsula e Solo Seco (g)	104,76	Areia Média 2,0 - 0,42 mm	1,39	Argila Abaixo 0,005mm	62,82
Água (g)	83,49	Solo Seco (g)	48,26	Fator de Correção	0,9652	Total	100,00
Passando Nr. 10 Seca (g)	2.315,59	Água (g)	1,74				
Amostra Total Seca (g)	2.316,51	Umidade Higroscópica(%)	3,61				

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA TOTAL (AT)

Peneiras	Material Retido			% Que Passa Amostra Total	Peneiras (mm)
	Peso (g)	% Amostra Total	% Acumulada		
1 1/2 pol				100,00	38,10
1 pol				100,00	25,40
3/4 pol				100,00	19,10
3/8 pol				100,00	9,50
Nr. 4				100,00	4,80
Nr. 10	0,92	0,04	0,04	99,96	2,00
Total Ret. #10	0,92				

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL (AP)

Amostra Parcial (Ph) = 70

Amostra seca parcial = 67,56

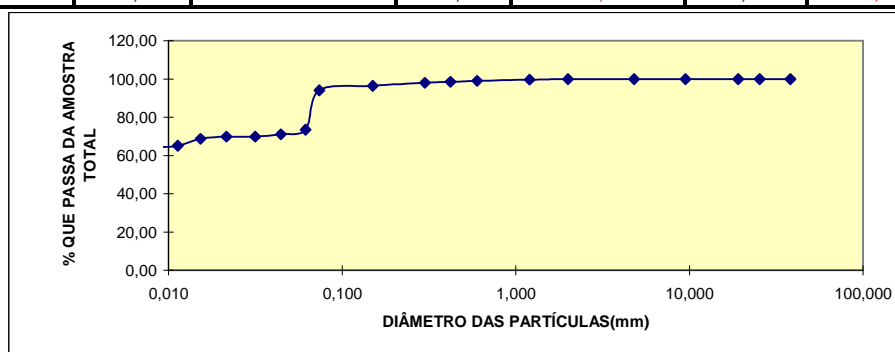
Peneiras	Material Retido			% Que Passa Amostra Parcial	% Que Passa Amostra Total	Peneiras (mm)
	Peso (g)	% Amostra Total	% Acumulada			
Nr. 16	0,19	0,28	0,28	99,72	99,68	1,2
Nr. 30	0,41	0,61	0,89	99,11	99,07	0,6
Nr. 40	0,34	0,50	1,39	98,61	98,57	0,42
Nr. 50	0,31	0,46	1,85	98,15	98,11	0,3
Nr. 100	1,10	1,63	3,48	96,52	96,48	0,15
Nr. 200	1,64	2,43	5,91	94,09	94,06	0,074

SEDIMENTAÇÃO

Densidade dos Grãos 2,66

Densímetro Nr. 32

Tempo Decorrido (min)	Leitura Densímetro	Temperatura (Celsius)	Correção	Leitura Corrigida	Altura de Queda (cm)	% Que Passa Amostra Total	Diâmetros Partículas(mm)
0,5	33,5	26	-2,5	31,0	12,90	73,49	0,0615
1,0	32,5	26	-2,5	30,0	13,50	71,12	0,0445
2,0	32,0	26	-2,5	29,5	13,60	69,94	0,0316
4,0	32,0	26	-2,5	29,5	12,70	69,94	0,0216
8,0	31,5	26	-2,5	29,0	12,80	68,75	0,0153
15,0	30,0	26	-2,5	27,5	13,10	65,20	0,0113
30,0	29,5	25	-2,5	27,0	13,20	64,01	0,0080
60,0	29,0	25	-2,5	26,5	13,30	62,82	0,0057
240,0	26,0	26	-2,5	23,5	14,00	55,71	0,0029
1.500,0	22,5	26	-2,5	20,0	14,70	47,41	0,0012



8.2 APÊNDICE 2: RELATÓRIOS E DIFRATOGRAMAS DA ANÁLISE QUÍMICA E MINERALÓGICA

a) Relatório da análise química pelo método EDS

** Warning ** Undefined detector subtype. Using default value--subtype= 2.

Tue Mar 16 06:57:48 2004

Chi-sqd = 78.14 Livetime = 100.0 Sec.

Standardless Analysis

Element	Relative k-ratio	Error (1-Sigma)	Net Counts	Error (1-Sigma)
C -K	---	---	927 +/-	49
O -K	---	---	1030 +/-	65
Al-K	0.27210 +/-	0.00614	7929 +/-	179
Si-K	0.59636 +/-	0.00846	16074 +/-	228
Fe-K	0.13154 +/-	0.02120	671 +/-	108

Adjustment Factors

	K	L	M
Z-Balance:	0.00000	0.00000	0.00000
Shell:	1.00000	1.00000	1.00000

PROZA Correction Acc.Volt.= 15 kV Take-off Angle=40.46 deg

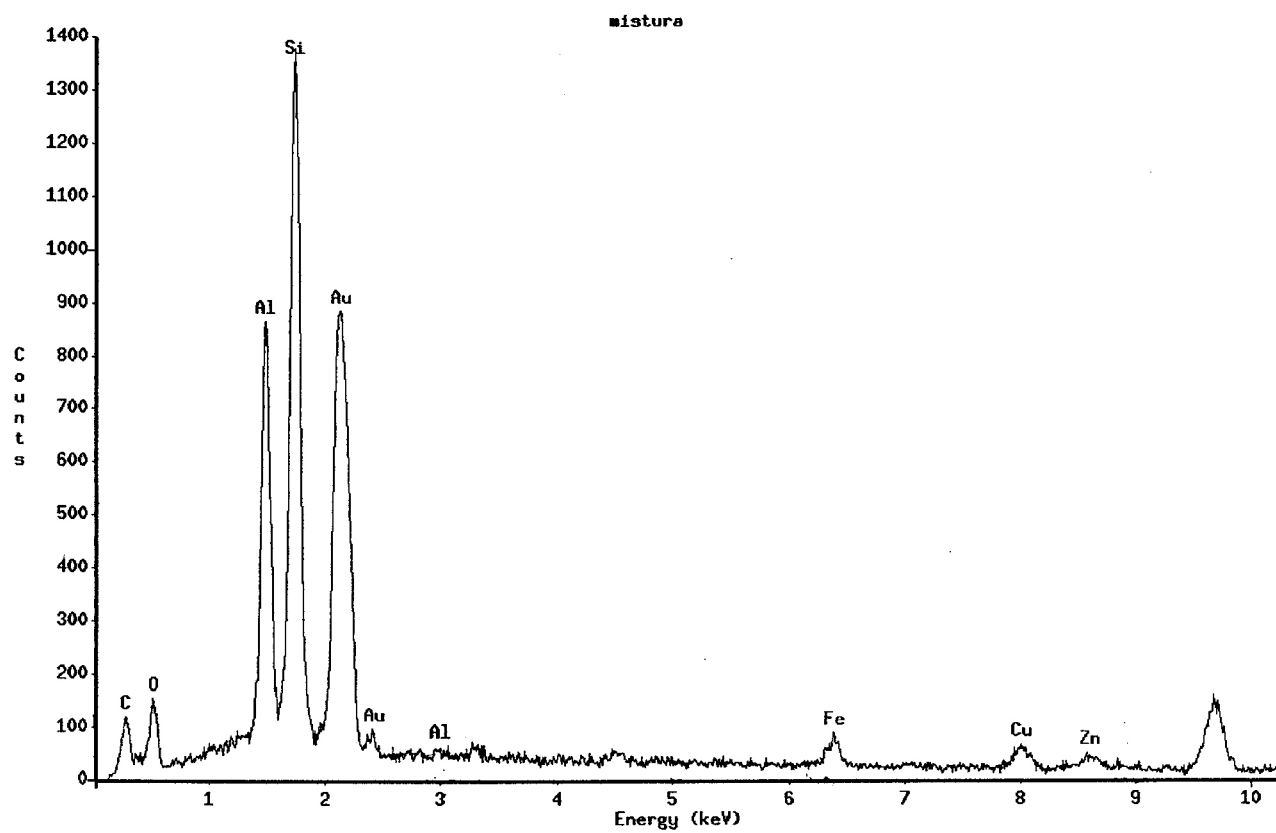
Number of Iterations = 5

Element	k-ratio (calc.)	ZAF	Atom %	Element Wt %	Wt % Err. (1-Sigma)	Compound Formula	Compound Wt %	No. of Cations
Al-K	0.1035	1.339	10.69	13.86	+/- 0.31	Al2O3	26.18	3.976
Si-K	0.2268	1.340	22.52	30.39	+/- 0.43	SiO2	65.02	8.378
Fe-K	0.0500	1.230	2.29	6.15	+/- 0.99	Fe2O3	8.79	0.853
O -K	---	2.013	64.50	49.60	---	---	---	---
Total			100.00	100.00			100.00	13.207

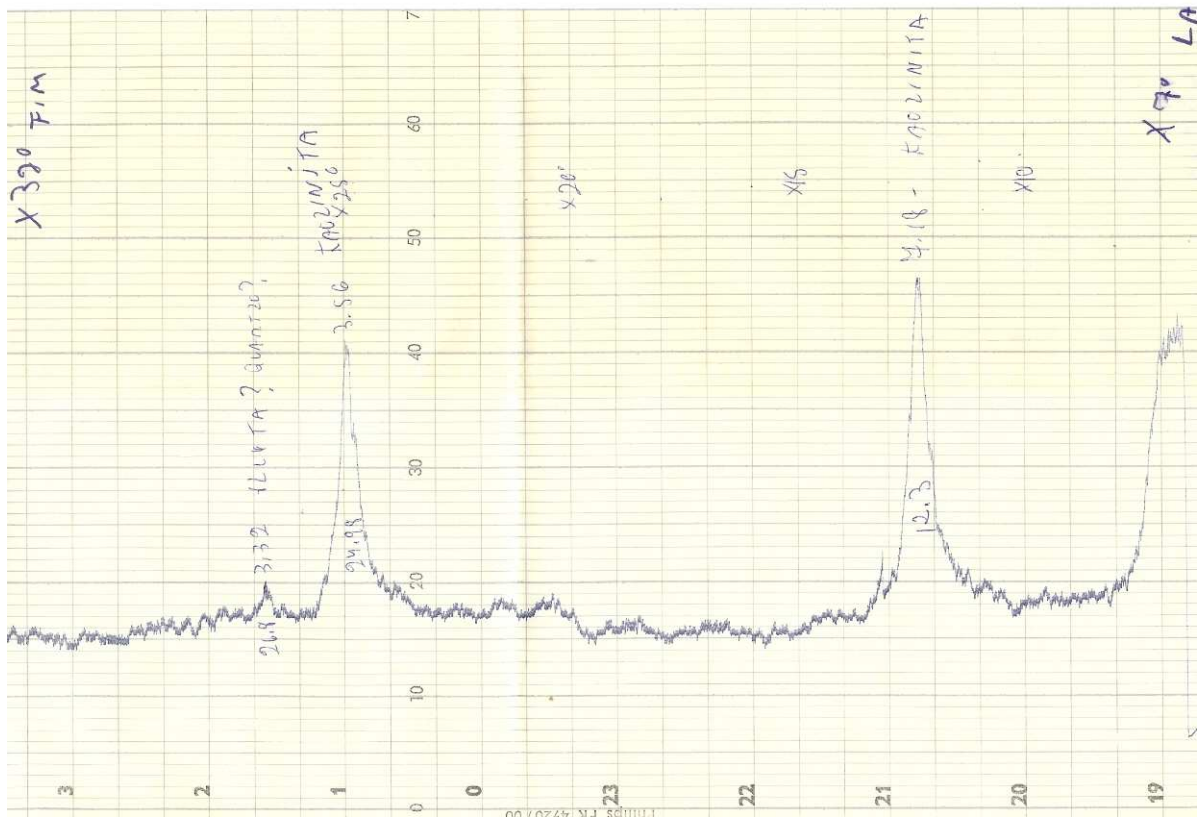
The number of cation results are based upon 24 Oxygen atoms

Table Symbols: S -- Wt.% calculated by Stoichiometry

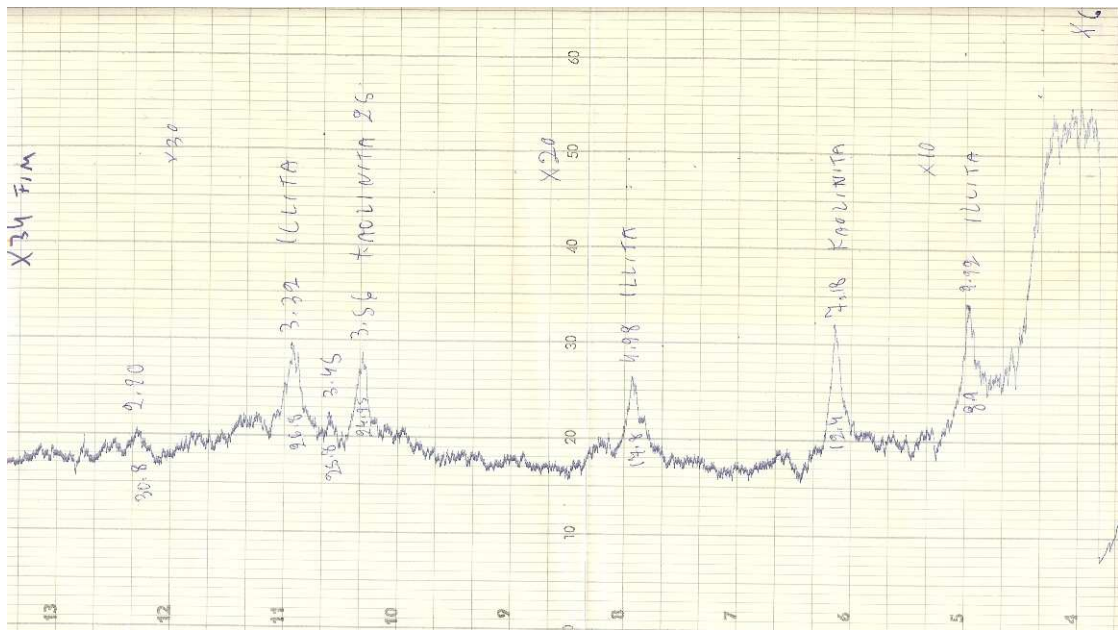
b) Difratoograma da análise química pelo método EDS



c) Difratoograma da amostra clara proveniente de Santarém (PA)



d) Difratoograma da amostra escura proveniente de Santarém (PA)



8.3 APÊNDICE 3: FICHAS DOS ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO E ISC (CBR) DAS MISTURAS SOLO-AGREGADO

a) Ensaio de compactação da Mistura 1 : Agregado de argila calcinada industrial



FICHA Nº 01

APÊNDICE 3.1: Ensaio de compactação da Mistura 01

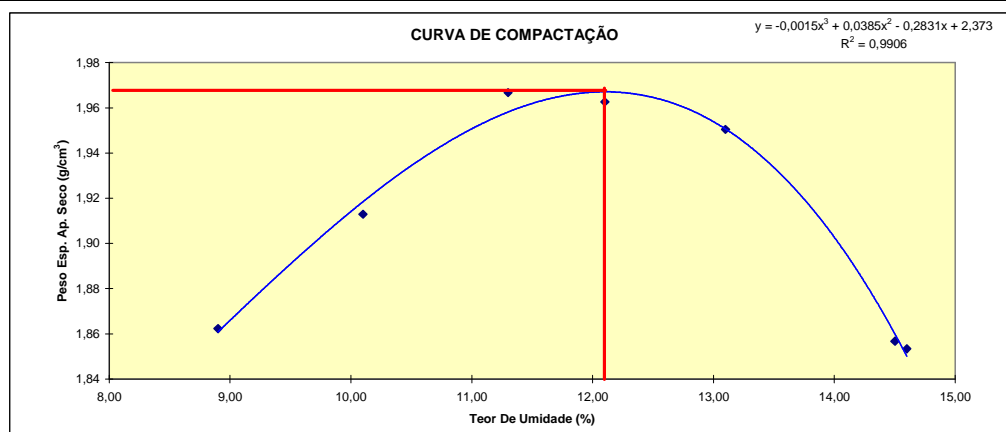
MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
SEÇÃO DE ENGENHARIA DE FORTIFICAÇÃO E CONSTRUÇÃO - SE/2

COMPACTAÇÃO DE SOLOS

ORIGEM: Solo da BR-163 ; Agregado de AC industrial	CLASSIFICAÇÃO: Energia intermediária (26 golpes)
INTERESSADO: Cap Lima	OPERADOR: Cap Lima
AMOSTRA DE AGREGADO: Argila calcinada industrial	DATA: 26/8/2004

Umidade Higroscópica		Moldagem		Resultados	
Capsula N ^o	108	Molde N ^o	25	Massa Específica	1,97
Caps.+ Solo Úmido (g)	126,60	Volume do Molde (cm ³)	2.073,17	Aparente Máx.do Solo Seco(g/cm ³)	
Caps.+ Solo Seco (g)	125,80	Peso do	4.133,70	Umidade Ótima (%)	12,1
Peso da Caps. (g)	75,30	Molde (g)	6.000	Teor de Umidade (%)	
Peso da Água (g)	0,80	Amostra (g)			
Peso Solo Seco (g)	50,50				
Teor de Umidade (%)	1,58%				

Ensaio - Método 47 - 64 DNER											
Amostra Compac + Molde (g)	Amostra Compactada (g)	M.Específica Solo Úmido(g)	Determinação da Umidade								Peso Espec. Aparente Solo Seco (g/cm ³)
			Caps. N ^o	Cáps.+ Solo Úmido (g)	Cápsula + Solo Seco(g)	Peso da Cápsula (g)	Peso da Água (g)	Peso Solo Seco (g)	Teor de Umidade(%)	Fator de Correção	
8.338,80	4.205,10	2,03	124	184,90	176,10	76,70	8,80	99,40	8,90	0,92	1,86
8.498,90	4.365,20	2,11	125	169,20	160,60	75,70	8,60	84,90	10,10	0,91	1,91
8.672,80	4.539,10	2,19	126	208,20	194,70	75,00	13,50	119,70	11,30	0,90	1,97
8.694,60	4.560,90	2,20	123	194,10	181,00	72,60	13,10	108,40	12,10	0,89	1,96
8.707,30	4.573,60	2,21	120	198,00	183,80	75,50	14,20	108,30	13,10	0,88	1,95
8.541,10	4.407,40	2,13	105	195,90	180,50	74,40	15,40	106,10	14,50	0,87	1,86
8.537,00	4.403,30	2,12	112	249,00	226,50	72,70	22,50	153,80	14,60	0,87	1,85



b) Ensaio de compactação da Mistura 2: Agregado de argila calcinada - 900°C



APÊNDICE 3.1: Ensaio de compactação da Mistura 02

MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
SEÇÃO DE ENGENHARIA DE FORTIFICAÇÃO E CONSTRUÇÃO - SE/2

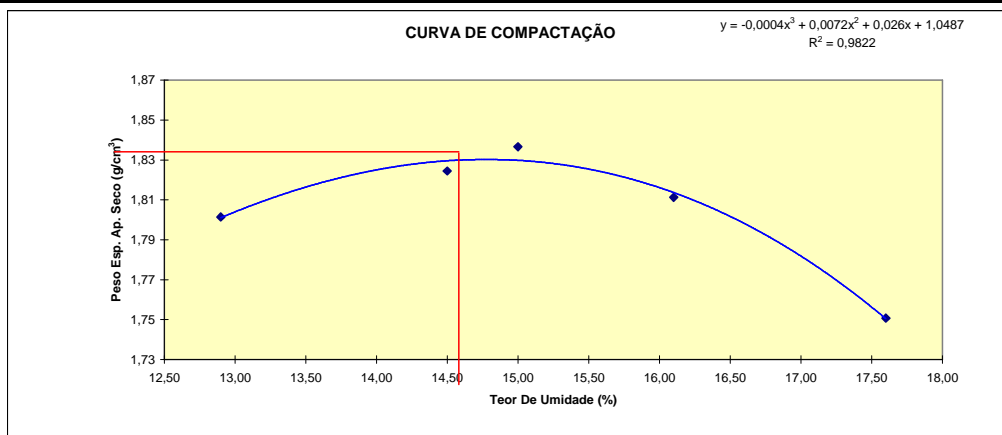
FICHA Nº 02

COMPACTAÇÃO DE SOLOS

ORIGEM: Solo da BR-163 ; Agregado de AC 900oC	CLASSIFICAÇÃO: Energia intermediária (26 golpes)
INTERESSADO: Cap Lima	OPERADOR: Cap Lima
AMOSTRA DE AGREGADO: Argila calcinada produzida em laboratório - 900o C	DATA: 10/9/2004

Umidade Higroscópica		Moldagem		Resultados	
Capsula N ^o	83	Molde N ^o	25	Massa Específica Aparente Máx.do Solo Seco(g/cm ³)	1,83
Caps.+ Solo Umido (g)	120,30	Volume do Molde (cm ³)	2.073,17		
Caps.+ Solo Seco (g)	119,80	Peso do Molde (g)	4.133,70	Umidade Ótima (%)	14,7
Peso da Caps. (g)	54,30	Peso da Amostra (g)	6.000		
Peso da Água (g)	0,50				
Peso Solo Seco (g)	65,50				
Teor de Umidade (%)	0,76%				

Ensaio - Método 47 - 64 DNER											
Amostra Compac + Molde (g)	Amostra Compactada (g)	M.Específica Solo Úmido(g)	Determinação da Umidade							Peso Espec. Aparente Solo Seco (g/cm ³)	
			Caps. N ^o	Cáps.+ Solo Úmido (g)	Cápsula + Solo Seco(g)	Peso da Cápsula (g)	Peso da Água (g)	Peso Solo Seco (g)	Teor de Umidade(%)		Fator de Correção
8.351,50	4.217,80	2,03	124	202,20	187,90	76,72	14,30	111,18	12,90	0,89	1,80
8.465,50	4.331,80	2,09	127	217,80	199,80	75,85	18,00	123,95	14,50	0,87	1,82
8.511,50	4.377,80	2,11	128	243,03	221,35	76,80	21,68	144,55	15,00	0,87	1,84
8.493,00	4.359,30	2,10	128	201,70	184,40	76,89	17,30	107,51	16,10	0,86	1,81
8.402,60	4.268,90	2,06	112	294,80	261,60	72,67	33,20	188,93	17,60	0,85	1,75



c) Ensaio de compactação da Mistura 3: Agregado de argila calcinada – 1.000°C



APÊNDICE 3.1: Ensaio de compactação da Mistura 03

MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
SEÇÃO DE ENGENHARIA DE FORTIFICAÇÃO E CONSTRUÇÃO - SE/2

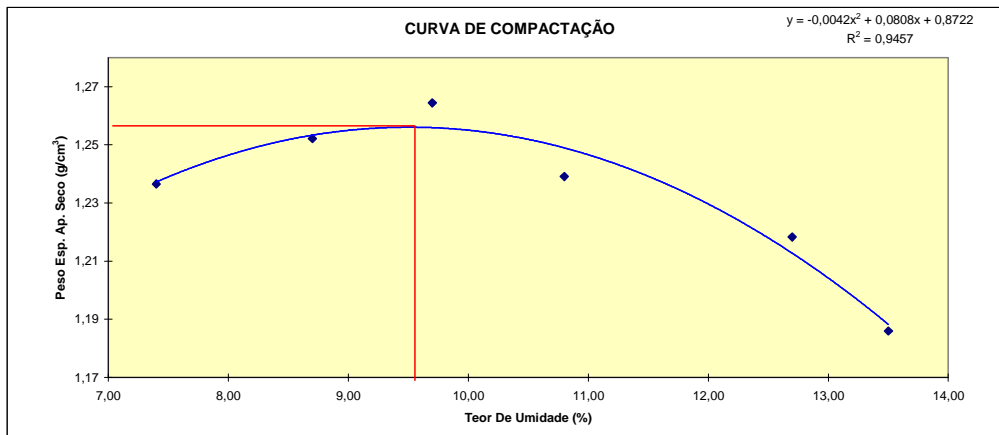
FICHA Nº 03

COMPACTAÇÃO DE SOLOS

ORIGEM: Solo da BR-163 ; Agregado de AC 1000oC	CLASSIFICAÇÃO: Energia intermediária (26 golpes)
INTERESSADO: Cap Lima	OPERADOR: Cap Lima
AMOSTRA DE AGREGADO: Argila calcinada produzida em laboratório - 1000o C	DATA: 23/9/2004

Umidade Higroscópica		Moldagem		Resultados	
Capsula Nº	104	Molde Nº	20/08	Massa Específica Aparente Máx.do Solo Seco(g/cm³)	1,26
Caps.+ Solo Umido (g)	168,40	Volume do Molde (cm³)	3,272,61		
Caps.+ Solo Seco (g)	168,11	Peso do Molde (g)	4,159,50	Umidade Ótima (%)	9,5
Peso da Caps. (g)	78,46	Peso da Amostra (g)	6,000		
Peso da Água (g)	0,29				
Peso Solo Seco (g)	89,65				
Teor de Umidade (%)	0,32%				

Ensaio - Método 47 - 64 DNER											
Amostra Compac + Molde (g)	Amostra Compactada (g)	M.Específica Solo Úmido(g)	Determinação da Umidade								
			Caps. Nº	Cáps.+ Solo Úmido (g)	Cápsula + Solo Seco(g)	Peso da Cápsula (g)	Peso da Água (g)	Peso Solo Seco (g)	Teor de Umidade(%)	Fator de Correção	Aparente Solo Seco (g/cm³)
8.505,80	4.346,30	1,33	83	213,67	204,30	78,30	9,37	126,00	7,40	0,93	1,24
8.612,10	4.452,60	1,36	104	245,21	231,82	78,37	13,39	153,45	8,70	0,92	1,25
8.697,60	4.538,10	1,39	105	223,13	210,00	74,41	13,13	135,59	9,70	0,91	1,26
8.654,30	4.494,80	1,37	106	261,85	243,59	74,45	18,26	169,14	10,80	0,90	1,24
8.651,20	4.491,70	1,37	108	231,88	214,26	75,25	17,62	139,01	12,70	0,89	1,22
8.565,00	4.405,50	1,35	127	316,47	287,83	75,76	28,64	212,07	13,50	0,88	1,19



d) Ensaio de compactação da Mistura 4: Brita comercial do RJ

APÊNDICE 3.1: Ensaio de compactação da Mistura 04



MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
SEÇÃO DE ENGENHARIA DE FORTIFICAÇÃO E CONSTRUÇÃO - SE/2

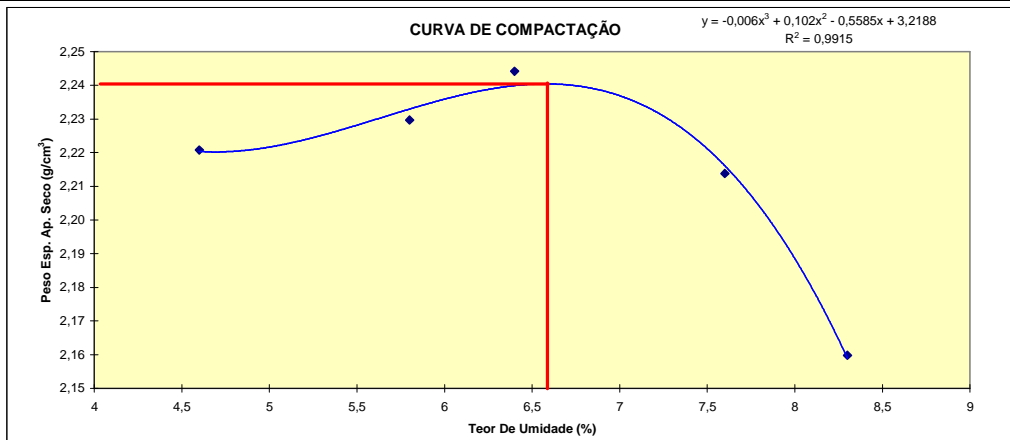
FICHA Nº 04

COMPACTAÇÃO DE SOLOS

ORIGEM: Solo da BR-163 ; Brita comercial do Rio de Janeiro	CLASSIFICAÇÃO: Energia intermediária (26 golpes)
INTERESSADO: Cap Lima	OPERADOR: Cap Cap Lima
AMOSTRA DE AGREGADO: Brita Comercial RJ	DATA: 18/8/2004

Umidade Higroscópica		Moldagem		Resultados	
Capsula Nº	113	Molde Nº	25	Massa Específica Aparente Máx.do Solo Seco(g/cm ³)	2,24
Caps.+ Solo Úmido (g)	223,31	Volume do Molde (cm ³)	2.073,17		
Caps.+ Solo Seco (g)	222,24	Peso do Molde (g)	4.133,70	Umidade Ótima (%)	6,6
Peso da Caps. (g)	74,93	Peso da Amostra (g)	6.000		
Peso da Água (g)	1,07				
Peso Solo Seco (g)	147,31				
Teor de Umidade (%)	1%				

Amostra Compac + Molde (g)	Amostra Compactada (g)	M.Específica Solo Úmido(g)	Ensaio - Método 47 - 64 DNER								Peso Espec. Aparente Solo Seco (g/cm ³)
			Caps. Nº	Cáps.+ Solo Úmido (g)	Cápsula + Solo Seco(g)	Peso da Cápsula (g)	Peso da Água (g)	Peso Solo Seco (g)	Teor de Umidade(%)	Fator de Correção	
8949,6	4815,9	2,32	127	152,90	149,52	75,75	3,38	73,77	4,6	0,956	2,22
9023,5	4889,8	2,36	124	147,47	143,62	76,69	3,85	66,93	5,8	0,9452	2,23
9084,4	4950,7	2,39	122	167,19	161,70	76,57	5,49	85,13	6,4	0,9398	2,24
9072,4	4938,7	2,38	112	159,01	152,90	72,72	6,11	80,18	7,6	0,9294	2,21
8982,1	4848,4	2,34	108	245,75	232,66	75,30	13,09	157,36	8,3	0,9234	2,16



e) Ensaio do ISC da Mistura 1 : Agregado de argila calcinada industrial

APÊNDICE 3.2: Ensaio do ISC da Mistura 01



FICHA Nº 05

MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
SEÇÃO DE ENGENHARIA DE FORTIFICAÇÃO E CONSTRUÇÃO - SE/2

ENSAIO DO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

ORIGEM: Solo da BR-163 ; Agregado de AC industrial	CLASSIFICAÇÃO: Energia intermediária (26 golpes)
INTERESSADO: Cap Lima	OPERADOR: Cap Lima
AMOSTRA: Mistura solo-agregado (50% cada)	DATA: 31/08/2004

Método - ME 50-64 DNER		Moldagem do CP	
		Peso do Molde + Solo + Água (g)	8653
Dados da Compactação		Peso do Molde (g)	4134
Molde Nr.	25	Peso do Solo + Água (g)	4519
Peso da Amostra (g)	6000,00	Massa Específica Aparente Úmida (g/cm³)	2,18
Altura Inicial do CP (cm)	11,41	Cápsula N°	124
Volume do CP (cm³)	2073	Peso da Cápsula + Solo + Água (g)	228,3
Massa Específica Aparente Seca (g/cm³)	1,97	Peso da Cápsula + Solo (g)	212,1
Umidade Ótima (%)	12,10	Peso da Água (g)	16,20
Umidade Higroscópica (%)	1,58	Peso da Cápsula (g)	76,70
Fator de Correção	0,9844	Peso do Solo Seco (g)	135,40
Peso do Solo Seco (g)	5906,40	Umidade (%)	11,96
Quantidade de Água a Acrescentar (cm³)	621	Fator de Correção	0,8931
		Massa Específica Aparente Solo Seco (g/cm³)	1,95

Data/Hora	Tempo Decorrido (h)	Leitura (0,01mm)	Diferença (0,01mm)	Expansão (%)
6/6/1997 09:09	-	100,00	-	-
7/6/1997 09:09	24	103,00	3,00	0,026
8/6/1997 09:09	48	103,00	3,00	0,026
9/6/1997 09:09	72	103,00	3,00	0,026
10/6/1997 09:09	96	103,00	3,00	0,026
Peso do Molde+Solo+Água Após Embebição (g)		8.766	Água Absorvida (g)	112,6

Penetração

Calibração: Y=mX + A

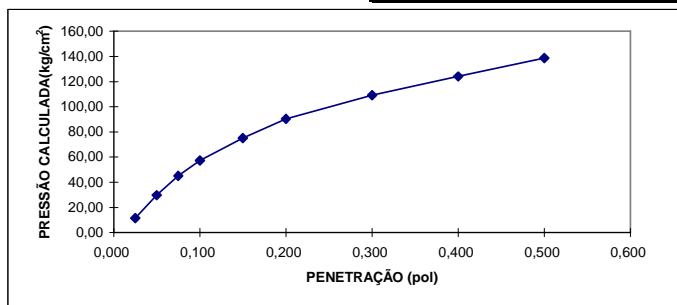
m= 0,116

A= 0,553

Tempo (min)	Penetração		Pressão Padrão (kg/cm²)	Leitura no Extensômetro	Pressão (Kg/cm²) Calculada	Corrigida	I.S.C. (%)	
	(mm)	(pol)						
0,5	0,63	0,025	-	93	11,34	-	-	
1,0	1,27	0,050	-	251	29,67	-	-	
1,5	1,90	0,075	-	384	45,10	-	-	
2,0	2,54	0,100	70	488	57,16	-	81,7	
3,0	3,81	0,150	-	643	75,14	-	-	
4,0	5,08	0,200	105	774	90,34	-	86,0	
6,0	7,62	0,300	132	936	109,13	-	-	
8,0	10,16	0,400	161	1.065	124,09	-	-	
10,0	12,70	0,500	182	1.191	138,71	-	-	
							I.S.C.	86,0

% de Umidade Após o Ensaio de Penetração

	Cápsula N°	Peso da Cápsula (g)	Cápsula + Solo + Água (g)	Cápsula + Solo (g)	Peso da Água (g)	Solo Seco (g)	Umidade (%)
No Topo	124	76,60	232,30	214,50	17,80	137,90	12,91
No Fundo	127	75,60	207,20	191,70	15,50	116,10	13,35
UMIDADE MÉDIA							13,13



f) Ensaio do ISC da Mistura 2 : Agregado de argila calcinada – 900°C



APÊNDICE 3.2: Ensaio do ISC da Mistura 02

MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
SEÇÃO DE ENGENHARIA DE FORTIFICAÇÃO E CONSTRUÇÃO - SE/2

FICHA Nº 06

ENSAIO DO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

ORIGEM: Solo da BR-163 ; Agregado de AC a 900oC	CLASSIFICAÇÃO: Energia intermediária (26 golpes)
INTERESSADO: Cap Lima	OPERADOR: Cap Lima
AMOSTRA: Mistura solo-agregado (50% cada)	DATA: 14/09/2004

Método - ME 50-64 DNER		Moldagem do CP	
		Peso do Molde + Solo + Água (g)	8496
Dados da Compactação		Peso do Molde (g)	4134
		Peso do Solo + Água (g)	4362
Molde Nr.	10/25	Massa Específica Aparente Úmida (g/cm³)	2.10
Peso da Amostra (g)	6000,00	Cápsula N°	127
Altura Inicial do CP (cm)	11,41	Peso da Cápsula + Solo + Água (g)	240,5
Volume do CP (cm³)	2073	Peso da Cápsula + Solo (g)	218,9
Massa Específica Aparente Seca(g/cm³)	1,83	Peso da Água (g)	21,60
Umidade Ótima (%)	14,70	Peso da Cápsula (g)	75,70
Umidade Higroscópica (%)	0,76	Peso do Solo Seco (g)	143,20
Fator de Correção	0,9925	Umidade (%)	15,08
Peso do Solo Seco (g)	5955,00	Fator de Correção	0,8689
Quantidade de Água a Acrescentar(cm³)	830	Massa Específica Aparente Solo Seco (g/cm³)	1,83

Expansão				
Data/Hora	Tempo Decorrido(h)	Leitura (0,01mm)	Diferença (0,01mm)	Expansão (%)
6/6/1997 09:09	-	100,00	-	-
7/6/1997 09:09	24	99,50	-0,50	-0,004
8/6/1997 09:09	48	99,50	-0,50	-0,004
9/6/1997 09:09	72	99,50	-0,50	-0,004
10/6/1997 09:09	96	99,50	-0,50	-0,004
Peso do Molde+Solo+Água Após Embebição (g)		8.566	Água Absorvida (g)	70,2

Penetração

Calibração: Y=mX + A

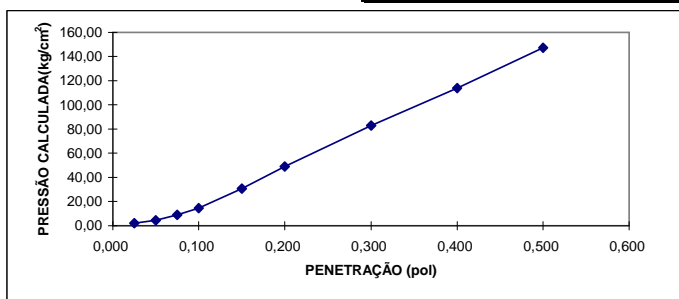
m= 0,116

A= 0,553

Tempo (min)	Penetração		Pressão Padrão (kg/cm²)	Leitura no Extensômetro	Pressão (Kg/cm²) Calculada	Corrigida	I.S.C. (%)
	(mm)	(pol)					
0,5	0,63	0,025	-	13	2,06	-	-
1,0	1,27	0,050	-	35	4,61	-	-
1,5	1,90	0,075	-	72	8,91	-	-
2,0	2,54	0,100	70	120	14,47	35,00	50,0
3,0	3,81	0,150	-	260	30,71	-	-
4,0	5,08	0,200	105	418	49,04	67,00	63,8
6,0	7,62	0,300	132	710	82,91	-	-
8,0	10,16	0,400	161	976	113,77	-	-
10,0	12,70	0,500	182	1.265	147,29	-	-
						I.S.C.	63,8

% de Umidade Após o Ensaio de Penetração

	Cápsula N°	Peso da Cápsula (g)	Cápsula + Solo + Água (g)	Cápsula + Solo (g)	Peso da Água (g)	Solo Seco (g)	Umidade (%)	
No Topo	127	75,78	238,75	207,55	31,20	131,77	23,68	
No Fundo	128	76,80	247,85	220,42	27,43	143,62	19,10	
							UMIDADE MÉDIA	21,39



g) Ensaio do ISC da Mistura 3 : Agregado de argila calcinada – 1.000°C



APÊNDICE 3.2: Ensaio do ISC da Mistura 03

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
SEÇÃO DE ENGENHARIA DE FORTIFICAÇÃO E CONSTRUÇÃO - SE/2**

FICHA Nº 07

ENSAIO DO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

ORIGEM: Solo da BR-163 ; Agregado de AC a 1000oC	CLASSIFICAÇÃO: Energia intermediária (26 golpes)
INTERESSADO: Cap Lima	OPERADOR: Cap Lima
AMOSTRA: Mistura solo-agregado (50% cada)	DATA: 27/09/2004

Método - ME 50-64 DNER		Moldagem do CP	
		Peso do Molde + Solo + Água (g)	8579
Dados da Compactação		Peso do Molde (g)	4160
		Peso do Solo + Água (g)	4420
Molde Nr.	20/08	Massa Específica Aparente Úmida (g/cm³)	1,35
Peso da Amostra (g)	6000,00	Cápsula N ^o	127
Altura Inicial do CP (cm)	11,41	Peso da Cápsula + Solo + Água (g)	240,5
Volume do CP (cm³)	3273	Peso da Cápsula + Solo (g)	226,8
Massa Específica Aparente Seca (g/cm³)	1,26	Peso da Água (g)	13,70
Umidade Ótima (%)	9,50	Peso da Cápsula (g)	75,70
Umidade Higroscópica (%)	0,32	Peso do Solo Seco (g)	151,10
Fator de Correção	0,9968	Umidade (%)	9,07
Peso do Solo Seco (g)	5980,80	Fator de Correção	0,9169
Quantidade de Água a Acrescentar (cm³)	549	Massa Específica Aparente Solo Seco (g/cm³)	1,24

Expansão				
Data/Hora	Tempo Decorrido (h)	Leitura (0,01mm)	Diferença (0,01mm)	Expansão (%)
27/9/2004 15:00	-	100,00	-	-
28/9/2004 15:00	24	101,00	1,00	0,009
29/9/2004 15:00	48	102,50	2,50	0,022
30/9/2004 15:00	72	103,50	3,50	0,031
1/10/2004 15:00	96	103,50	3,50	0,031
Peso do Molde+Solo+Água Após Embebição (g)		8,647	Água Absorvida (g)	67,9

Penetração

Calibração: Y=mX + A

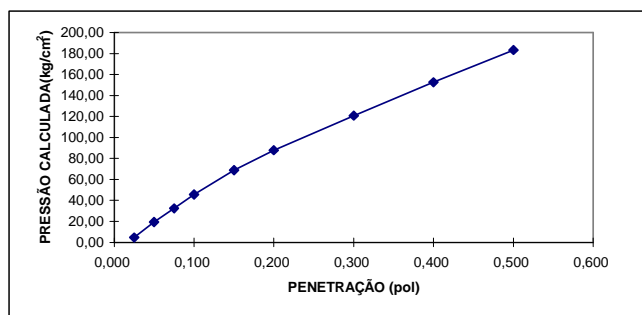
m= 0,116

A= 0,553

Tempo (min)	Penetração		Pressão Padrão (kg/cm²)	Leitura no Extensômetro	Pressão (Kg/cm²) Calculada	Corrigida	I.S.C. (%)	
	(mm)	(pol)						
0,5	0,63	0,025	-	35	4,61	-	-	
1,0	1,27	0,050	-	162	19,35	-	-	
1,5	1,90	0,075	-	275	32,45	-	-	
2,0	2,54	0,100	70	389	45,68	-	65,3	
3,0	3,81	0,150	-	587	68,65	-	-	
4,0	5,08	0,200	105	753	87,90	-	83,7	
6,0	7,62	0,300	132	1.036	120,73	-	-	
8,0	10,16	0,400	161	1.310	152,51	-	-	
10,0	12,70	0,500	182	1.575	183,25	-	-	
							I.S.C.	83,7

% de Umidade Após o Ensaio de Penetração

	Cápsula N ^o	Peso da Cápsula (g)	Cápsula + Solo + Água (g)	Cápsula + Solo (g)	Peso da Água (g)	Solo Seco (g)	Umidade (%)	
No Topo	116	77,13	232,39	216,23	16,16	139,10	11,62	
No Fundo	125	75,70	235,72	217,56	18,16	141,86	12,80	
							UMIDADE MÉDIA	12,21



h) Ensaio do ISC da Mistura 4 : Brita comercial do RJ



APÊNDICE 3.2: Ensaio do ISC da Mistura 04

MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

SEÇÃO DE ENGENHARIA DE FORTIFICAÇÃO E CONSTRUÇÃO - SE/2

FICHA Nº 08

ENSAIO DO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

ORIGEM: Solo da BR-163 ; Brita do Rio de Janeiro	CLASSIFICAÇÃO: Energia intermediária (26 golpes)
INTERESSADO: Cap Lima	OPERADOR: Cap Lima
AMOSTRA: Mistura solo-agregado (50% cada)	DATA: 20/09/2004

Método - ME 50-64 DNER		Moldagem do CP	
		Peso do Molde + Solo + Água (g)	8986
Dados da Compactação		Peso do Molde (g)	4130
		Peso do Solo + Água (g)	4856
Molde Nr.	25	Massa Específica Aparente Úmida (g/cm³)	2,34
Peso da Amostra (g)	6000,00	Cápsula N ^o	122
Altura Inicial do CP (cm)	11,41	Peso da Cápsula + Solo + Água (g)	250,2
Volume do CP (cm³)	2073	Peso da Cápsula + Solo (g)	239,75
Massa Específica Aparente Seca (g/cm³)	2,19	Peso da Água (g)	10,45
Umidade Ótima (%)	7,00	Peso da Cápsula (g)	76,60
Umidade Higroscópica (%)	0,80	Peso do Solo Seco (g)	163,15
Fator de Correção	0,9921	Umidade (%)	6,41
Peso do Solo Seco (g)	5952,60	Fator de Correção	0,9398
Quantidade de Água a Acrescentar (cm³)	369	Massa Específica Aparente Solo Seco (g/cm³)	2,20

Expansão				
Data/Hora	Tempo Decorrido (h)	Leitura (0,01mm)	Diferença (0,01mm)	Expansão (%)
19/8/2004 14:40	-	100,00	-	-
20/8/2004 14:40	24	98,00	-2,00	-0,018
21/8/2004 14:40	48	97,50	-2,50	-0,022
22/8/2004 14:40	72	97,50	-2,50	-0,022
23/8/2004 14:40	96	97,50	-2,50	-0,022
Peso do Molde+Solo+Água Após Embebição (g)		9,050	Água Absorvida (g)	63,5

Penetração

Calibração: Y=mX + A

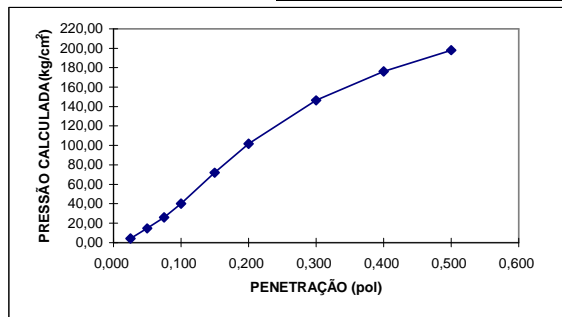
m= 0,116

A= 0,553

Tempo (min)	Penetração		Pressão Padrão (kg/cm²)	Leitura no Extensômetro	Pressão (Kg/cm²) Calculada	Corrigida	I.S.C. (%)	
	(mm)	(pol)						
0,5	0,63	0,025	-	31	4,15	-	-	
1,0	1,27	0,050	-	121	14,59	-	-	
1,5	1,90	0,075	-	218	25,84	-	-	
2,0	2,54	0,100	70	339	39,88	62,00	88,6	
3,0	3,81	0,150	-	614	71,78	-	-	
4,0	5,08	0,200	105	872	101,71	110,00	104,8	
6,0	7,62	0,300	132	1.258	146,48	-	-	
8,0	10,16	0,400	161	1.513	176,06	-	-	
10,0	12,70	0,500	182	1.702	197,99	-	-	
							I.S.C.	104,8

% de Umidade Após o Ensaio de Penetração

	Cápsula N ^o	Peso da Cápsula (g)	Cápsula + Solo + Água (g)	Cápsula + Solo (g)	Peso da Água (g)	Solo Seco (g)	Umidade (%)
No Topo	101	77,11	260,80	249,28	11,52	172,17	6,69
No Fundo	108	75,22	224,30	212,58	11,72	137,36	8,53
UMIDADE MÉDIA							7,61



8.4 APÊNDICE 4: RELATÓRIOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO RESILIENTE DAS MISTURAS SOLO-AGREGADO

a) Ensaio de módulo da Mistura 1: Agregado de argila calcinada industrial

RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\DADOS\LIMA\ACIND.DAT

DADOS DO ENSAIO

Amostra: AC Industrial	Origem: Santarém	C.P. No.: 1
Rodovia: NI	Trecho: NI	Est/Km: NI
Operador: Ten Lima	Interess.: Ten Lima	Data: 03/09/2004
Diâmetro C.P.(cm): 10	Prof.: 40	Peso C.P.(g): 3391.8
Altura C.P.(cm): 20	Energia: Intermediária	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

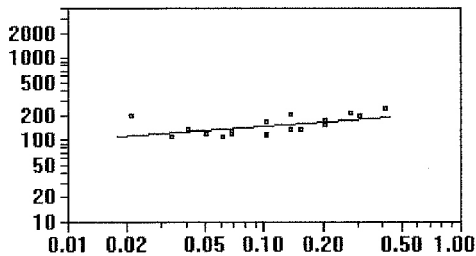
T.Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Específica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.020177	0.000103	200
0.021	0.041	0.060257	0.000308	134
0.021	0.062	0.108356	0.000555	111
0.034	0.034	0.061559	0.000315	109
0.034	0.069	0.114733	0.000587	117
0.034	0.103	0.167529	0.000857	120
0.051	0.051	0.084110	0.000430	118
0.051	0.103	0.173379	0.000887	116
0.051	0.155	0.224185	0.001147	135
0.069	0.069	0.104850	0.000537	128
0.069	0.137	0.201809	0.001033	133
0.069	0.206	0.267843	0.001371	150
0.103	0.103	0.122092	0.000625	165
0.103	0.206	0.230081	0.001178	175
0.103	0.309	0.310704	0.001591	194
0.137	0.137	0.131854	0.000675	203
0.137	0.275	0.246781	0.001264	217
0.137	0.412	0.334524	0.001713	240

Def. Cond.: 4.4960 mm

Def. Total: 4.7630 mm

Altura final C.P.: 195.237 mm

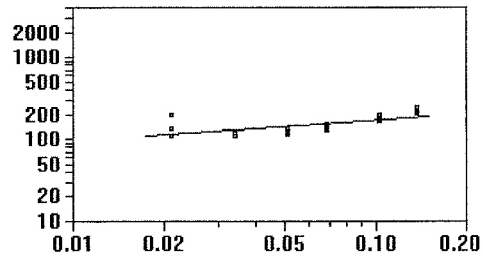
Sigmad (MPa) x M.R.(MPa)



$$Y = \frac{2}{2} 219.4 X^{0.1717}$$

$$R = 0.2910$$

Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



$$Y = \frac{2}{2} 307.2 X^{0.2536}$$

$$R = 0.4188$$

b) Ensaio de módulo da Mistura 2: Agregado de argila calcinada – 900°C

RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\DADOS\LIMA\AC900.DAT

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 900oC	Origem: Santarém	C.P. No.: 1
Rodovia: NI	Trecho: NI	Est/Km: NI
Operador: Ten Lima	Interess.: Ten Lima	Data: 27/09/2004
Diametro C.P.(cm): 10	Prof.: 40	Peso C.P.(g): 3362.4
Altura C.P.(cm): 20	Energia: Intermediária	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

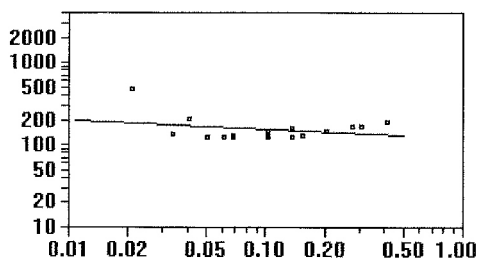
T.Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Específica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.008414	0.000044	467
0.021	0.041	0.038150	0.000200	206
0.021	0.062	0.093501	0.000491	126
0.034	0.034	0.048276	0.000253	135
0.034	0.069	0.102372	0.000537	128
0.034	0.103	0.153023	0.000803	128
0.051	0.051	0.079495	0.000417	122
0.051	0.103	0.157078	0.000824	125
0.051	0.155	0.229983	0.001207	128
0.069	0.069	0.103564	0.000544	126
0.069	0.137	0.210001	0.001102	125
0.069	0.206	0.273155	0.001434	144
0.103	0.103	0.135331	0.000710	145
0.103	0.206	0.267454	0.001404	147
0.103	0.309	0.358557	0.001883	164
0.137	0.137	0.165148	0.000867	158
0.137	0.275	0.310859	0.001633	168
0.137	0.412	0.415843	0.002186	188

Def. Cond.: 9.3820 mm

Def. Total: 9.7940 mm

Altura final C.P.: 190.206 mm

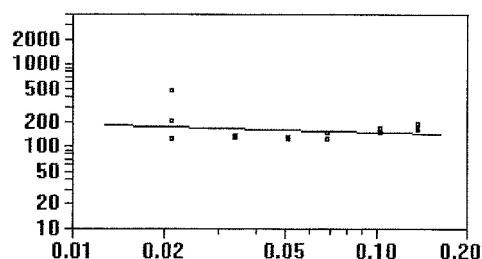
Sigmatd (MPa) x M.R.(MPa)



$$Y = 118.6 X^{-0.1121}$$

$$R^2 = 0.0809$$

Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



$$Y = 115.6 X^{-0.0975}$$

$$R^2 = 0.0404$$

c) Ensaio de módulo da Mistura 3: Agregado de argila calcinada – 1.000°C

RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\DADOS\LIMA\AC1000.DAT

DADOS DO ENSAIO

Amostra: AC 1000oC	Origem: Santarém	C.P. No.: 1
Rodovia: NI	Trecho: NI	Est/Km: NI
Operador: Ten Lima	Interess.: Ten Lima	Data: 03/10/2004
Diametro C.P.(cm): 10	Prof.: 40	Peso C.P.(g): 3426.9
Altura C.P.(cm): 20	Energia: Intermediária	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

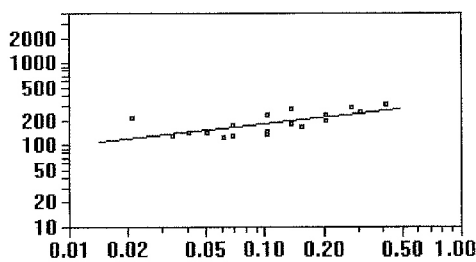
T.Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Específica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.019232	0.000097	211
0.021	0.041	0.057263	0.000290	142
0.021	0.062	0.100826	0.000511	121
0.034	0.034	0.051555	0.000261	131
0.034	0.069	0.105743	0.000536	128
0.034	0.103	0.148331	0.000751	137
0.051	0.051	0.072914	0.000369	138
0.051	0.103	0.138672	0.000702	147
0.051	0.155	0.187522	0.000950	163
0.069	0.069	0.079055	0.000400	171
0.069	0.137	0.152017	0.000770	178
0.069	0.206	0.205450	0.001041	198
0.103	0.103	0.088361	0.000448	230
0.103	0.206	0.172930	0.000876	235
0.103	0.309	0.238074	0.001206	256
0.137	0.137	0.099335	0.000503	273
0.137	0.275	0.186190	0.000943	291
0.137	0.412	0.261332	0.001324	311

Def. Cond.: 2.5070 mm

Def. Total: 2.6720 mm

Altura final C.P.: 197.328 mm

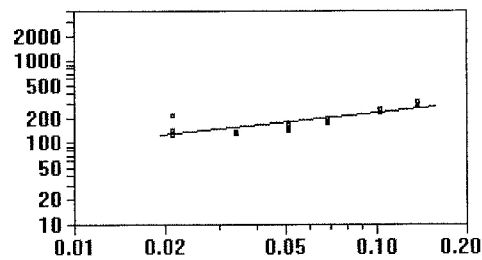
Sigmat (MPa) x M.R.(MPa)



$$Y = 325.8 X^{0.2534}$$

$$R^2 = 0.4395$$

Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)



$$Y = 550.6 X^{0.3839}$$

$$R^2 = 0.6656$$

d) Ensaio de módulo da Mistura 4: Brita comercial do RJ

RELATÓRIO DE ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Nome do Arquivo: C:\DADOS\LIMA\BRITARJ2.DAT

DADOS DO ENSAIO

Amostra: Brita RJ	Origem: RJ e BR 163	C.P. No.: 1
Rodovia: NI	Trecho: NI	Est/Km: NI
Operador: Ten Lima	Interess.: Ten Lima	Data: 06/10/2004
Diametro C.P.(cm): 10	Prof.: 40	Peso C.P.(g): 3716.5
Altura C.P.(cm): 20	Energia: normal	Dist. Apoios(mm): 200

TABELA DE RESULTADOS

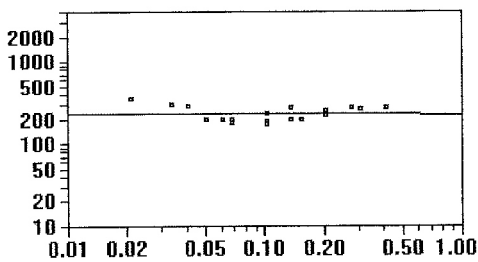
T.Confinante (MPa)	T. Desvio (MPa)	Deslocamento (mm)	Def. Específica Resiliente	Módulo Resiliente
0.021	0.021	0.011333	0.000060	346
0.021	0.041	0.027978	0.000147	280
0.021	0.062	0.060860	0.000320	193
0.034	0.034	0.022209	0.000117	294
0.034	0.069	0.073889	0.000388	177
0.034	0.103	0.112947	0.000594	173
0.051	0.051	0.048693	0.000256	199
0.051	0.103	0.105575	0.000555	186
0.051	0.155	0.152714	0.000803	193
0.069	0.069	0.067931	0.000357	192
0.069	0.137	0.132378	0.000696	197
0.069	0.206	0.174456	0.000917	225
0.103	0.103	0.083273	0.000438	235
0.103	0.206	0.158119	0.000831	248
0.103	0.309	0.219977	0.001156	267
0.137	0.137	0.095001	0.000499	275
0.137	0.275	0.187119	0.000984	279
0.137	0.412	0.280299	0.001474	279

Def. Cond.: 9.6140 mm

Def. Total: 9.8970 mm

Altura final C.P.: 190.103 mm

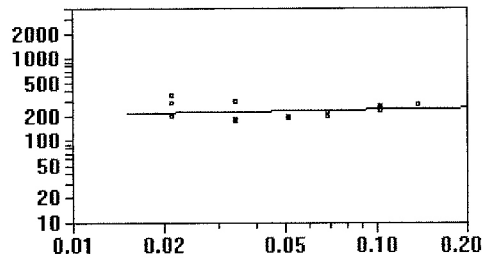
Sigmatd (MPa) x M.R.(MPa)



$$Y = 224.0 X^{-0.0128}$$

$$R = 0.0025$$

Sigma3 (MPa) x M.R.(MPa)




$$Y = 265.4 X^{0.0491}$$

$$R = 0.0239$$


8.5 APÊNDICE 5: FICHAS DOS ENSAIOS REFERENTES À PARTE EXPERIMENTAL SOBRE AS MISTURAS ASFÁLTICAS

APÊNDICE 5.1: 1ª Alternativa da Densidade Teórica da Mistura



EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT
INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIA



FICHA Nº 1

FICHA DE CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO

LIGANTE				
Origem do material	REDUC - PETROBRÁS	Data	24 Novembro 2004	
Classificação do material	Cimento Asfáltico de Petróleo	Local	Lab. de Asfalto - IPR	
Identificação do material	CAP 20	Laborat	Sérgio Romário	
Interessado	Dissertação de Mestrado - Cap Lima			
DENSIDADE RELATIVA A 25/25°C		1º Ensaio	2º Ensaio	
Peso do picnômetro, g	(A)	39,7044	38,6494	
Peso do picnômetro + água, g	(B)	73,9161	71,3003	
Peso do picnômetro + amostra, g	(C)	59,8841	60,5081	
Peso do picnômetro + amostra + água, g	(D)	74,7078	72,1703	
DENSIDADE RELATIVA A 25/25°C (D_{médio})		D _{médio} = 1,041		
D = (C-A)/((B-A)-(D-C))		1ª Determinação	μ = 1,0408	
		2ª Determinação	μ = 1,0415	
PERDA POR AQUECIMENTO, %		1º Ensaio	2º Ensaio	
Peso do recipiente, g	(A)	59,9473	59,8240	
Peso do recipiente + amostra, g	(B)	110,2593	110,4357	
Peso do recipiente + amostra (após aquec.), g	(C)	110,1933	110,3733	
PERDA POR AQUECIMENTO (%_{médio})		% _{médio} =		
% P A = ((B-C)/(B-A))*100		1ª Determinação	% = 0,1312	
		2ª Determinação	% = 0,1233	
PENETRAÇÃO, 0,1 mm				
Normal (a)		Após a perda por aquecimento (b)		% Penetração
1ª Determinação	53	1ª Determinação	28	53
2ª Determinação	53	2ª Determinação	28	53
3ª Determinação	53	3ª Determinação	28	53
Média		Média		Média 53

APÊNDICE 5.1: 1ª Alternativa da Densidade Teórica da Mistura



EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA



DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT
INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIA

FICHA Nº 2

FICHA DE DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DO AGREGADO
Ensaio LDH TR - 312/69 (Louisiana Department of Highways - EUA)

Origem do material	Santarém (PA)	Data	23 Novembro 2004
Classificação do material	Agregado graúdo	Local	Lab. de Asfalto - IPR
Identificação do material	Argila calcinada industrial	Laborat	Sérgio Romário
Interessado	Dissertação de Mestrado - Cap Lima		

DENSIDADE	1o. Ensaio	2o. Ensaio	
PESO DO AGREGADO (A)	250,0	250,0	
PESO DO AGREGADO+CAP (B)	271,9	267,0	
PESO DO RECIPIENTE+TAMPA+ÁGUA (D)	1.636,3	1.572,5	
PESO DO RECIPIENTE+TAMPA+ÁGUA+MISTURA (E)	1.769,8	1.702,7	
% CAP: $C = \frac{B - A}{B}$	8,05%	6,37%	
DENSIDADE DA MISTURA: $F = \frac{B}{D + B - E}$	1,96	1,95	DENSIDADE
DENSIDADE DO AGREGADO: $G = \frac{X}{100/F - C/H}$	2,13	2,08	2,10

DENSIDADE CAP (H) = **1,04**

X = % AGREGADO

APÊNDICE 5.1: 1ª Alternativa da Densidade Teórica da Mistura



**EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**



**DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT
INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIA**

FICHA Nº 3

FICHA DE CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO

AGREGADO GRAÚDO DE ARGILA CALCINADA				
Origem do material	Santarém (PA)	Data	24 Novembro 2004	
Classificação do material	Agregado graúdo	Local	Lab. de Asfalto - IPR	
Identificação do material	Argila calcinada industrial	Laborat	Sérgio Romário	
Interessado	Dissertação de Mestrado - Cap Lima			
NATUREZA DO MATERIAL				
ADESIVIDADE	Ligante	% Dope		
	Satisfatória			
DENSIDADES: REAL E APARENTE DO GRÃO		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio
Peso da cesta vazia, g (Tarar a balança, nesse caso A=0) (A)		0,00	0,00	0,00
Peso da cesta+amostra seca, g (leit.c/ balança tarada) (B)		985,40	737,80	465,10
Peso da cesta imersa, g (C)		179,50	179,50	179,50
Peso da cesta imersa+amostra, g (D)		794,60	641,40	471,00
Peso da cesta+amostra úmida, g (leit.c/ balança tarada) (E)		1.118,60	837,40	526,60
DENSIDADE REAL DO GRÃO ($D_{r\text{ médio}}$)		$D_{r\text{ médio}} = 2,67$		$D_{\text{efetiva}} = 2,20$ Nota: Considerou-se a dens. efetiva como a média ponderada de $(D_r + 2 \times D_{ap})/3$ devido à alta absorção do agregado.
$D_r = (B - A) / ((B - A) - (D - C))$	1ª Determinação	$D_r = 2,661$		
	2ª Determinação	$D_r = 2,674$		
	3ª Determinação	$D_r = 2,679$		
DENSIDADE APARENTE DO GRÃO ($D_{r\text{ médio}}$)		$D_{r\text{ médio}} = 1,97$		
$D_r = (B - A) / ((E - A) - (D - C))$	1ª Determinação	$D_r = 1,957$		
	2ª Determinação	$D_r = 1,965$		
	3ª Determinação	$D_r = 1,978$		

APÊNDICE 5.1: 1ª Alternativa da Densidade Teórica da Mistura



**EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**



**DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT
INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIA**

FICHA Nº 4

FICHA DE CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO

AGREGADO GRAÚDO DE ARGILA CALCINADA (Retido na peneira Nº 10)				
Origem do material	Santarém (PA)	Data	24 Novembro 2004	
Classificação do material	Agregado graúdo	Local	Lab. de Asfalto - IPR	
Identificação do material	Argila calcinada industrial	Laborat	Sérgio Romário	
Interessado	Dissertação de Mestrado - Cap Lima			
NATUREZA DO MATERIAL				
ADESIVIDADE	Ligante	% Dope		
	Satisfatória			
DENSIDADES: REAL E APARENTE DO GRAO		1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio
Peso da cesta vazia, g (Tara a balança, nesse caso A=0)	(A)	0,00	0,00	0,00
Peso da cesta+amostra seca, g (leit.c/ balança tarada)	(B)	587,30	615,90	763,00
Peso da cesta imersa, g	(C)	179,50	179,50	179,50
Peso da cesta imersa+amostra, g	(D)	550,70	568,20	660,40
Peso da cesta+amostra úmida, g (leit.c/ balança tarada)	(E)	674,10	707,00	877,10
DENSIDADE REAL DO GRAO ($D_{r\text{ médio}}$)		$D_{r\text{ médio}} = 2,71$		$D_{\text{defetiva}} = 2,19$ Nota: Considerou-se a dens. efetiva como a média ponderada de $(D_r + 2 \times D_{ap})/3$ devido à alta absorção do agregado.
$D_r = (B - A) / ((B - A) - (D - C))$	1ª Determinação	Dr = 2,718		
	2ª Determinação	Dr = 2,711		
	3ª Determinação	Dr = 2,705		
DENSIDADE APARENTE DO GRAO ($D_{r\text{ médio}}$)		$D_{r\text{ médio}} = 1,93$		
$D_r = (B - A) / ((E - A) - (D - C))$	1ª Determinação	Dr = 1,939		
	2ª Determinação	Dr = 1,935		
	3ª Determinação	Dr = 1,926		

APÊNDICE 5.1: 1ª Alternativa da Densidade Teórica da Mistura



EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA



DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT
INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIA

FICHA Nº 5

FICHA DE CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO

AGREGADO GRAÚDO DE ARGILA CALCINADA			
Origem do material	Santarém (PA)	Data	25 Novembro 2004
Classificação do material	Agregado graúdo	Local	Lab. de Asfalto - IPR
Identificação do material	Argila calcinada industrial	Laborat	Sérgio Romário
Interessado	Dissertação de Mestrado - Cap Lima		
NATUREZA DO MATERIAL			
ADESIVIDADE	Ligante	% Dope	
DENSIDADE REAL		1º Ensaio	2º Ensaio
Peso do balão, g	(A)	143,5	137,1
Peso do balão+amostra, g	(B)	326,4	306,9
Peso do balão+amostra+água, g	(C)	755,4	740,8
Peso do balão+água, g	(D)	641,3	635,1
DENSIDADE REAL		Dr_{médio} = 2,65	
$Dr = (B - A) / ((B - A) - (C - D))$	1ª Determinação	Dr =	2,658
	2ª Determinação	Dr =	2,649

APÊNDICE 5.1: 1ª Alternativa da Densidade Teórica da Mistura



EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

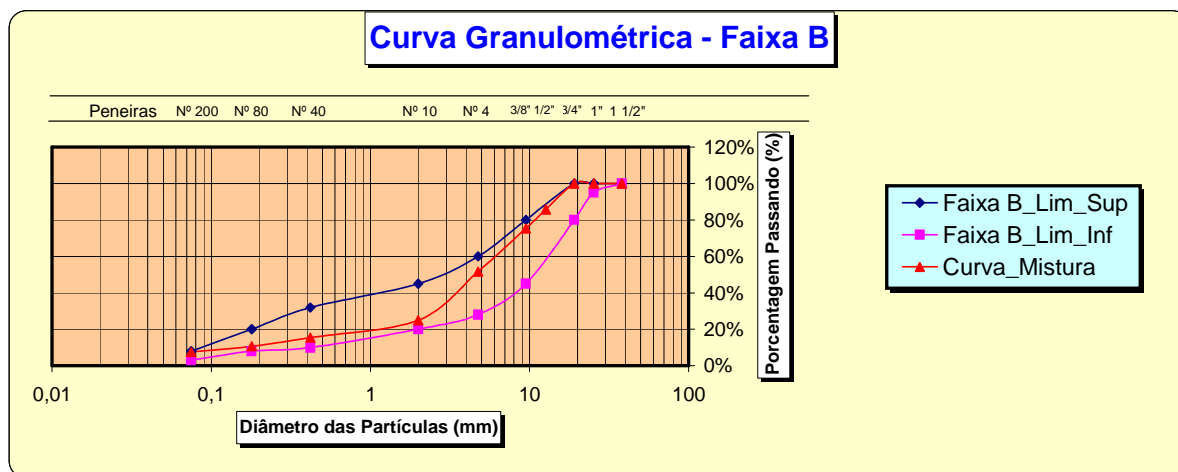


DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT
INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIA

FICHA Nº 6

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Peneira	Projeto	Faixa B	
	Soma	Lim. Inf.	Lim. Sup.
2"			
1 1/2"	100,0%	100%	100%
1"	100,0%	95%	100%
3/4"	100,0%	80%	100%
1/2"	85,8%		
3/8"	75,3%	45%	80%
Nº 4	51,6%	28%	60%
Nº10	25,0%	20%	45%
Nº 40	15,5%	10%	32%
Nº 80	10,7%	8%	20%
Nº 200	7,6%	3%	8%



APÊNDICE 5.1: 1ª Alternativa da Densidade Teórica da Mistura



FICHA Nº 7

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT
INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIA



COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA COM CAP

**COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA
10 Kg de Agregado de Argila Calcificada**

Peneira	Projeto	Total	Faixa B	
	% Pass.	Retido (g)	Lim. Inf.	Lim. Sup.
2"				
1 1/2"	100,0%	0	100%	100%
1"	100,0%	0	95%	100%
3/4"	100,0%	0	80%	100%
1/2"	85,8%	1.400		
3/8"	75,3%	1.100	45%	80%
Nº 4	51,6%	2.300	28%	60%
Nº10	25,0%	2.700	20%	45%
Nº 40	15,5%	900	10%	32%
Nº 80	10,7%	500	8%	20%
Nº 200	7,6%	300	3%	8%

800

Para um CP de 900g, e taxa de ligante de 8%:		
Ligante:	72,0 g	Peso acumulado (g)
Agregados:	828,0 g	
Retido 1/2":	115,9 g	115,9
Retido 3/8":	91,1 g	207,0
Retido Nr 4:	190,4 g	397,4
Retido Nr 10:	223,6 g	621,0
Retido Nr 40:	74,5 g	695,5
Retido Nr 80:	41,4 g	736,9
Retido Nr 200:	24,8 g	761,8
Passando Nr 200:	66,2 g	828,0
SOMA	828,0 g	

Para um CP de 900g, e taxa de ligante de 9%:		
Ligante:	81,0 g	Peso acumulado (g)
Agregados:	819,0 g	
Retido 1/2":	114,7 g	114,7
Retido 3/8":	90,1 g	204,8
Retido Nr 4:	188,4 g	393,1
Retido Nr 10:	221,1 g	614,3
Retido Nr 40:	73,7 g	688,0
Retido Nr 80:	41,0 g	728,9
Retido Nr 200:	24,6 g	753,5
Passando Nr 200:	65,5 g	819,0
SOMA	819,0 g	

Para um CP de 900g, e taxa de ligante de 10%:		
Ligante:	90,0 g	Peso acumulado (g)
Agregados:	810,0 g	
Retido 1/2":	113,4 g	113,4
Retido 3/8":	89,1 g	202,5
Retido Nr 4:	186,3 g	388,8
Retido Nr 10:	218,7 g	607,5
Retido Nr 40:	72,9 g	680,4
Retido Nr 80:	40,5 g	720,9
Retido Nr 200:	24,3 g	745,2
Passando Nr 200:	64,8 g	810,0
SOMA	810,0 g	

Para um CP de 900g, e taxa de ligante de 11%:		
Ligante:	99,0 g	Peso acumulado (g)
Agregados:	801,0 g	
Retido 1/2":	112,1 g	112,1
Retido 3/8":	88,1 g	200,3
Retido Nr 4:	184,2 g	384,5
Retido Nr 10:	216,3 g	600,8
Retido Nr 40:	72,1 g	672,8
Retido Nr 80:	40,1 g	712,9
Retido Nr 200:	24,0 g	736,9
Passando Nr 200:	64,1 g	801,0
SOMA	801,0 g	

APÊNDICE 5.1: 1ª Alternativa da Densidade Teórica da Mistura



FICHA Nº 08

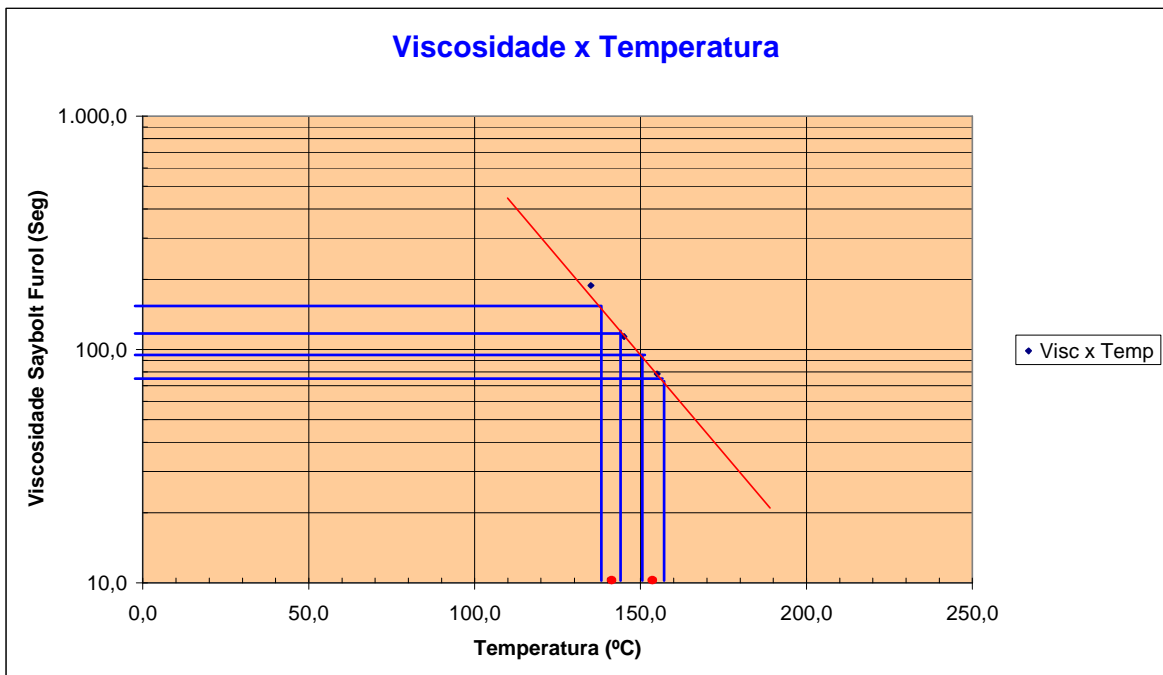
EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT
INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIA



CURVA VISCOSIDADE SAYBOLT-FUROL

ENSAIO VISCOSIDADE SAYBOLT-FUROL

Temperatura (°C)	Leitura (s)
135,0	187,9
145,0	113,5
155,0	78,5



APÊNDICE 5.1: 1ª Alternativa da Densidade Teórica da Mistura



EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA



DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT
INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIA

FICHA Nº 09

FICHA DE TRAÇO DE MISTURA BETUMINOSA

DETERMINAÇÃO DO TEOR ÓTIMO														
Faixa - DNER			B			Ligante			CAP-20 REDUC					
Interessado			Dissertação de Mestrado - Cap Lima						Local		Lab. de Asfalto - IPR			
TRAÇO DE MISTURA BETUMINOSA														
Composição Granulométrica			Mistura 01 (8,0 % CAP)			Mistura 02 (9,0 % CAP)			Mistura 03 (10,0 % CAP)		Mistura 04 (11,0 % CAP)			
			%	Peso (g)		%	Peso (g)		%	Peso (g)	%	Peso (g)		
Agregado de argila calcinada industrial	3/4" - 1/2"	85,8%	44,2%	116,0		43,7%	114,6		43,2%	113,4		42,7%	112,1	
	1/2" - 3/8"	75,3%		91,1			90,1			89,1			88,1	
	3/8" - Nº 4	51,6%		190,4			188,4			186,3			184,2	
	Nº 4 - Nº 10	25,0%	24,8%	223,6		24,6%	221,1		24,3%	218,7		24,0%	216,3	
	Nº 10 - Nº 40	15,5%		74,5			73,7			72,9			72,1	
D _{ef} = 2,10	Nº 40 - Nº 80	10,7%	23,0%	41,4		22,8%	41,0		22,5%	40,5		22,3%	40,1	
	Nº 80 - Nº 200	7,6%		24,8			24,6			24,3			24,0	
Pass. Nº 200				66,2			65,5			64,8			64,1	
Soma em peso de agregados			92,0%	828,0		91,0%	819,0		90,0%	810,0		89,0%	801,0	
Ligante asfáltico D _L = 1,04			% CAP	Peso (g)		% CAP	Peso (g)		% CAP	Peso (g)		% CAP	Peso (g)	
			8,0%	72,0		9,0%	81,0		10,0%	90,0		11,0%	99,0	
Densidade Teórica (D _t)			1,942			1,924			1,906		1,888			
Corpo de Prova Nº			10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Peso ao ar, g			864,3	858,0	880,5	874,7	887,8	890,0	888,6	892,9	884,3	883,3	883,1	884,4
Peso imerso em água por 5 min, g			407,3	405,7	415,4	425,2	429,6	429,6	438,7	437,0	439,0	434,2	432,3	440,0
Peso úmido seco superficialmente, g			886,5	874,6	890,5	897,1	907,5	911,8	908,1	908,2	902,0	886,3	886,4	896,0
Densidade aparente (D _{ap})			1,80	1,83	1,85	1,85	1,86	1,85	1,89	1,89	1,91	1,95	1,94	1,94
Porcentagem de vazios (V _v), %			7,11	5,76	4,55	3,64	3,42	4,05	0,67	0,57	-0,22	-3,47	-2,99	-2,71
Vazios cheios com betume (VCB), %			13,87	14,08	14,26	16,04	16,08	15,97	18,20	18,22	18,36	20,66	20,57	20,51
Vazios do agregado mineral (VAM), %			20,98	19,84	18,81	19,68	19,50	20,02	18,87	18,79	18,15	17,20	17,58	17,80
Relação betume - vazios (RBV), %			66,12	70,96	75,80	81,51	82,45	79,79	96,47	96,98	101,21	120,16	117,00	115,22
Espessura, cm			6,36	6,05	6,28	6,20	6,12	6,43	6,03	6,03	5,92	5,65	5,65	5,80
Leitura no defletômetro			250	535	620	725	780	755	800	785	815	775	600	725
Estabilidade encontrada, kgf			390,0	834,6	967,2	1.131,0	1.216,8	1.177,8	1.248,0	1.224,6	1.271,4	1.209,0	936,0	1.131,0
Fator de correção (K)			1,01	1,10	1,03	1,05	1,08	0,99	1,10	1,10	1,14	1,23	1,23	1,17
Estabilidade corrigida, kgf			393,1	915,3	995,4	1.188,8	1.308,5	1.168,1	1.375,3	1.348,6	1.444,3	1.484,5	1.146,8	1.328,0

Cálculo das espessuras dos Corpos de Prova														
Corpos de Prova			10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Espessuras Medidas, cm			6,37	6,03	6,25	6,20	6,07	6,80	5,97	6,08	5,97	5,64	5,66	5,80
			6,35	6,05	6,28	6,20	6,10	6,50	6,00	6,04	5,90	5,62	5,65	5,80
			6,35	6,05	6,30	6,20	6,12	6,20	6,07	6,00	5,90	5,62	5,65	5,80
			6,38	6,05	6,30	6,21	6,18	6,20	6,07	6,00	5,90	5,70	5,65	5,80
Espessuras Médias, cm			6,36	6,05	6,28	6,20	6,12	6,43	6,03	6,03	5,92	5,65	5,65	5,80

Misturas	% Ligante	Vv	RBV	Estab.	Dap
01	8,0	5,81	70,96	955,4	1,83
02	9,0	3,70	81,25	1.221,8	1,85
03	10,0	0,34	98,22	1.389,4	1,90
04	11,0	-3,06	117,46	1.319,8	1,95

APÊNDICE 5.1: 1ª Alternativa da Densidade Teórica da Mistura

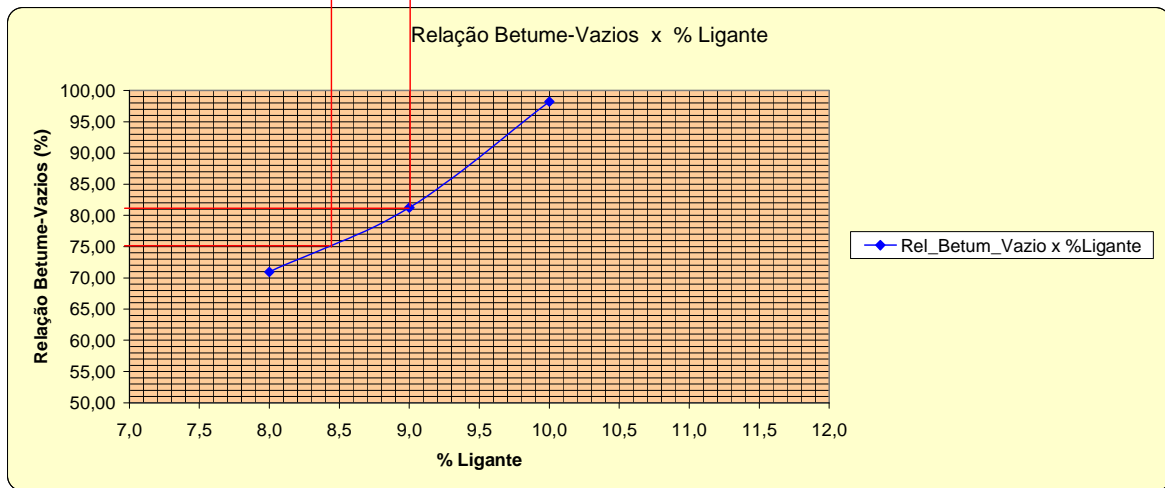
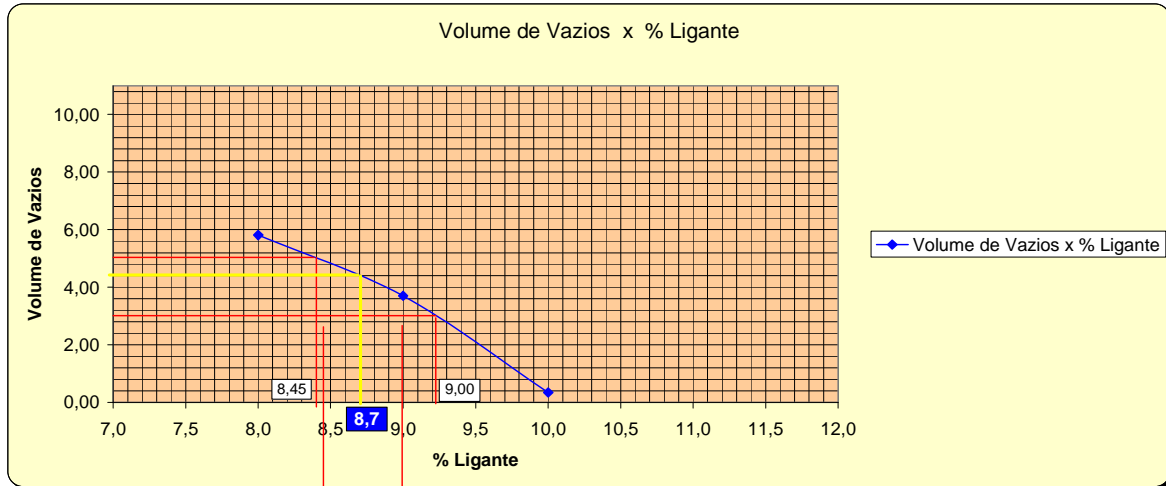


FICHA Nº 11

EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT
INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIA



GRÁFICOS PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR ÓTIMO



Como a tolerância no teor de ligante deve ser no mínimo de $\pm 0,2\%$ e no máximo de $\pm 0,3\%$, pode-se considerar um teor de ligante entre 8,5% e 9,0%, ou seja, 8,7%, com uma tolerância de $-0,2\%$ e de $+0,3\%$.

APÊNDICE 5.1: 1ª Alternativa da Densidade Teórica da Mistura



**EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**



**DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT
INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIA**

FICHA Nº 11

FICHA DE TRAÇO DE MISTURA BETUMINOSA

MISTURA ASFÁLTICA NO TEOR ÓTIMO DE 8,7% DE LIGANTE								
Faixa - DNER			B		Ligante		CAP-20 REDUC	
Interessado			Dissertação de Mestrado - Cap Lima			Local	Lab. de Asfalto - IPR	
TRAÇO DE MISTURA BETUMINOSA								
Composição Granulométrica			CP 01		CP 02		CP 03	
			%	Peso (g)	%	Peso (g)	%	Peso (g)
Agregado de argila calcinada industrial	3/4" - 1/2"	85,8%	43,8%	115,0	43,8%	115,0	43,8%	115,0
	1/2" - 3/8"	75,3%		90,4		90,4		90,4
	3/8" - Nº 4	51,6%		189,0		189,0		189,0
	Nº 4 - Nº 10	25,0%	22,8%	221,9	22,8%	221,9	22,8%	221,9
	Nº 10 - Nº 40	15,5%		74,0		74,0		74,0
Nº 40 - Nº 80	10,7%	41,1		41,1		41,1		
D _{ef} = 2,10	Nº 80 - Nº 200	7,6%	22,8%	24,7	22,8%	24,7	22,8%	24,7
	Pass. Nº 200			65,7		65,7		65,7
Soma em peso de agregados			91,3%	821,7	91,3%	821,7	91,3%	821,7
Ligante asfáltico D _L = 1,04			% CAP	Peso (g)	% CAP	Peso (g)	% CAP	Peso (g)
			8,7%	78,3	8,7%	78,3	8,7%	78,3
Densidade Teórica (D _t)			1,929		1,929		1,929	
Corpo de Prova Nº			30		31		32	
Peso ao ar, g			875,5		885,0		885,2	
Peso imerso em água por 5 min, g			422,7		431,6		434,2	
Peso úmido seco superficialmente, g			894,3		906,2		911,9	
Densidade aparente (D _{ap})			1,86		1,86		1,85	
Porcentagem de vazios (V _v), %			3,76		3,33		3,94	
Vazios cheios com betume (VCB), %			15,53		15,60		15,50	
Vazios do agregado mineral (VAM), %			19,29		18,93		19,44	
Relação betume - vazios (RBV), %			80,51		82,41		79,75	
Espessura, cm			6,08		6,09		6,15	
Leitura no defletômetro			665		665		670	
Estabilidade encontrada, kgf			1.037,4		1.037,4		1.045,2	
Fator de correção (k)			1,09		1,08		1,07	
Estabilidade corrigida, kgf			1.126,9		1.124,7		1.114,2	
Fluência, 1/100"								

Cálculo das espessuras dos Corpos de Prova			
Corpos de Prova	30	31	32
Espessuras Medidas, cm	6,08	6,11	6,15
	6,08	6,10	6,16
	6,08	6,07	6,18
	6,08	6,07	6,11
Espessuras Médias, cm	6,08	6,09	6,15

CP	% Ligante	Vv	RBV	Estab.	Dap
30	8,7	3,76	80,51	1.126,9	1,86
31	8,7	3,33	82,41	1.124,7	1,86
32	8,7	3,94	79,75	1.114,2	1,85

APÊNDICE 5.1: 1ª Alternativa da Densidade Teórica da Mistura



EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT
INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIA - IPR



FICHA Nº 12

FICHA DE CONTROLE DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ASFÁLTICO

Interessado: Cap Lima

Teor ótimo de ligante: **8,7%**

Temperatura ótima de compactação: **141 °C**

Energia de compactação: **60 golpes (Compactador mecânico do IPR/DNIT)**

Temperatura do ligante: **154 °C**

Temperatura dos agregados: **167 °C**

CP	Espessuras medidas (cm)				Espessura Média (cm)	Ensaio	Leitura no aparelho		Unid. da leitura	Resultados		Média	Unidade
04	6,10	6,12	6,15	6,15	6,13	M _R - 25° C	3.306	3.073	MPa	3.306	3.073	3.190	MPa
05	6,20	6,22	6,20	6,20	6,21	M _R - 25° C	3.213	3.317	MPa	3.213	3.317	3.265	MPa
17	6,10	6,15	6,15	6,12	6,13	M _R - 25° C	3.493	2.947	MPa	3.493	2.947	3.220	MPa
20	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (25° C)	465,00		mm	7,58		0,75	MPa
21	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (30° C)	275,00		mm	4,41		0,47	MPa
22	5,98	5,98	5,98	5,98	5,98	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (25° C)	310,00		mm	5,07		0,75	MPa
23	6,15	6,15	6,15	6,15	6,15	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (25° C)	455,00		mm	7,23		0,75	MPa
24	6,15	6,18	6,20	6,20	6,18	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (25° C)	370,00		mm	5,85		0,75	MPa
25	6,00	6,04	6,05	6,08	6,04	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (25° C)	470,00		mm	7,60		0,75	MPa
28	6,10	6,10	6,09	6,09	6,10	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (35° C)	210,00		mm	3,37		0,33	MPa
29	6,18	6,18	6,20	6,20	6,19	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (35° C)	200,00		mm	3,16		0,33	MPa
30	6,08	6,08	6,08	6,08	6,08	ESTABILIDADE MARSHALL	665		mm	1.126,95		1.121,93	Kgf
31	6,11	6,10	6,07	6,07	6,09		665		mm	1.124,66			
32	6,15	6,16	6,18	6,11	6,15		670		mm	1.114,17			

APÊNDICE 5.2: 2ª Alternativa da Densidade Teórica da Mistura



EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT
INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIA



FICHA Nº 01

FICHA DE TRAÇO DE MISTURA BETUMINOSA

DETERMINAÇÃO DO TEOR ÓTIMO														
Faixa - DNER			B			Ligante			CAP-20 REDUC					
Interessado			Dissertação de Mestrado - Cap Lima						Local		Lab. de Asfalto - IPR			
TRAÇO DE MISTURA BETUMINOSA														
Composição Granulométrica			Mistura 01 (8,0 % CAP)		Mistura 02 (9,0 % CAP)		Mistura 03 (10,0 % CAP)		Mistura 04 (11,0 % CAP)					
			%	Peso (g)	%	Peso (g)	%	Peso (g)	%	Peso (g)				
Agregado gráudo	3/4" - 1/2"	85,8%	44,2%	116,0	43,7%	114,6	43,2%	113,4	42,7%	112,1				
	1/2" - 3/8"	75,3%		91,1		90,1		89,1		88,1				
$D_{er} = 2,20$	3/8" - Nº 4	51,6%		190,4		188,4		186,3		184,2				
Retido Nº 10	Nº 4 - Nº 10	25,0%	24,8%	223,6	24,6%	221,1	24,3%	218,7	24,0%	216,3				
$D_{er} = 2,19$														
Agregado miúdo	Nº 10 - Nº 40	15,5%	23,0%	74,5	22,8%	73,7	22,5%	72,9	22,3%	72,1				
	Nº 40 - Nº 80	10,7%		41,4		41,0		40,5		40,1				
$D_{er} = 2,65$	Nº 80 - Nº 200	7,6%		24,8		24,6		24,3		24,0				
	Pass. Nº 200			66,2		65,5		64,8		64,1				
Soma em peso de agregados			92,0%	828,0	91,0%	819,0	90,0%	810,0	89,0%	801,0				
Ligante asfáltico			% CAP	Peso (g)	% CAP	Peso (g)	% CAP	Peso (g)	% CAP	Peso (g)				
$D_t = 1,04$			8,0%	72,0	9,0%	81,0	10,0%	90,0	11,0%	99,0				
Densidade Teórica (D_t)			2,093			2,070			2,048		2,026			
Corpo de Prova Nº			10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Peso ao ar, g			864,3	858,0	880,5	874,7	887,8	890,0	888,6	892,9	884,3	883,3	883,1	884,4
Peso imerso em água por 5 min, g			407,3	405,7	415,4	425,2	429,6	429,6	438,7	437,0	439,0	434,2	432,3	440,0
Peso úmido seco superficialmente, g			886,5	874,6	890,5	897,1	907,5	911,8	908,1	908,2	902,0	886,3	886,4	896,0
Densidade aparente (D_{ap})			1,80	1,83	1,85	1,85	1,86	1,85	1,89	1,89	1,91	1,95	1,94	1,94
Porcentagem de vazios (V_v), %			13,81	12,56	11,44	10,45	10,25	10,83	7,55	7,45	6,72	3,55	4,00	4,26
Vazios cheios com betume (VCB), %			13,87	14,08	14,26	16,04	16,08	15,97	18,20	18,22	18,36	20,66	20,57	20,51
Vazios do agregado mineral (VAM), %			27,68	26,63	25,69	26,49	26,33	26,80	25,75	25,67	25,09	24,22	24,57	24,77
Relação betume - vazios (RBV), %			50,12	52,85	55,49	60,55	61,07	59,59	70,69	70,97	73,20	85,32	83,71	82,80
Espessura, cm			6,36	6,05	6,28	6,20	6,12	6,43	6,03	6,03	5,92	5,65	5,65	5,80
Leitura no defletômetro			250	535	620	725	780	755	800	785	815	775	600	725
Estabilidade encontrada, kgf			390,0	834,6	967,2	1.131,0	1.216,8	1.177,8	1.248,0	1.224,6	1.271,4	1.209,0	936,0	1.131,0
Fator de correção (k)			1,01	1,10	1,03	1,05	1,08	0,99	1,10	1,10	1,14	1,23	1,23	1,17
Estabilidade corrigida, kgf			393,1	915,3	995,4	1.188,8	1.308,5	1.168,1	1.375,3	1.348,6	1.444,3	1.484,5	1.146,8	1.328,0
Cálculo das espessuras dos Corpos de Prova														
Corpos de Prova			10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Espessuras Medidas, cm			6,37	6,03	6,25	6,20	6,07	6,80	5,97	6,08	5,97	5,64	5,66	5,80
			6,35	6,05	6,28	6,20	6,10	6,50	6,00	6,04	5,90	5,62	5,65	5,80
			6,35	6,05	6,30	6,20	6,12	6,20	6,07	6,00	5,90	5,62	5,65	5,80
			6,38	6,05	6,30	6,21	6,18	6,20	6,07	6,00	5,90	5,70	5,65	5,80
Espessuras Médias, cm			6,36	6,05	6,28	6,20	6,12	6,43	6,03	6,03	5,92	5,65	5,65	5,80
Misturas	% Ligante	Vv	RBV	Estab.	Dap									
01	8,0	12,60	52,82	955,4	1,83									
02	9,0	10,51	60,40	1.221,8	1,85									
03	10,0	7,24	71,62	1.389,4	1,90									
04	11,0	3,94	83,95	1.319,8	1,95									

APÊNDICE 5.2: 2ª Alternativa da Densidade Teórica da Mistura

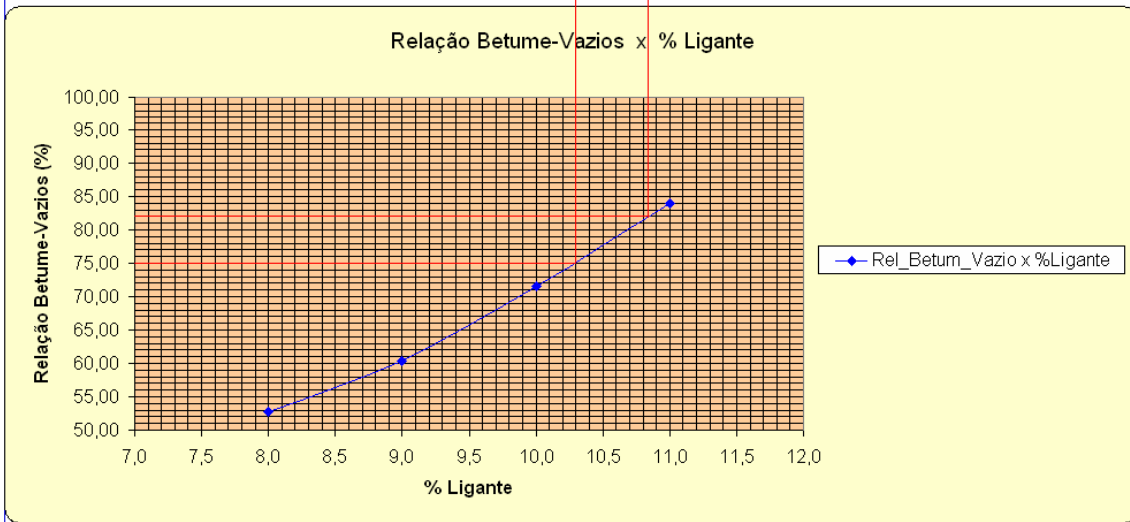
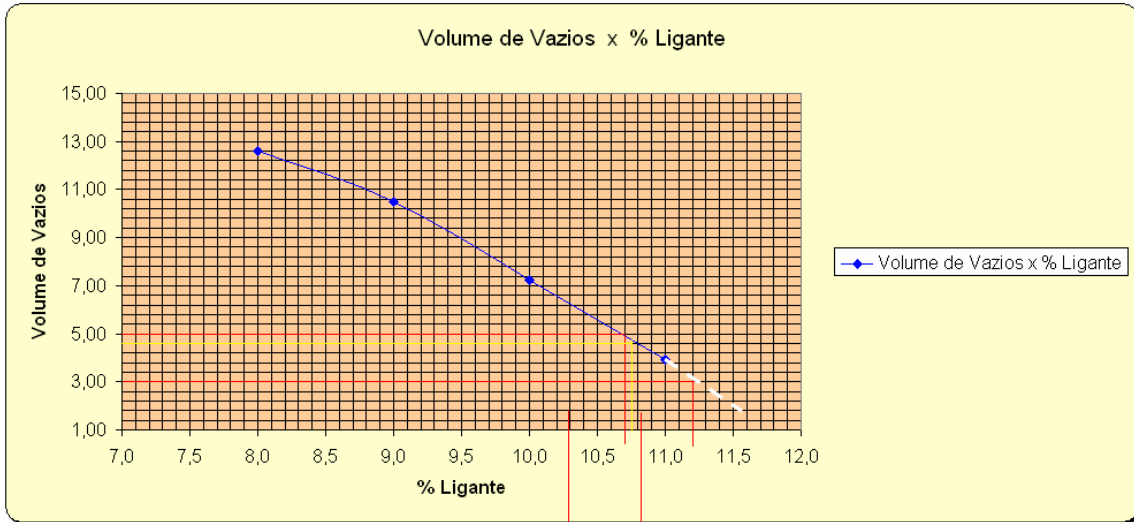


EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT
INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIA



FICHA Nº 03

GRÁFICOS PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR ÓTIMO



Material	Mistura
CAP	10,8%
Agregado de argila calcinada industrial	89,20%
TOTAL (g)	100,0%

D_T	2,099
-------	-------

Do gráfico, para um teor ótimo de 10,8% o Volume de Vazios é de 4,2%.

V_v	4,2%
D_{ap}	2,011
VCB (%)	20,88%
VAM (%)	25,08%
RBV (%)	83,26%

Para um CP de 900g, e taxa de ligante de 10,8%:			
Ligante:		97,2 g	Peso acumulado (g)
Agregados:		802,8 g	
Retido 1/2":	42,8%	112,4 g	112,4
Retido 3/8":		88,3 g	200,7
Retido Nr 4:		184,6 g	385,3
Retido Nr 10:	24,1%	216,8 g	602,1
Retido Nr 40:	22,3%	72,3 g	674,4
Retido Nr 80:		40,1 g	714,5
Retido Nr 200:		24,1 g	738,6
Passando Nr 200:		64,2 g	802,8
SOMA	89,2%	802,8 g	

APÊNDICE 5.3: 3ª Alternativa da Densidade Teórica da Mistura



**EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT
INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIA**



FICHA Nº 04

FICHA DE TRAÇO DE MISTURA BETUMINOSA

DETERMINAÇÃO DO TEOR ÓTIMO														
Faixa - DNER			B			Ligante			CAP-20 REDUC					
Interessado			Dissertação de Mestrado - Cap Lima						Local	Lab. de Asfalto - IPR				
TRAÇO DE MISTURA BETUMINOSA														
Composição Granulométrica			Mistura 01 (8,0 % CAP)		Mistura 02 (9,0 % CAP)		Mistura 03 (10,0 % CAP)		Mistura 04 (11,0 % CAP)					
			%	Peso (g)	%	Peso (g)	%	Peso (g)	%	Peso (g)	%	Peso (g)		
Agregado gráudo	3/4" - 1/2"	85,8%	44,2%	116,0	43,7%	114,6	43,2%	113,4	42,7%	112,1	42,7%	112,1		
	1/2" - 3/8"	75,3%		91,1		90,1		89,1		88,1				
$D_{ef} = 2,32$	3/8" - Nº 4	51,6%		190,4		188,4		186,3		184,2		184,2		
Retido Nº 10	Nº 4 - Nº 10	25,0%	24,8%	223,6	24,6%	221,1	24,3%	218,7	24,0%	216,3	24,0%	216,3		
$D_{ef} = 2,32$														
Agregado miúdo	Nº 10 - Nº 40	15,5%	23,0%	74,5	22,8%	73,7	22,5%	72,9	22,3%	72,1	22,3%	72,1		
	Nº 40 - Nº 80	10,7%		41,4		41,0		40,5		40,1				
$D_{ef} = 2,65$	Nº 80 - Nº 200	7,6%		24,8		24,6		24,3		24,0		24,0		
	Pass. Nº 200			66,2		65,5		64,8		64,1		64,1		
Soma em peso de agregados			92,0%	828,0	91,0%	819,0	90,0%	810,0	89,0%	801,0		801,0		
Ligante asfáltico			% CAP	Peso (g)	% CAP	Peso (g)	% CAP	Peso (g)	% CAP	Peso (g)		Peso (g)		
$D_t = 1,04$			8,0%	72,0	9,0%	81,0	10,0%	90,0	11,0%	99,0		99,0		
Densidade Teórica (D_t)			2,169			2,145			2,119			2,094		
Corpo de Prova Nº			10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Peso ao ar, g			864,3	858,0	880,5	874,7	887,8	890,0	888,6	892,9	884,3	883,3	883,1	884,4
Peso imerso em água por 5 min, g			407,3	405,7	415,4	425,2	429,6	429,6	438,7	437,0	439,0	434,2	432,3	440,0
Peso úmido seco superficialmente, g			886,5	874,6	890,5	897,1	907,5	911,8	908,1	908,2	902,0	886,3	886,4	896,0
Densidade aparente (D_{ap})			1,80	1,83	1,85	1,85	1,86	1,85	1,89	1,89	1,91	1,95	1,94	1,94
Porcentagem de vazios (V_v), %			16,83	15,62	14,54	13,52	13,33	13,89	10,65	10,56	9,85	6,72	7,15	7,40
Vazios cheios com betume (VCB), %			13,87	14,08	14,26	16,04	16,08	15,97	18,20	18,22	18,36	20,66	20,57	20,51
Vazios do agregado mineral (VAM), %			30,70	29,70	28,79	29,56	29,40	29,86	28,85	28,78	28,21	27,38	27,72	27,91
Relação betume - vazios (RBV), %			45,19	47,40	49,51	54,27	54,68	53,49	63,10	63,32	65,09	75,47	74,21	73,49
Espessura, cm			6,36	6,05	6,28	6,20	6,12	6,43	6,03	6,03	5,92	5,65	5,65	5,80
Leitura no defletômetro			250	535	620	725	780	755	800	785	815	775	600	725
Estabilidade encontrada, kgf			390,0	834,6	967,2	1.131,0	1.216,8	1.177,8	1.248,0	1.224,6	1.271,4	1.209,0	936,0	1.131,0
Fator de correção (k)			1,01	1,10	1,03	1,05	1,08	0,99	1,10	1,10	1,14	1,23	1,23	1,17
Estabilidade corrigida, kgf			393,1	915,3	995,4	1.188,8	1.308,5	1.168,1	1.375,3	1.348,6	1.444,3	1.484,5	1.146,8	1.328,0
Cálculo das espessuras dos Corpos de Prova														
Corpos de Prova			10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Espessuras Medidas, cm			6,37	6,03	6,25	6,20	6,07	6,80	5,97	6,08	5,97	5,64	5,66	5,80
			6,35	6,05	6,28	6,20	6,10	6,50	6,00	6,04	5,90	5,62	5,65	5,80
			6,35	6,05	6,30	6,20	6,12	6,20	6,07	6,00	5,90	5,62	5,65	5,80
			6,38	6,05	6,30	6,21	6,18	6,20	6,07	6,00	5,90	5,70	5,65	5,80
Espessuras Médias, cm			6,36	6,05	6,28	6,20	6,12	6,43	6,03	6,03	5,92	5,65	5,65	5,80
Misturas	% Ligante	Vv	RBV	Estab.	Dap									
01	8,0	15,66	47,37	955,4	1,83									
02	9,0	13,58	54,15	1.221,8	1,85									
03	10,0	10,35	63,83	1.389,4	1,90									
04	11,0	7,09	74,39	1.319,8	1,95									

APÊNDICE 5.3: 3ª Alternativa da Densidade Teórica da Mistura



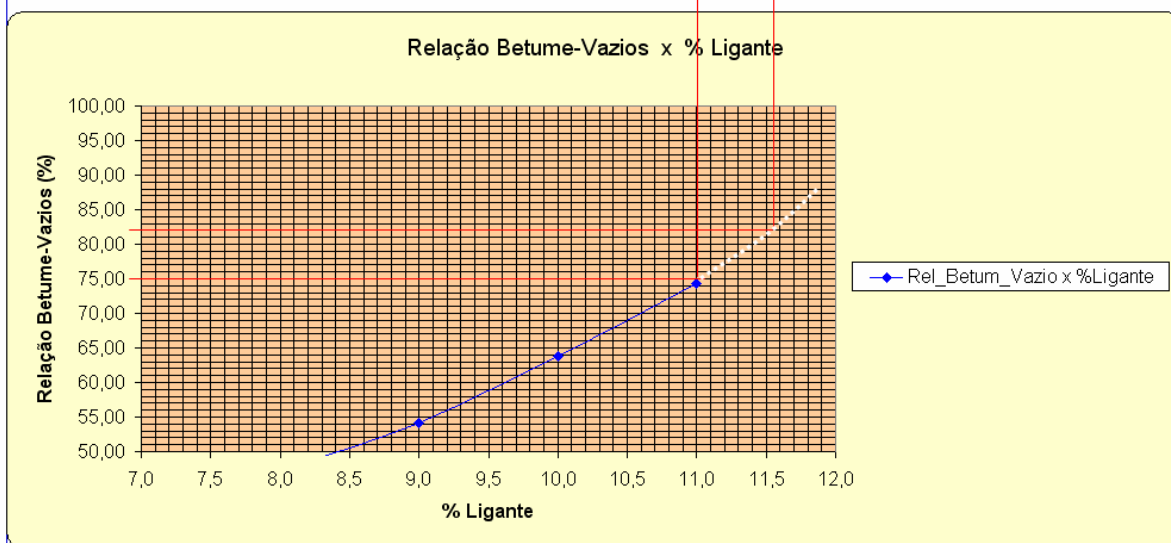
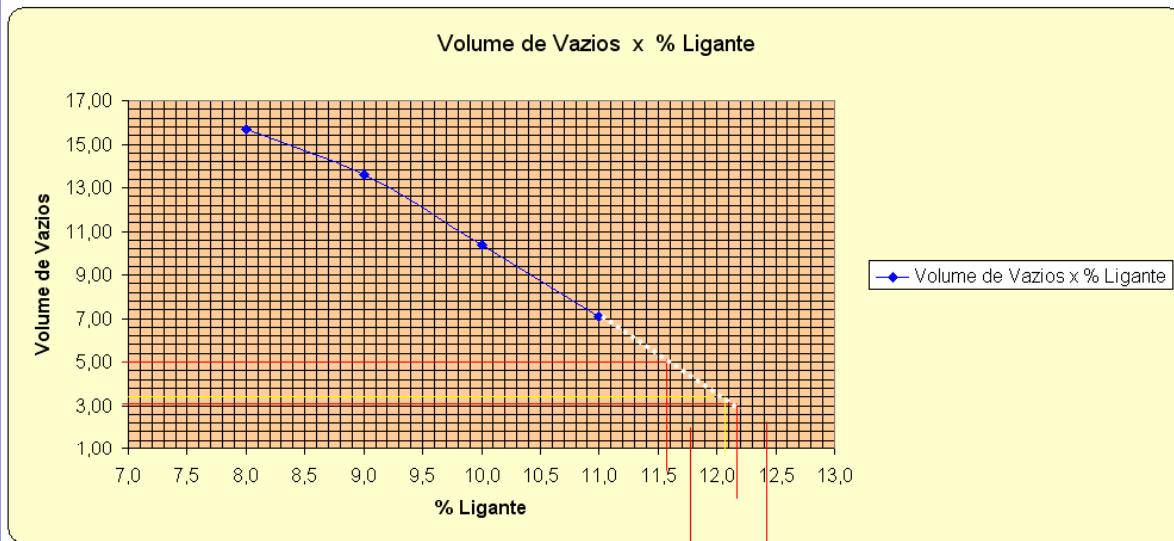
EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA



DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT
INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIA

FICHA Nº 06

GRÁFICOS PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR ÓTIMO



APÊNDICE 5.4: 4ª Alternativa da Densidade Teórica da Mistura



EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO - UFRJ
INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA - COPPE

FICHA Nº 02

FICHA DE DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA DA MISTURA (MEDIDA POR ENSAIO)
Método de RICE (James M. Rice) - ASTM D 2041 (American Society for Testing and Materials - EUA)
Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures

Origem do material	Santarém (PA)	Data:	17 Dezembro 2004
Classificação do material	Agregado graúdo	Local:	Lab. de Asfalto - COPPE
Identificação do material	Argila calcinada industrial	Laborat:	Cap Lima
Interessado	Dissertação de Mestrado - Cap Lima		

ASTM D 2041 (Método de Rice)	1º Ensaio	2º Ensaio	1º Ensaio	2º Ensaio	1º Ensaio	2º Ensaio
Teor de ligante	8%		9%		10%	
Peso da amostra seca ao ar → P _S (g)	1.508,0	1.495,0	1.502,7	1.498,6	1.495,9	1.496,4
Peso do kitazato + água + tampa → P _A (g)	6.223,9	6.223,9	6.223,9	6.223,9	6.223,9	6.223,9
Peso do kitazato + amostra + água + tampa → P _T (g)	7.058,0	7.060,0	7.040,5	7.038,7	7.024,0	7.035,8
Peso da amostra seca superficialmente → P _{SS} (g) <small>(Procedimento extra, quando forem utilizados agregados porosos)</small>	1.530,0	1.540,0	1.525,0	1.513,2	1.509,8	1.517,7
Densidade da Mistura: $G_{MM} = \frac{P_{SS}}{P_{SS} + P_A - P_T}$	2,199	2,188	2,153	2,167	2,127	2,150
Diferença entre as duas determinações (Máx. = 0,023)	0,011		0,014		0,023	
Valor médio dos ensaios	2,193		2,160		2,139	

Cálculos complementares

Teor de ligante	8%	9%	10%	Valor médio
Densidade efetiva dos agregados: $G_{SE} = \frac{P_{MM} - P_B}{P_{MM} \cdot \frac{P_B}{G_B}}$	2,427	2,383	2,477	2,429
Densidade da Mistura: $G_{MM} = \frac{P_{MM}}{\frac{P_{SS}}{G_{SE}} + \frac{P_B}{G_B}}$ (com 11% de CAP)	2,138	2,086	2,150	2,125
Densidade da Mistura: $G_{MM} = \frac{P_{MM}}{\frac{P_{SS}}{G_{SE}} + \frac{P_B}{G_B}}$ (com 8,7% de CAP)	2,175	2,142	2,211	2,176

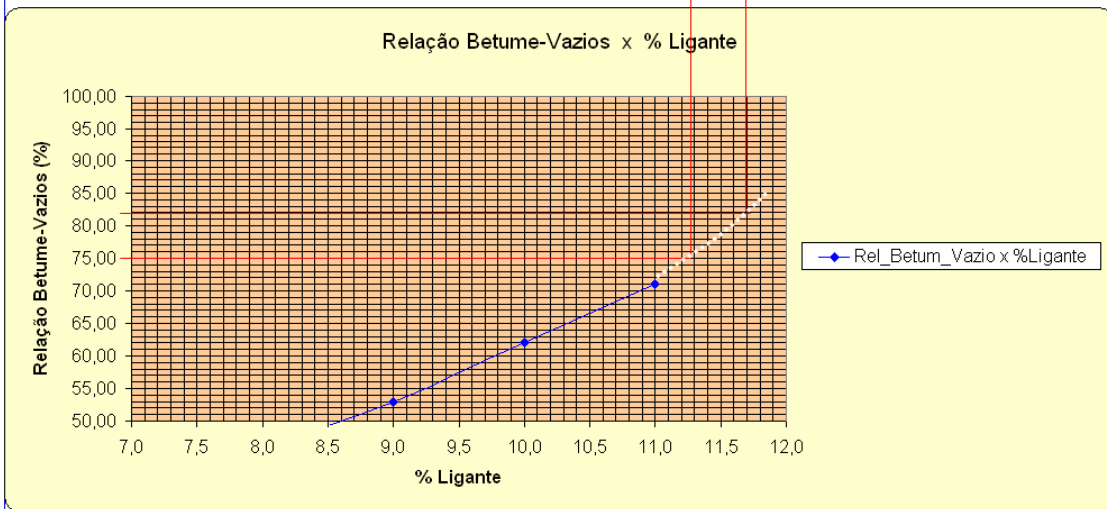
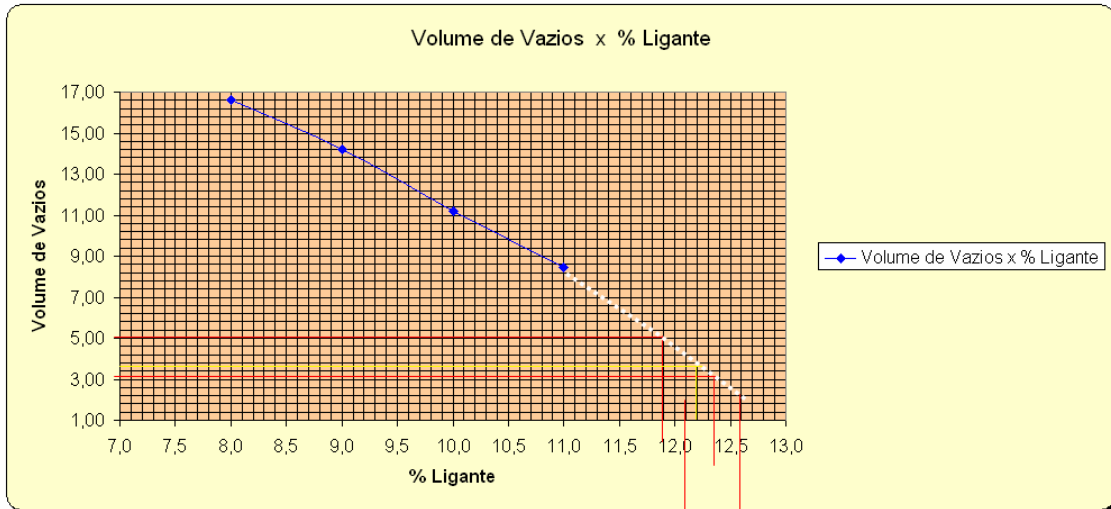
APÊNDICE 5.4: 4ª Alternativa da Densidade Teórica da Mistura



EXÉRCITO BRASILEIRO
 INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
 DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT
 INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIA

FICHA Nº 05

GRÁFICOS PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR ÓTIMO



Material	Mistura
CAP	12,1%
Agregado de argila calcinada industrial	87,90%
TOTAL (g)	100,0%

D_T	2,091
-------	-------

Do gráfico, para um teor ótimo de 12,1% o Volume de Vazios é de 3,2 %.

V_v	3,2%
D_{ap}	2,024
VCB (%)	23,55%
VAM (%)	26,75%
RBV (%)	88,04%

8.6 APÊNDICE 6: RELATÓRIO DO ENSAIO E PREVISÃO DA CURVA DE FADIGA COM O CONCRETO ASFÁLTICO PRODUZIDO

APÊNDICE 6.1: Curvas de fadiga à 25°C



EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT
INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIA - IPR



FICHA Nº 01

Resistência à Tração RT (Mpa)	Deformação Específica Resiliente Inicial (ε)	SIMULAÇÃO DA CURVA DE FADIGA																			
		1a CURVA				2a CURVA				3a CURVA				4a CURVA				5a CURVA			
		Nr do CP	Nível de Tensão (%)	Δδ (MPa)	Nr de Golpes	Nr do CP	Nível de Tensão (%)	Δδ (MPa)	Nr de Golpes	Nr do CP	Nível de Tensão (%)	Δδ (MPa)	Nr de Golpes	Nr do CP	Nível de Tensão (%)	Δδ (MPa)	Nr de Golpes	Nr do CP	Nível de Tensão (%)	Δδ (MPa)	Nr de Golpes
0,75	0,0000234	8	10%	0,30	226.497	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
0,75	0,0000234	9	10%	0,30	87.313	9	10%	0,30	87.313	9	10%	0,30	221.904	9	10%	0,30	221.904	9	10%	0,30	87.313
0,75	0,0000352	13	15%	0,45	7.603	13	15%	0,45	7.603	13	15%	0,45	7.603	13	15%	0,45	7.603	13	15%	0,45	7.603
0,75	0,0000352	16	15%	0,45	7.745	16	15%	0,45	7.745	16	15%	0,45	7.745	16	15%	0,45	7.745	16	15%	0,45	7.745
0,75	0,0000469	3	20%	0,60	2.258	3	20%	0,60	2.258	3	20%	0,60	2.258	3	20%	0,60	2.258	3	20%	0,60	2.258
0,75	0,0000469	6	20%	0,60	2.152	6	20%	0,60	2.152	6	20%	0,60	2.152	6	20%	0,60	2.152	6	20%	0,60	2.152
0,75	0,0000469	14	20%	0,60	2.661	14	20%	0,60	2.661	14	20%	0,60	2.661	14	20%	0,60	2.661	14	20%	0,60	2.661
0,75	0,0000703	2	30%	0,90	266	2	30%	0,90	266	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
0,75	0,0000703	18	30%	0,90	798	18	30%	0,90	798	18	30%	0,90	798	18	30%	0,90	798	18	30%	0,90	798
0,75	0,0000703	19	30%	0,90	821	19	30%	0,90	821	19	30%	0,90	821	19	30%	0,90	821	19	30%	0,90	821
0,75	0,0000703	34	30%	0,90	807	34	30%	0,90	807	34	30%	0,90	807	34	30%	0,90	807	34	30%	0,90	807
0,75	0,0000938	1	40%	1,20	250	1	40%	1,20	250	1	40%	1,20	250	-	-	-	-	1	40%	1,20	250
0,75	0,0000938	27	40%	1,20	909	27	40%	1,20	909	27	40%	1,20	909	27	40%	1,20	909	-	-	-	-
0,75	0,0000938	33	40%	1,20	827	33	40%	1,20	827	33	40%	1,20	827	33	40%	1,20	827	-	-	-	-
0,75	0,0000937	35	40%	1,20	1.115	35	40%	1,20	1.115	35	40%	1,20	1.115	35	40%	1,20	1.115	-	-	-	-

Equações das curvas de fadiga:

1ª Curva:	$N = 671,42 \times \Delta\delta^{-3,63}$	$R^2 = 0,8308$	PINTO (1991):	$N = 1,40 \times 10^3 \times \Delta\delta^{-2,61}$	$R^2 = 0,98$
2ª Curva:	$N = 704,2 \times \Delta\delta^{-3,1026}$	$R^2 = 0,8042$	BATISTA (2004):	$N = 542,83 \times \Delta\delta^{-2,89}$	$R^2 = 0,96$
3ª Curva:	$N = 802,7 \times \Delta\delta^{-3,0002}$	$R^2 = 0,8462$			
4ª Curva:	$N = 888,22 \times \Delta\delta^{-2,8551}$	$R^2 = 0,8346$			
5ª Curva:	$N = 444,75 \times \Delta\delta^{-3,8465}$	$R^2 = 0,9611$			

APÊNDICE 6.1: Curvas de fadiga à 25°C



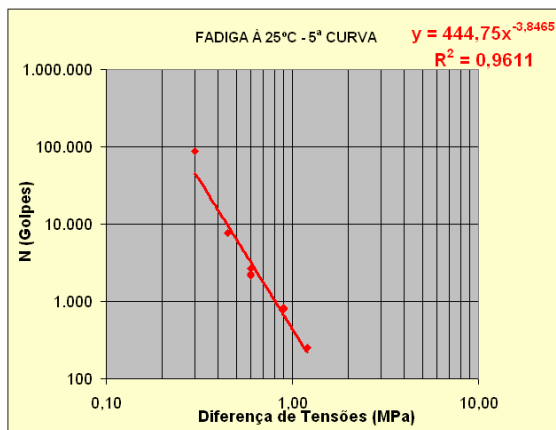
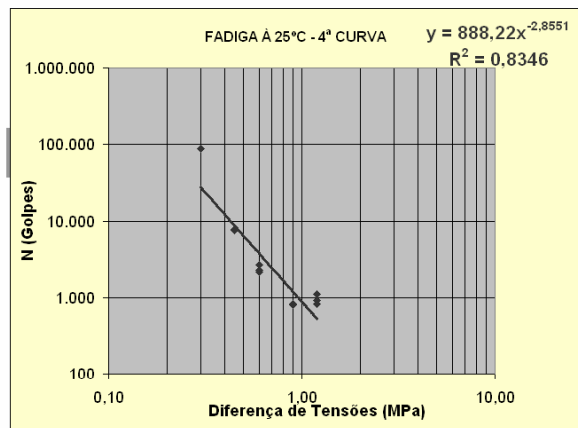
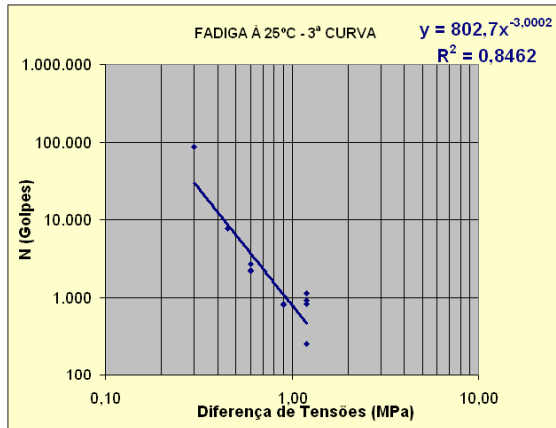
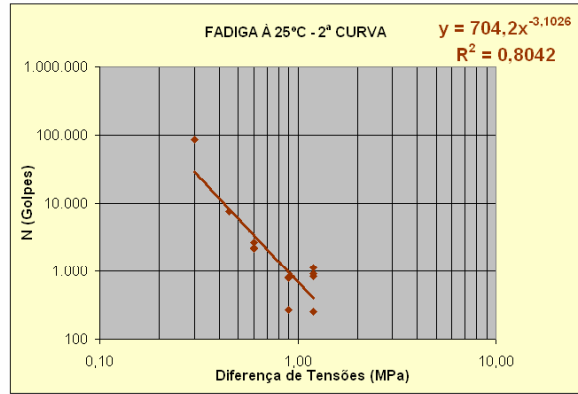
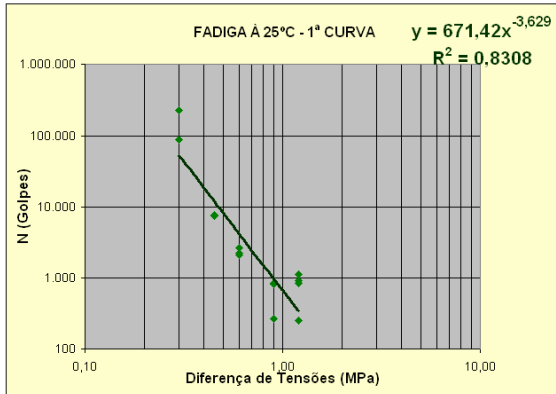
EXÉRCITO BRASILEIRO
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA



DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT
INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIA

FICHA Nº 02

CURVAS DE FADIGA OBTIDAS



APÊNDICE 6.1: Curvas de fadiga à 25°C

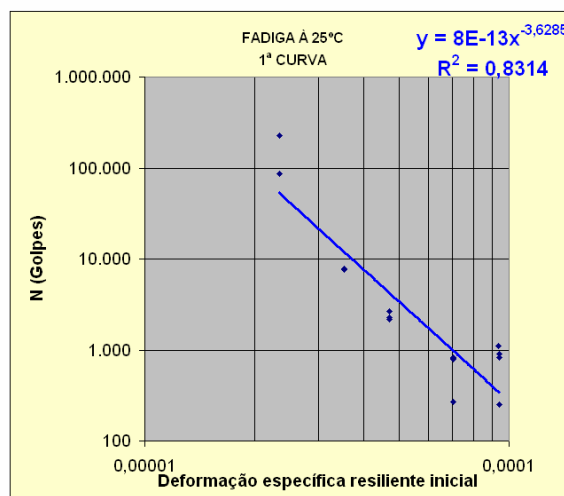
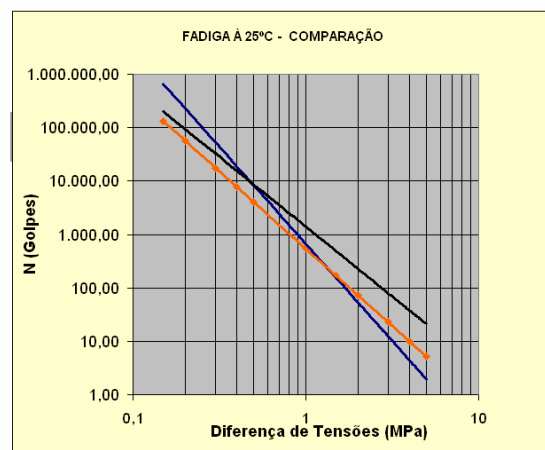
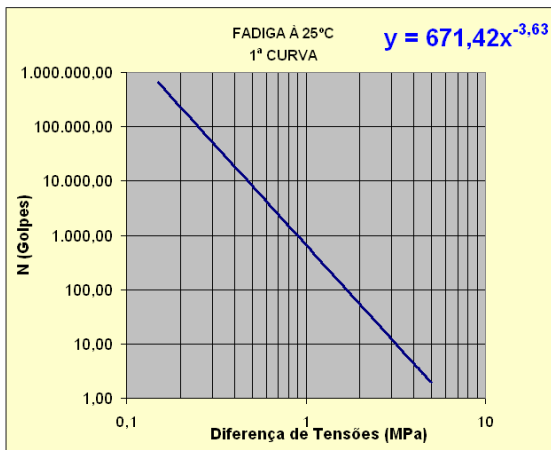
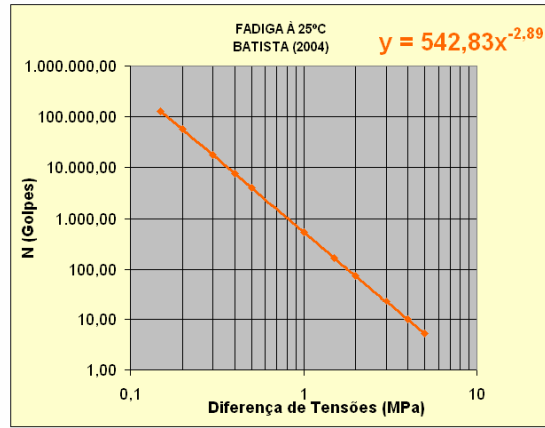
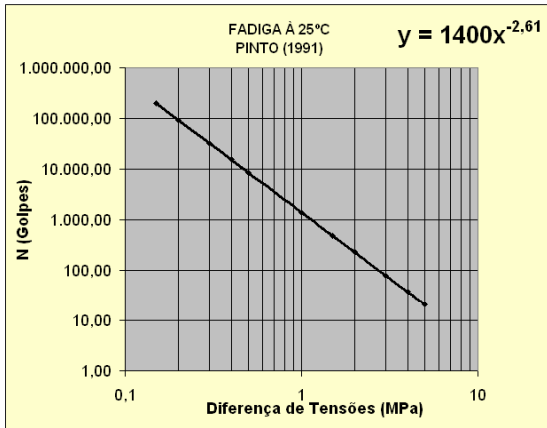


EXÉRCITO BRASILEIRO
 INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
 DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT
 INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIARIA



FICHA Nº 03

CURVAS DE FADIGA - COMPARAÇÃO



9 ANEXOS

9.1 ANEXO 1

MAPA DE OCORRÊNCIAS MINERAIS DO PROJETO ARGILA-BELÉM

(ANEXO DISPONÍVEL NO CD-ROM)

9.2 ANEXO 2

MAPA DE LOCALIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DOS FUROS DE SONDAGEM DAS AMOSTRAS DE ARGILA DO PROJETO ARGILA-BELÉM

(ANEXO DISPONÍVEL NO CD-ROM)

9.3 ANEXO 3

RESULTADOS DA ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X DAS
AMOSTRAS DE ARGILA DO PROJETO ARGILA-BELÉM

(ANEXO DISPONÍVEL NO CD-ROM)

9.4 ANEXO 4

CLASSIFICAÇÃO PRELIMINAR QUANTO AO USO CERÂMICO E DEMAIS
ENSAIOS REALIZADOS COM AS AMOSTRAS DO PROJETO ARGILA-BELÉM

(ANEXO DISPONÍVEL NO CD-ROM)

9.5 ANEXO 5

MAPA DE CAMINHAMENTO GEOLÓGICO COM A LOCALIZAÇÃO DAS
SONDAGES, AMOSTRAS COLETADAS E AMOSTRAS ANALISADAS

(ANEXO DISPONÍVEL NO CD-ROM)

9.6 ANEXO 6

CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DE ARGILAS DE SANTARÉM (NETO et al., 1997).

IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS: CN-AR-01 e 01-A

COORDENADAS: 02° 25' 048 / 54° 38' 422

LOCALIZAÇÃO: LAGOA DO PRATA (Alagado)

DESCRIÇÃO: Argila de coloração cinza acastanhada, plástica, contendo matéria orgânica e baixa percentagem de areia

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: CN-AR-02

COORDENADAS: 02° 25' 286 / 54° 38' 410

LOCALIZAÇÃO: ARAPEMÃ (Alagado)

DESCRIÇÃO: Argila de coloração cinza acastanhada, plástica, contendo matéria orgânica e baixa percentagem de areia

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: CN-AR-03

COORDENADAS: 02° 28' 383 / 54° 36' 937

LOCALIZAÇÃO: PEREQUETÉ (Alagado)

DESCRIÇÃO: Argila de coloração cinza acastanhada, muito plástica, contendo matéria orgânica e baixa percentagem de areia

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: CN-AR-04

COORDENADAS: 02° 27' 877 / 54° 37' 970

LOCALIZAÇÃO: BOM FUTURO (Alagado)

DESCRIÇÃO: Argila de coloração cinza azulada, com pátinas acastanhadas, muito plástica, contendo matéria orgânica e baixa percentagem de areia

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: CN-AR-04-A

COORDENADAS: 02° 27' 877 / 54° 37' 970

LOCALIZAÇÃO: BOM FUTURO (Alagado)

DESCRIÇÃO: Argila de coloração cinza acastanhada, plástica, contendo matéria orgânica e baixa percentagem de areia

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: CN-AR-05

COORDENADAS: 02° 28' 238 / 54° 39' 283

LOCALIZAÇÃO: MAICÁ I (Alagado)

DESCRIÇÃO: Argila de coloração cinza acastanhada, plástica, contendo matéria orgânica e baixa percentagem de areia

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: CN-AR-06

COORDENADAS: 02° 28' 472 / 54° 39' 234

LOCALIZAÇÃO: MAICÁ II (Alagado)

DESCRIÇÃO: Argila de coloração negra, muito plástica, rica em matéria orgânica e sem a presença de areia e silte

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: CN-AR-07

COORDENADAS: 02° 28' 157 / 54° 38' 732

LOCALIZAÇÃO: MAICÁ III (Alagado)

DESCRIÇÃO: Argila de coloração negra, muito plástica, rica em matéria orgânica, sem a presença de silte e areia

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: CN-AR-08

COORDENADAS: 02° 28' 298 / 54° 42' 425

LOCALIZAÇÃO: URUMARI - Terreno do Assunção (Terra firme)

DESCRIÇÃO: Argila pertencente a zona argilosa de um perfil laterítico; coloração cinza chumbo, *blocky*; com presença de silte.

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: CN-AR-08 A

COORDENADAS: 02° 28' 298 / 54° 42' 425

LOCALIZAÇÃO: URUMARI - Terreno do Assunção (Terra firme)

DESCRIÇÃO: Argila de um perfil laterítico (zona colunar), *blocky*; pouco enriquecida em ferro; coloração castanho amarelada, contendo baixos teores de areia e silte

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: CN-AR-08-B

COORDENADAS: 02° 28' 298 / 54° 42' 425

LOCALIZAÇÃO: URUMARI - Terreno do Assunção (Terra firme)

DESCRIÇÃO: Argila pertencente a zona argilosa de um perfil laterítico; coloração castanho amarelada com nódulos avermelhados; *blocky*; contendo baixos teores de silte e areia.

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: CN-AR-09

COORDENADAS: 02° 29' 248 / 54° 47' 034

LOCALIZAÇÃO: CUCURUNÃ - (Terra firme)

DESCRIÇÃO: Argila de coloração cinza escuro, *blocky*, contendo matéria orgânica e baixas percentagens de silte. Quando bem queimada passa de vermelho para esbranquiçado, segundo informação dos oleiros.

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: CN-AR-10

COORDENADAS: 02° 28' 788 / 54° 41' 477

LOCALIZAÇÃO: SÃO BRAZ - (Terra firme)

DESCRIÇÃO: Argila pertencente a zona mosqueada de um perfil laterítico; coloração bege com nódulos avermelhados; *blocky*, contendo alguma matéria orgânica e baixa percentagem de silte.

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: CN-AR-11

COORDENADAS: 02° 28' 788 / 54° 41' 477

LOCALIZAÇÃO: MUTUNUI (Terra firme)

DESCRIÇÃO: Encontrada na base de um perfil laterítico, esta argila é cinza escura, *blocky*, contendo matéria orgânica e baixa percentagem de silte

9.7 ANEXO 7

ANÁLISE MINERALÓGICA DE ARGILAS DE SANTARÉM (NETO et al., 1997).

a) Análise mineralógica global por difração de raios X

Nº de Campo	Nº de Lab.	MINERAIS IDENTIFICADOS
CN-01	DCR642	Quartzo, mineral do grupo da caulinita, mineral do grupo das micas, feldspato, minerais de argila.
CN-01-A	DCR643	Quartzo, mineral do grupo da caulinita, mineral do grupo das micas, feldspato, minerais de argila
CN-02	DCR644	Quartzo, mineral do grupo da caulinita, mineral do grupo das micas, feldspato, minerais de argila
CN-03	DCR645	Quartzo, mineral do grupo da caulinita, mineral do grupo das micas, feldspato, minerais de argila
CN-04	DCR646	Quartzo, mineral do grupo da caulinita, mineral do grupo das micas, feldspato, minerais de argila
CN-04-A	DCR647	Quartzo, mineral do grupo da caulinita, mineral do grupo das micas, feldspato, minerais de argila
CN-05	DCR648	Quartzo, mineral do grupo da caulinita, mineral do grupo das micas, feldspato, minerais de argila
CN-06	DCR649	Quartzo, mineral do grupo da caulinita, mineral do grupo das micas.
CN-07	DCR650	Quartzo, mineral do grupo da caulinita, mineral do grupo das micas, minerais de argila
CN-08	DCR651	Quartzo, mineral do grupo da caulinita.
CN-08-A	DCR652	Quartzo, mineral do grupo da caulinita, minerais de argila, goethita.
CN-08-B	DCR653	Quartzo, mineral do grupo da caulinita, minerais de argila
CN-09	DCR654	Quartzo, mineral do grupo da caulinita, minerais de argila
CN-10	DCR655	Quartzo, mineral do grupo da caulinita.
CN-11	DCR656	Quartzo, mineral do grupo da caulinita.

b) Análise mineralógica para minerais de argila

Nº de Campo	Nº de Lab.	MINERAIS IDENTIFICADOS
CN-01	DCR642	Esmectita, illita, mineral do grupo da caulinita, camada mista irregular de illita-esmectita, camada mista irregular de illita-clorita.
CN-01A	DCR643	Esmectita, illita, mineral do grupo da caulinita, camada mista irregular de illita-esmectita, camada mista irregular de illita-clorita (?).
CN-02	DCR644	Esmectita, illita, mineral do grupo da caulinita, camada mista irregular de illita-esmectita, camada mista irregular de illita-clorita.
CN-03	DCR645	Esmectita, illita, mineral do grupo da caulinita, camada mista irregular de illita-esmectita, camada mista irregular de illita-clorita.
CN-04	DCR646	Esmectita, illita, mineral do grupo da caulinita, camada mista irregular de illita-clorita, clorita (?).
CN-04-A	DCR647	Esmectita, illita, mineral do grupo da caulinita, camada mista irregular de illita-esmectita, camada mista irregular de illita-clorita (?).
CN-05	DCR648	Esmectita, illita, mineral do grupo da caulinita, camada mista irregular de illita-esmectita, camada mista irregular de illita-clorita.
CN-06	DCR649	Illita, mineral do grupo da caulinita, camada mista irregular de illita-clorita, clorita.
NC-07	DCR650	Esmectita, illita, mineral do grupo da caulinita, camada mista irregular de illita-esmectita, camada mista irregular de illita-clorita.
CN-08	DCR651	Mineral do grupo da caulinita, camada mista irregular de illita-esmectita (?).
CN-08-A	DCR652	Mineral do grupo da caulinita, camada mista irregular de illita-esmectita.
CN-08-B	DCR653	Mineral do grupo da caulinita, camada mista irregular de illita-esmectita.
CN-09	DCR654	Mineral do grupo da caulinita, camada mista irregular de illita-esmectita.
CN-10	DCR655	Illita, mineral do grupo caulinita.
CN-11	DCR656	Mineral do grupo caulinita.

9.8 ANEXO 8

TRADUÇÃO DO MÉTODO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE REAL DE AGREGADOS LEVES GRAÚDOS

LDH TR-312-69 – DETERMINATION OF SPECIFIC GRAVITY OF COARSE LIGHTWEIGHT AGGREGATE

ASSUNTO:

Este método tem como objetivo determinar a densidade real de agregados leves.

APARELHAGEM NECESSÁRIA:

- (a) Balança com capacidade para 1.000 gramas, e sensibilidade para 0,1 grama.
- (b) Forno, placa aquecedora ou bico queimador.
- (c) Bomba de vácuo.
- (d) Tacho, colher para agitação, frasco de vidro com tampa, etc.

AMOSTRAS

- (a) As amostras devem ser representativas do material a ser usado na construção. Os materiais devem ser testados em triplicata e calculada a média. O material deve ser selecionado em uma peneira Nr. 4 e a porção retida nessa peneira, deve ser usado neste procedimento. O material deve ser secado antes desta preparação para a determinação da densidade.
- (b) Uma amostra de cimento asfáltico de mesma fonte e padrão a ser usado durante a construção deve ser obtida, se possível. Se não estiver disponível, um cimento asfáltico de características físicas similares deve ser usado.

PROCEDIMENTO

- (a) Aqueça o agregado selecionado e seco, e o cimento asfáltico a 148^oC/162^oC.
- (b) Pese e registre aproximadamente 250 gramas do agregado e coloque-o em um tacho limpo ou recipiente de mistura.
- (c) Pese entre 10 a 15 por cento de cimento asfáltico dentro do pote com base no

peso do agregado. O método das tentativas pode ser usado para determinar a percentagem correta de cimento asfáltico necessário para cobrir completamente o agregado.

(d) Misture o agregado e o cimento asfáltico até que cada partícula do agregado esteja completamente e uniformemente revestida. Durante a mistura pode ser necessário manter o tacho sobre um queimador *bunsen* por alguns minutos enquanto se promove a mistura para permitir um revestimento uniforme.

(e) Derrame a mistura em uma superfície limpa e deixe-a esfriar em temperatura ambiente.

(f) A mistura já fria deve então ser pesada ao ar, e o peso registrado.

(g) Calcular a percentagem exata do asfalto na mistura, tomando bastante cuidado para não perder qualquer das partículas revestidas.

$$C = \frac{B - A}{A} \times 100$$

A = Peso do agregado seco

B = Peso da mistura seca

C = Percentual de asfalto na mistura

(h) Encha o frasco de vidro com água até que a água atinja a borda do frasco; deslize cuidadosamente a tampa sobre o frasco de modo a não criar qualquer bolha de ar desnecessária entre a tampa e a água. Aperte a tampa e seque a parte externa da jarra com um pano limpo. Pese o frasco cheio de água e registre o peso.

(i) Derrame fora do frasco aproximadamente metade da água e preencha com a mistura do agregado e asfalto. Recoloque tanta água quanto seja necessária para cobrir a mistura e coloque sob vácuo por 10 minutos. Agite o frasco para retirar o ar retido.

(j) Remova do vácuo e encha o frasco como descrito no parágrafo (h). Alguma das partículas mais leves pode flutuar; entretanto, após aplicar a tampa, estas partículas irão voltar a submergir dentro da água.

Nota: (É admissível haver uma pequena tela disposta dentro do gargalo do frasco para reter as partículas leves que permanecem na parte superior do frasco. Nesse

caso, a tela deve ser pesada com o frasco quando o peso for registrado).

Após a tampa ser firmemente apertada contra o frasco, o frasco deve ser secado com um pano limpo e o peso registrado.

(k) Calcule a densidade real combinada da mistura como segue:

$$F = \frac{B}{D + B - E}$$

B = Peso da mistura seca

D = Peso do frasco e água

E = Peso do frasco, água e mistura

F = Densidade real combinada da mistura.

(l) Após a obtenção da densidade real da mistura F calcula-se a densidade real do agregado leve como se segue:

$$G = \frac{X}{\frac{100}{F} - \frac{C}{H}}$$

X = Percentual de agregado na mistura

H = Densidade do cimento asfáltico

9.9 ANEXO 9

TRADUÇÃO DO MÉTODO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA E DENSIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS (MÉTODO DE RICE)

ASTM D 2041-00 - STANDARD TEST METHOD FOR THEORETICAL MAXIMUM SPECIFIC GRAVITY AND DENSITY OF BITUMINOUS PAVING MIXTURES

1. Assunto:

Esse método de ensaio cobre a determinação da massa específica máxima teórica e a densidade de mistura asfáltica não compactada à 250C (770F).

2. Documentos de referência:

2.1. Padrões ASTM

C670 – Prática para preparar resultados de precisão e tendências para métodos de teste para materiais de construção.

D979 – Prática para amostragem de misturas asfálticas.

D4753 – Padrão para avaliação, seleção e especificação de balanças e escalas para uso em ensaios de solos, rochas e materiais de construção.

E1 – Especificação para termômetros ASTM.

E12 – Terminologia relacionada a densidade e massa específica de sólidos, líquidos e gases.

3. Terminologia:

3.1. Os termos “massa específica” e “densidade” usados nesse método de ensaio estão de acordo com a terminologia E12.

3.2. Definições

3.2.1. Densidade, como descrito pelo método: massa de um metro cúbico de material à 25⁰C (77⁰F) em unidades SI.

3.2.2. Pressão residual, conforme empregado por esse método de ensaio: a pressão num recipiente à vácuo quando é aplicado vácuo.

3.2.3. Massa específica, conforme determinado por esse método de ensaio: a relação de uma dada massa de material à 25⁰ C (77⁰ F) para a massa de um volume igual de água na mesma temperatura.

4. Resumo do método de ensaio:

4.1 Uma amostra pesada de uma mistura asfáltica seca em estufa em condição solta (não compactada) é colocada em um recipiente tarado à vácuo. É acrescida água suficiente em uma temperatura de cerca de 25⁰C para submergir a amostra completamente. O vácuo é gradualmente aplicado para reduzir a pressão residual no recipiente à vácuo até 4 kPa (30 mm de Hg) ou menos, e então mantido por 15 ± 2 min. No fim do período de vácuo, o vácuo é gradualmente solto. O volume da amostra da mistura asfáltica é obtido pela imersão do recipiente de vácuo com a amostra em um banho de água e pesando-se ou enchendo-se o nível do recipiente de vácuo com água e pesando ao ar. Tanto a temperatura e a massa são medidas nesta ocasião. Destas medições de massa e volume, é calculada a massa específica ou densidade a 25⁰C (77⁰F).

5. Significância e Uso

5.1 As massas específicas e densidades máximas teóricas das misturas asfálticas são propriedades fundamentais cujos valores são influenciados pela composição da mistura em termos de tipos e quantidades de materiais agregados e betuminosos.

5.1.1 A massa específica máxima é usada: no cálculo dos vazios de ar na mistura asfáltica compactada; no cálculo da quantidade de asfalto absorvido pelo agregado; e para dar valores metas para compactação das misturas asfálticas.

6. Aparelhagem necessária

6.1 Recipiente

6.1.1 Gamelas de vácuo - Tanto uma gamela de metal como de plástico com um diâmetro de aproximadamente 180 até 260 mm (7 até 10,25 pol) e uma altura de gamela de pelo menos 160 mm (6,3 pol) devem ser equipados com uma tampa transparente encaixada com uma gaxeta de borracha e uma conexão para a linha de vácuo. Tanto a gamela como a tampa, devem ser suficientemente rígidas para resistir a pressão de vácuo aplicada sem deformação visível. A conexão de

mangueira deve ser coberta com uma pequena peça de malha de fio fino para minimizar a perda de qualquer material fino.

Nota 1: a tampa transparente permite a observação da soltura das bolhas de ar.

6.1.2 Frasco de vácuo para pesagem só ao ar: Um frasco de vidro volumétrico (kitasato) com parede espessa com uma capacidade de aproximadamente 4.000 ml, que dispõe de um tampão de borracha com uma conexão para a linha de vácuo. A conexão de mangueira no frasco deve ser coberta com um pequeno pedaço de malha de fio fino para minimizar a perda de qualquer material fino.

6.2 Balança capaz de ser lida até 0,1 grama e conformar-se com as exigências de D4753, Classe GP2. Se, são feitas medições sob água, então a balança deve ser equipada com um aparelho de suspensão adequado e prendedor para permitir a pesagem da amostra enquanto suspensa do centro da balança.

6.3 Bomba de vácuo ou aspirador de água – capaz de evacuar ar do recipiente de vácuo para uma pressão residual de 4,0 kPa (30 mm Hg) ou menos.

6.3.1 Quando é usada uma bomba de vácuo, deve ser instalado um conector adequado entre o recipiente de vácuo e a fonte de vácuo para reduzir a quantidade de vapor entrando na bomba de vácuo.

6.4 Manômetro de pressão residual ou medidor de pressão absoluta calibrado - Esse manômetro ou medidor de pressão absoluta calibrada deve ser usado para confirmar a pressão especificada que seja aplicada ao recipiente e deve ser capaz de medir a pressão residual até 4 kPa (30 mm Hg) ou menos. Também deve ser conectado à extremidade de linha de vácuo usando um tubo apropriado, e um conector T na parte de cima do recipiente usando uma abertura separada (da linha de vácuo) na parte de cima do recipiente para prender a mangueira. Para evitar dano, o manômetro ou medidor sozinho não deve estar situado na parte de cima do recipiente, mas adjacente a ele.

Nota 2: A pressão residual no recipiente de vácuo em mm de Hg é a diferença na altura de Hg.

6.5 Manômetro ou medidor de vácuo – adequado para medir o vácuo sendo aplicado

na fonte de vácuo. Esse dispositivo pode ser ligado diretamente à fonte de vácuo ou estar na linha de vácuo próximo a fonte.

Nota 3: a perna de vácuo de um manômetro de pressão residual ocasionalmente adquire uma ou mais bolhas de ar que introduzem erro na leitura de pressão residual. Um medidor de vácuo adicional ou manômetro detecta rapidamente diferenças entre as duas medições de vácuo.

6.6 Termômetros – termômetros calibrados de faixa adequada com subdivisões e erro de escala máxima $0,5^{\circ}\text{C}$ ($0,9^{\circ}\text{F}$), ou deve ser usado qualquer outro dispositivo termométrico de acuidade, precisão e sensibilidade igual. Termômetros devem se conformar com as exigências de E1.

6.7 Banho de água – é necessário que possa manter por quaisquer meios uma temperatura constante entre 20° e 30°C (70° e 85°F). O banho de água deve ser adequado para imersão do recipiente suspenso com sua amostra desaerada.

6.8 Válvula sangradora – presa ao trem de vácuo para facilitar tanto o ajuste do vácuo sendo aplicado ao recipiente de vácuo como para soltar lentamente a pressão de vácuo.

6.9 Dispositivo de agitação mecânica – capaz de aplicar uma agitação suave, porém consistente da amostra. Este dispositivo deve ser equipado com meios de ancorar firmemente o recipiente de modo que não se mexa sobre a superfície do dispositivo.

Nota 4: Se forem detectados problemas de retirada do ligante asfáltico, o dispositivo pode ser equipado com um controle de velocidade.

6.10 Estufa - capaz de manter uma temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$). Isto é necessário quando são testadas amostras diferentes das misturas preparadas pelo laboratório usando um agregado seco em estufa.

7. Amostragem

7.1 Obter a amostra de acordo com D979.

7.2 A massa da amostra deve ser:

Tamanho do agregado máximo nominal	Massa de amostra mínima (g)
37,5 mm ou maior	5.000
19 mm até 25 mm	2.500
12,5 mm ou menor	1.500

7.3 Amostras maiores do que cerca de 2/3 do volume do recipiente devem ser testadas em partes, com nenhuma das partes testadas sendo inferior a 1.250 g.

8. Calibração do recipiente

8.1 Gamelas – Calibre o recipiente pela determinação acurada da massa do recipiente imerso em água a $25^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ($77 \pm 0,9^{\circ}\text{F}$). Chame esta massa de B.

8.1.1 Se a gamela é usada para pesagem ao ar, a tampa volumétrica deve ser colocada sobre a gamela enquanto sob água. A gamela com água, com a tampa no lugar deve então ser retirada e secada antes para determinar a massa combinada da gamela, tampa e água. Repita três vezes e tire a média. Chame a massa média de D.

8.2 Frasco (kitasato) – calibre o frasco volumétrico pela determinação acurada da massa do frasco cheio com água a uma temperatura de $25 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ($77 \pm 0,9^{\circ}\text{F}$). Chame esta massa de D. O enchimento acurado do frasco deve ser garantido pelo uso de uma placa de tampa de vidro ou similar, placa transparente plana, lisa.

9. Procedimento

9.1 Se a mistura asfáltica foi preparada em laboratório usando agregados secos em estufa, faça segundo a seção 9.2. Qualquer outra amostra deve ser seca até massa constante (repetições de massa dentro de 0,1% para pesagens de 15 minutos consecutivos) em uma temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($221 \pm 9^{\circ}\text{F}$).

9.2 Uma vez que a amostra esteja seca e enquanto ainda estiver morna, separe as partículas da amostra da mistura asfáltica com a mão, tomando cuidado para não fraturar o agregado, de modo que as partículas da parte do agregado fino não sejam maiores do que cerca de 6 mm. Resfrie a amostra até a temperatura ambiente, separe a mistura de modo que as partículas da parte do agregado fino não sejam maiores do que cerca de 6 mm, e coloque-a diretamente na gamela tarada ou frasco volumétrico. Não deve ser usado um recipiente dentro de um recipiente. Pese o

recipiente com a amostra e chame a massa líquida (só massa da amostra) de A.

9.3 Acrescente água suficiente em uma temperatura de aproximadamente 25⁰C (77⁰F) para cobrir a amostra completamente. Coloque a tampa (gamelas) ou tampão (frasco) no recipiente.

9.4 Coloque o recipiente com a amostra e água em um dispositivo de agitação mecânica e ancore-o na superfície do dispositivo. Comece a agitação e imediatamente inicie a retirada de ar retido na amostra aumentando gradualmente a pressão de vácuo até que a pressão residual do manômetro leia 3,7 +/- 0,3 kPa (27,5 +/- 2.25 mm Hg). O vácuo deve ser alcançado dentro de 2 minutos. Uma vez que o vácuo seja atingido, continue a fazer vácuo e a agitação por 15 +/- 2 minutos.

9.5 Gradualmente solte a pressão do vácuo usando a válvula de sangramento e siga com uma das determinações seguintes:

9.5.1 Pesagem em água – coloque a gamela (sem a tampa) e conteúdo em água por 10 +/- 1 minutos e então determine a massa. Meça e registre a temperatura da água no banho. Chame a massa sob a água da gamela e amostra como C.

9.5.2 Pesagem ao ar (gamela): lentamente submerja a gamela e amostra no banho de água por 10 +/- 1 minuto. A tampa deve ser colocada também no banho de água ao mesmo tempo. Deslize a tampa sobre a gamela sem retirá-la da água de modo a evitar reter qualquer ar, então aperte firmemente a tampa sobre a gamela. Retire a gamela com a tampa no lugar do banho de água. Seque cuidadosamente a gamela e a tampa. Determine a massa da gamela, da amostra e da tampa. Meça e registre a temperatura da água na gamela. Repita este procedimento uma segunda vez. Se o peso variar mais do que 1,0 grama, repita este procedimento até que os dois pesos estejam dentro de 1,0 grama. Chama a massa da gamela, tampa, água e amostra de E.

9.5.3 Pesagem ao ar (frasco) – Lentamente encha o frasco (kitasato) com água tomando cuidado para não introduzir ar na amostra. Coloque o frasco num banho de água por 10 +/- 1 minutos para estabilizar a temperatura sem submergir a parte de cima do frasco. Meça e registre a temperatura da água no frasco. Retire os termômetros e encha completamente o frasco usando uma placa de cobertura, tomando cuidado em não reter água embaixo da placa de cobertura. A placa de cobertura deve ser a mesma usada durante a calibração do frasco. Retire toda umidade do exterior do recipiente e placa de cobertura. Determine a massa do

frasco, placa e seu conteúdo completamente cheio com água. Chame esta massa de E.

10. Cálculos

10.1 Calcule a massa específica máxima da amostra conforme mostrado a seguir:

10.1.1 Determinação de gamelas usadas sob água

$$G_{mm} = \frac{A}{A - (C - B)}$$

onde:

G_{mm} = massa específica máxima da mistura

A = massa da amostra seca ao ar, em g.

B = massa da gamela sob água, em g.

C = massa da gamela a amostra sob água, em g.

10.1.2 Determinação da gamela ao ar

$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E}$$

onde:

G_{mm} = massa específica máxima da mistura

A = massa da amostra seca no ar, em g.

D = massa da tampa e gamela com água a 25°C (77°F), em g.

E = massa da tampa, gamela e água a 25°C (77°F), em g.

10.1.3 Determinação do frasco (kitasato)

$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E}$$

onde:

G_{mm} = massa específica máxima da mistura

A = massa da amostra seca no ar, em g.

D = massa da tampa e gamela com água a 25°C (77°F), em g.

E = massa do frasco, placa tampa, gamela e água a 25°C (77°F), em g.

10.2 Se a amostra foi testada em várias partes, registre a massa específica máxima

média pesada, para todas as partes testadas.

10.3 Se a temperatura da água não era 25°C (77°F), multiplique a massa específica máxima pelo fator de correção de densidade apropriado (multiplicador) da Tabela 1.

11. Procedimento suplementar para misturas contendo agregados porosos

11.1 Se os poros dos aglomerados não estão totalmente vedados pela película asfáltica, podem tornar-se saturados com água durante o procedimento à vácuo. Para determinar se isto ocorreu, faça como mostrado a seguir, depois de terminar o procedimento de acordo com 9.5.1, 9.5.2 ou 9.5.3.

11.1.1 Drene a água do contêiner. Para evitar a perda de partículas finas, decante a água através de uma peneira de 75 µm (200 mesh).

11.1.2 Quebre vários pedaços grandes do agregado e examine se nas superfícies fraturadas há umidade. Se não há dúvidas se a mistura absorveu água, siga com este teste de maneira a determinar se esta correção é necessária.

11.2 Se o agregado absorveu água, espalhe a amostra numa bandeja plana com uma superfície não absorvente e coloque em frente a um ventilador para retirar a umidade da superfície. Quebre os aglomerados de mistura com a mão. A amostra deve ser agitada intermitentemente de maneira que as partículas de agregado sejam roladas sobre si mesmas mais do que simplesmente deslocadas horizontalmente em uma bandeja. Este processo dura cerca de duas horas. Tome cuidado em evitar a perda de partículas da mistura.

11.3 Pese a bandeja e amostre em intervalos de 15 minutos. Quando a perda em massa é inferior a 0,05% para este intervalo, a amostra pode ser considerada estar seca na superfície.

11.4 Substitua a massa final com superfície seca por A, e use este valor no denominador das equações mostradas na Seção 10.

12. Relatório

12.1 Elabore um relatório com as informações seguintes:

12.1.1 Massa específica máxima, G_{mm} até a terceira casa decimal.

12.1.2 Tipo de mistura

12.1.3 Tamanho da amostra

12.1.4 Número de amostras

12.1.5 Tipo de contêiner

12.1.6 Tipo de procedimento

Tabela 1. Fatores de correção Temperatura-Densidade para °C.

Temperatura	Multiplicador	Temperatura	Multiplicador
21.0	1.000951	25.5	0.999870
21.5	1.000840	26.0	0.999738
22.0	1.000728	26.5	0.999604
22.5	1.000613	27.0	0.999466
23.0	1.000495	27.5	0.999327
23.5	1.000375	28.0	0.999186
24.0	1.000353	28.5	0.999042
24.5	1.000127	29.0	0.998897
25.0	1.000000	29.5	0.998748

13. Precisão

13.1 Os critérios para julgar a aceitabilidade dos resultados do ensaio de massa específica obtidos por este método são dados na tabela seguinte:

Ensaio realizado e tipo de ensaio executado	Desvio Padrão	Faixa aceitável para resultados de dois ensaios
Resultados de ensaios sem uso da seção 11 ^(A)		
Precisão de operador único	0,0080	0,023
Precisão com vários operadores	0,0160	0,044
Resultados de ensaios usando a seção 11, somente para o método da gamela ^(B)		
Precisão de operador único	0,0064	0,018
Precisão com vários operadores	0,0193	0,055

(A) base da estimativa: análise dos resultados de ensaios, de 167 até 337 laboratórios participando do *AASHTO Materials Reference Laboratory (AMRL) Proficiency Sample Program*.

(B) base da estimativa: 2 réplicas, 7 materiais, 20 laboratórios.

13.2 Os números dados na Coluna 2 são os desvios padrões que foram considerados apropriados para as condições de ensaio descritas na Coluna 1. Os números dados na Coluna 3 são os limites que não devem ser excedidos pela diferença entre os resultados de dois ensaios conduzidos adequadamente.

13.3 Os valores na coluna 3 são a faixas aceitáveis para dois ensaios. Quando mais de dois resultados estão sendo avaliados, a faixa dada na Coluna 3 deve ser aumentada. Multiplique o desvio padrão na Coluna 2 pelo multiplicador dado na tabela 1 do C670 para a dada na C670.

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](#)