

UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS DE ARGILA CALCINADA EM PAVIMENTAÇÃO;
UMA ALTERNATIVA PARA O ESTADO DO ACRE

Ricardo Ribeiro do Nascimento

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
CIVIL.

Aprovada por:

Profa. Laura Maria Goretti da Motta, D.Sc.

Prof. Jacques de Medina, L.D.

Prof. Francisco José Casanova de Oliveira e Castro, D.Sc.

Prof. Jonas Alexandre, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
FEVEREIRO DE 2005

NASCIMENTO, RICARDO RIBEIRO

Utilização de Agregados de Argila Calcinada em Pavimentação; Uma Alternativa para o Estado do Acre [Rio de Janeiro] 2005.

XIV, 171p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2005)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Argila Calcinada
2. Agregado Sintético
3. Mistura Asfáltica
4. Solo - Agregado

I. COPPE/UFRJ II. Título (série).

*Às mulheres de minha vida, minha mãe,
Sebastiana B. Ribeiro e minha esposa Ana Paula S.
Castro*

Ao meu filho querido que logo virá.

AGRADECIMENTOS

- À Deus, em primeiro lugar e acima de qualquer coisa, e a Meishu-Sama pela permissão que tive de passar por este processo engrandecedor;
- À minha família que sempre me apoiou e incentivou. Em especial a minha querida mãe, Sebastiana B. Ribeiro, que mesmo com saudades me encorajou em todos os momentos desta caminhada;
- À minha esposa, pelo amor e companheirismo, mas principalmente por estar gerando o presente mais perfeito de minha vida, meu filho João Ricardo C. R. do Nascimento;
- À minha orientadora, professora Laura Maria Goretti da Motta pela cordialidade, atenção e carinho, que permitiram encontrar nesta, ensinamentos técnicos elucidativos, amizade sincera e exemplo de amor ao trabalho;
- Ao professor Medina minha admiração e respeito pela vida dedicada à engenharia. À sua ajuda na criação do Abstract e correção deste trabalho;
- Aos professores Álvaro Vieira (IME) e Jonas Alexandre (UENF) por terem contribuído de sobremaneira e sempre de forma cordial e muito prestativa no desenvolvimento desta pesquisa;
- Ao professor Francisco José Casanova pela participação na banca deste trabalho;
- Ao companheiro de estudos, Gustavo da Luz Lima Cabral, cuja troca de informações foi de fundamental importância no enriquecimento deste trabalho;
- À turma da COPPE/UFRJ, do IME e da UNEF : Guilherme, Bororó, Álvaro Dêlle, Ana Maria, Marcos Fritzen, Rodrigo Muller, Ricardo Gil, Márcio Marangon, Serginho, Carlinhos, Glória, Vanderlei, Mauro, Mozeika e demais amigos e funcionários que me ajudaram na realização dos ensaios desta pesquisa;
- Ao Engenheiro e meu primo José Assis Benvindo (DERACRE), que gentilmente coletou as amostras de solos desta pesquisa;
- Ao Engenheiro Willan A. Abreu (FUNTAC), que gentilmente me cedeu relatórios técnicos referentes aos estudos com materiais cerâmicos no Acre;
- Ao CNPq pelo apoio financeiro;
- À BR Distribuidora S. A, em especial ao engenheiro Fabrício Mourão, pelo fornecimento do CAP e do DOPE;
- À todos, que direta ou indiretamente, contribuíram na concretização deste sonho.

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

UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS DE ARGILA CALCINADA EM PAVIMENTAÇÃO;
UMA ALTERNATIVA PARA O ESTADO DO ACRE

Ricardo Ribeiro do Nascimento

Fevereiro/2005

Orientador: Laura Maria Goretti da Motta

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho estuda a fabricação e o emprego de agregados artificiais de argila calcinada na composição de misturas asfálticas e bases de solo-agregado em obras rodoviárias no Estado do Acre. São utilizados a classificação MCT e os ensaios dinâmicos como fator de decisão da aplicabilidade das misturas estudadas. Realizou-se a coleta de três solos argilosos no município de Rio Branco/AC para a produção de agregados de argila calcinada. Esses solos foram caracterizados sob o aspecto físico, químico e mineralógico com a finalidade de prever seus melhores usos na produção de agregados calcinados. Posteriormente foi selecionado aquele de melhor qualidade para os estudos em mistura asfáltica e mistura solo-agregado. Essas misturas foram caracterizadas física e mecanicamente e os resultados obtidos foram aplicados em um estudo mecanístico que permitiu avaliar o desempenho desses materiais para condições de tráfego muito leve, leve e médio. Foi avaliada ainda a possibilidade da utilização dos processos de produção de agregados leves e peças cerâmicas para produção de agregados calcinados com o objetivo de contribuir para o desenvolvimento de uma alternativa técnica e economicamente viável à produção de agregados calcinados em grande escala.

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

THE USE OF CALCINED CLAY AGGREGATES IN PAVING; AN ALTERNATIVE
FOR STATE OF ACRE

Ricardo Ribeiro do Nascimento

February /2005

Advisor: Laura Maria Goretti da Motta

Department: Civil Engineering

This thesis describes the production of artificial aggregates and the potential application in asphalt mixtures and in soil-aggregate for road construction in the state of Acre. The soil classification by the MCT system and dynamic testing served to evaluate the applicability in mixtures. Three different clay soil samples were used for the production of calcined clay aggregates. The physical, chemical and mineralogical characteristics of the three soils helped to evaluate their potential applicability as calcined clay aggregates, and which was the most adequate for using in asphalt mixture and soil-aggregate mixes. Data from physical and dynamic testing were used in a mechanistic study of pavement structures, when considering light, light and average trafficked road. An evaluation was made about the possibilities of using procedures to obtain light aggregates and ceramics products in developing technically and economically justified alternatives for a high scale production of calcined aggregates.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	01
CAPÍTULO 2 AGREGADOS ARTIFICIAIS DE ARGILA.....	09
2.1 Conceituação, classificação e fenômenos físico-químicos.....	09
2.2 Utilização em pavimentos.....	13
2.3 Matérias-primas para a produção de agregados de argila calcinada.....	19
2.4 Considerações Finais.....	24
CAPÍTULO 3 METODOLOGIAS PARA FABRICAÇÃO DE AGREGADOS DE ARGILA CALCINADA EM ESCALA INDUSTRIAL.....	26
3.1 Sistema de produção de agregados de argila expandida.....	27
3.2 Sistema de produção de telhas e blocos cerâmicos.....	30
3.3 Sugestões de produção.....	39
CAPÍTULO 4 CARACTERIZAÇÃO DE TRÊS SOLOS ARGILOSOS PARA PRODUÇÃO DOS AGREGADOS DE ARGILA CALCINADA DESSA PESQUISA.....	42
4.1 Considerações iniciais.....	42
4.2 Caracterização física.....	43
4.3 Análise química.....	47
4.4 Análise mineralógica.....	48
4.5 Classificação MCT.....	50
CAPÍTULO 5 METODOLOGIA ADOTADA PARA A FABRICAÇÃO DOS AGREGADOS CALCINADOS DESTA PESQUISA E ENSAIOS PRELIMINARES.....	52
5.1 Produção dos agregados.....	52
5.2 Ensaio preliminares para fins classificatórios.....	58
5.2.1 Perda de massa após fervura.....	59
5.2.2 Determinação da absorção de água, porosidade aparente, densidade aparente.....	61
5.2.3 Tensão de ruptura à flexão (módulo de ruptura).....	66

5.3	Seleção da massa cerâmica para a composição da mistura asfáltica e base solo-agregado.....	70
5.4	Ensaio de análise térmica diferencial (DTA) e análise termogravimétrica (DTG).....	71

CAPÍTULO 6 MISTURA ASFÁLTICA COM ARGILA CALCINADA ESTUDADA NESSA PESQUISA..... 75

6.1	Caracterização dos agregados.....	75
6.2	Obtenção e características do CAP e do DOPE.....	80
6.3	Projeto da mistura betuminosa.....	81
6.3.1	Escolha da curva granulométrica.....	81
6.3.2	Teores de projeto.....	85
6.3.3	Temperaturas de trabalho.....	87
6.3.4	Procedimento adotado na usinagem e moldagem dos corpos-de-prova	88
6.4	Características físicas da mistura.....	90
6.4.1	Densidade específica máxima medida – DMM.....	90
6.4.2	Absorção e teores de asfalto efetivo na mistura.....	96
6.4.3	Propriedades volumétricas.....	99
6.5	Ensaio para a determinação do comportamento mecânico da mistura experimental.....	101
6.5.1	Módulo de resiliência.....	102
6.5.2	Resistência à tração estática.....	105
6.5.3	Determinação da vida de fadiga.....	108
6.6	Influência da água na durabilidade da mistura.....	111
6.6.1	Influência do volume de vazios na permeabilidade da mistura pesquisada...	112
6.6.2	Dano por umidade induzida.....	117

CAPÍTULO 7 UTILIZAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS E AGREGADOS DE ARGILA CALCINADA EM PAVIMENTAÇÃO ALTERNATIVA..... 122

7.1	Considerações sobre a escolha de solos finos tropicais para a confecção de bases de pavimentos.....	122
7.2	Considerações sobre a dosagem da mistura solo-agregado.....	127
7.3	Caracterização dos materiais utilizados.....	128
7.3.1	Seleção dos materiais.....	129
7.3.2	Análise granulométrica.....	129
7.3.3	Classificação MCT.....	130
7.4	Dosagem da Mistura solo-agregado.....	134

7.5 Avaliação do comportamento mecânico do solo laterítico e mistura solo-agregado.....	135
7.5.1 Preparação dos corpos-de-prova e determinação da umidade ótima.....	136
7.5.2 Ensaio de Módulo de resiliência.....	139
7.5.3 Ensaio de deformação permanente.....	142
7.5.4 Influência dos carregamentos cíclicos no módulo de resiliência dos materiais estudados.....	144
7.6 Aplicação dos resultados.....	146
7.6.1 Critérios de dimensionamento.....	147
7.6.2 Alternativas analisadas e resultados.....	149
CAPÍTULO 8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	152
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	156

ANEXOS

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Pavimento cerâmico: Rio Branco/AC em janeiro de 2005	3
Figura 1.2 - Ocorrência de solos lateríticos no Brasil (Villibor et al, 2000).....	7
Figura 2.1 - Agregado leve Haydite (Haydite, 2004).....	10
Figura 2.2 - Produção do agregado leve Lytag nos Estados Unidos (Lytag, 2004).....	11
Figura 2.3 - Aspecto de corpos-de-prova com 9% de CAP-20 e 95% de agregados de argila calcinada do estudo de Batista (2004).....	16
Figura 2.4 - Diagrama de Winkler.....	23
Figura 3.1 - Forno rotativo para a produção de agregados leves da Cinasita em escala piloto (Santos, 1989a).....	28
Figura 3.2 - Diagrama de blocos da fabricação do agregado leve de argila expandida da CINASITA durante (Santos, 1989a).....	29
Figura 3.3 - Etapas da produção do agregado leve em Portugal (ARGEX, 2004).....	30
Figura 3.4 - Secagem natural dos corpos-verdes de blocos cerâmicos numa cerâmica de Curitiba - PR em junho de 2004 (Foto do autor).....	31
Figura 3.5 - Fornos encontrados nas cerâmicas visitadas (Fotos a, c e d do autor).....	33
Figura 3.6 - Vagoneta tipo plataforma sobre trilhos - Foto do autor.....	33
Figura 3.7 - Posição dos termopares na carga de tijolos e vagoneta.....	34
Figura 3.8 - Temperaturas registradas ao logo do ciclo de secagem e queima num forno túnel (Lehmkuhl et al.2004).....	34
Figura 3.9 - Esquema da secagem e queima em um sistema contínuo com forno Túnel (MAQTHERM, 2004).....	35
Figura 3.10 - Depósito de argilas misturadas (Foto do autor).....	37
Figura 3.11 - Caixa dosador - Foto do autor.....	37
Figura 3.12 - Maromba a vácuo - Foto do autor.....	38
Figura 3.13 - Cortadeira (Foto do autor).....	38
Figura 3.14 - Empilhadeira - Foto do autor.....	38
Figura 3.15 - Sugestão de produção dos agregados de argila calcinada em fornos cerâmicos.....	40
Figura 4.1 - Curva granulométrica da matéria-prima AM-01.....	44
Figura 4.2 - Curva granulométrica da matéria-prima AM-02.....	44
Figura 4.3 - Curva granulométrica da matéria-prima AM-03.....	45
Figura 4.4 - Curva granulométrica da mistura MT-13.....	45
Figura 4.5 - Curva granulométrica da mistura MT-23.....	45
Figura 4.6 - Curvas granulométricas das matérias - primas cerâmicas estudadas nesta pesquisa	46
Figura 4.7 - Resultados obtidos das matérias-primas estudadas.....	46
Figura 4.8 - Resultados obtidos das matérias-primas estudadas.....	51
Figura 5.1 - Laminador da UENF (Foto do autor).....	53
Figura 5.2 - Umedecimento e matéria-prima laminada com teor de umidade próximo do LL/4 (Fotos do autor).....	53
Figura 5.3 - Extrusora á vácuo da UENF (Foto do autor).....	54
Figura 5.4 - Corte das barras extrudadas (Foto do autor).....	54
Figura 5.5 Secagem ao ar dos corpos verdes (Foto do autor).....	55
Figura 5.6 - Calcinação dos agregados em forno mufla (Foto do autor).....	56
Figura 5.7 - Prensa Amsler do IME e o aparelho de abrasão Los Angeles da COPPE: Equipamentos usados nesse estudo para a britagem dos agregados (Fotos do autor). ..	56
Figura 5.8 - Peneirador mecânico da COPPE (Foto do autor).....	56
Figura 5.9 - Aspecto dos agregados antes e após a britagem por compressão.....	57

Figura 5.10 - Falha na massa cerâmica oriunda da matéria-prima AM-01 extrudada no equipamento do IME (Foto do autor).....	58
Figura 5.11 - Massa cerâmica oriunda da matéria-prima AM-01 durante a extrusão no equipamento da UENF (Foto do autor).....	58
Figura 5.12 - Perda de massa após fervura dos agregados calcinados a 950°C por 45 minutos.....	60
Figura 5.13 Etapas do ensaio de perda de massa após fervura realizadas neste estudo.....	61
Figura 5.14 - Gráfico da absorção de água versus temperatura de queima para as amostras do presente estudo.....	64
Figura 5.15 - Gráfico da massa específica aparente versus temperatura para as amostras do presente estudo.....	64
Figura 5.16 - Gráfico da porosidade aparente versus temperatura para as amostras do presente estudo.....	65
Figura 5.17 - Corpo-de-prova produzido com a matéria-prima AM-03 á 1050°C.....	65
Figura 5.18 - Adaptação numa prensa Wykenham e o sistema de aquisição de dados usado na determinação do módulo de ruptura dos corpos-de-prova deste estudo.....	68
Figura 5.19 - Gráfico da tensão de ruptura à flexão versus temperatura de queima para três materiais deste estudo.....	69
Figura 5.20 - Curvas TG, DTG e DTA da massa cerâmica MT-23.....	73
Figura 6.1 - Ilustração do procedimento de saturação dos agregados de argila calcinada através de vácuo, usado neste estudo.....	78
Figura 6.2 - Verificação da adesividade do agregado sintético de argila.....	80
Figura 6.3 - Enquadramento da mistura de agregados na nova faixa C do DNER e na faixa criada pelo LDH para CBUQ contendo agregados sintéticos de argila.....	83
Figura 6.4 - Aspecto da montagem da mistura de agregados usadas na confecção dos corpos-de-prova de mistura asfáltica deste estudo (Foto do autor).....	85
Figura 6.5 - Relação viscosidade versus temperatura do CAP usado neste estudo.....	87
Figura 6.6 -Etapas da mistura do concreto asfáltico desta pesquisa (Foto do autor).....	90
Figura 6.7 - Exemplo de corpos-de-prova moldados com 7,5% de CAP-20 e agregados calcinados nesta pesquisa (Foto do autor).....	90
Figura 6.8 - Aspecto da mistura asfáltica com agregados calcinados antes e após o condicionamento térmico (Fotos do autor).....	92
Figura 6.9 - Equipamento utilizado nesse estudo para a determinação da DMM.....	95
Figura 6.10 - Teores de asfalto efetivo para a mistura com agregado de argila calcinada e areia de rio.....	98
Figura 6.11 - Propriedades volumétricas da mistura asfáltica com agregados calcinados desta pesquisa.....	101
Figura 6.12 - Equipamento usado nesta pesquisa para o ensaio de Módulo de Resiliência (MR) de misturas asfálticas (Foto do autor).....	103
Figura 6.13 - Média dos valores do módulo de resiliência a 25°C para a mistura estudada em três teores de ligante e misturas comparativas MCC e MCNC.....	104
Figura 6.14 - Equipamento usado nesta pesquisa no ensaio de resistência à tração indireta (RT) (Foto do autor).....	105
Figura 6.15 - Valores de Resistência à Tração indireta (RT) para mistura estudada em três teores e misturas comparativas MCC e MCNC.....	107
Figura 6.16 - Posicionamento do corpo-de-prova para a realização do ensaio de fadiga (Foto do autor).....	109
Figura 6.17 - Curva de fadiga da mistura M1 (7,5% de CAP-20) em função de diferença de tensões.....	111

Figura 6.18 - Curva de fadiga da mistura M1 (7,5% de CAP-20) em função de deformação específica resiliente.....	111
Figura 6.19 - Permeabilidade versus relação espessura/diâmetro máximo do agregado (NCHRP - RTP-531).....	114
Figura 6.20 - Esquema do ensaio de permeabilidade realizado nesta pesquisa (Fotos do autor).....	116
Figura 6.21 - Coeficientes de permeabilidade das misturas M1 e Convencional.....	117
Figura 6.22 - Avaliação da adesividade da mistura M1 (7,5% de CAP-20) através da Razão de resistência à Tração (AASHTO T-283/89).....	120
Figura 7.1 Gráfico da classificação MCT (Villibor et al, 2000).....	124
Figura 7.2 Ensaio de perda de massa por imersão.....	126
Figura 7.3 - Curva granulométrica do solo SFL-01.....	130
Figura 7.4 Classe MCT do solo "SFL-01".....	131
Figura 7.5 Curvas de deformabilidade e a reta de determinação do coeficiente c' do solo "SFL-01".....	132
Figura 7.6 Curvas de Compactação para 8, 12 e 16 golpes e a reta de determinação do parâmetro d' do solo "SFL-01".....	133
Figura 7.7 - Curva perda de massa por imersão do solo "SFL-01".....	133
Figura 7.8 - Áreas no gráfico de classificação MCT indicada ao uso em bases SAFL....	134
Figura 7.9 - Curvas de distribuição granulométrica dos agregados de argila calcinada, solo laterítico (até a peneira nº 200) e mistura solo-agregado dessa pesquisa.....	135
Figura 7.10 - Curva de compactação do solo laterítico e mistura solo-agregado desta pesquisa.....	137
Figura 7.11 - Equipamentos usados na compactação dos corpos-de-prova para ensaios triaxiais desta pesquisa e aspecto do corpo-de-prova do solo SFL-01.....	138
Figura 7.12 - Equipamento utilizado nessa pesquisa para execução dos ensaios triaxiais cíclicos - COPPE/UFRJ (Fotos do autor).....	141
Figura 7.13 - Deformação plástica específica por número de solicitações dos materiais estudados.....	144
Figura 7.14 - Comparação dos módulos de resiliência para o modelo σ_d nas duas condições de ensaio.....	146

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Faixas granulométricas de projeto do DNER e do LDH para misturas de concreto asfáltico.....	17
Tabela 2.2 - Sistema de classificação de agregados sintéticos.....	18
Tabela 2.3 - Sistema de classificação de agregados sintéticos.....	18
Tabela 2.4 - Composição química de argilas adequadas para a produção de agregados expandidos.....	19
Tabela 2.5 - Composição granulométrica dos produtos de cerâmica vermelha (Pracidelli e Melchiades, 1997).....	22
Tabela 4.1 - Granulometria, limites de Atterberg e massas específica real dos grãos das argilas estudadas nesta pesquisa.....	47
Tabela 4.2 - Composição química das argilas estudadas.....	48
Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de mini-MCV e perda de massa por imersão.....	51
Tabela 5.1 - Densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água das massas cerâmicas estudadas.....	66
Tabela 5.2 - Classificação das massas cerâmicas estudadas para produzir agregados calcinados.....	71
Tabela 6.1 - Granulometria dos agregados usados na dosagem do CBUQ.....	77
Tabela 6.2 - Densidades dos agregados usados no projeto de misturas asfálticas deste estudo.....	78
Tabela 6.3 - Graduação para o ensaio Los Angeles da norma ME-035/98.....	79
Tabela 6.4 - Resultado do ensaio de abrasão Los Angeles para o agregado de argila calcinada AGC23-1050.....	79
Tabela 6.5 - Dados referentes ao ligante usado nessa pesquisa.....	81
Tabela 6.6 - Características e especificações do CAP-DOP usado neste estudo.....	81
Tabela 6.7 - Granulometria da mistura adotada nessa pesquisa e limites da faixa para agregados sintéticos de argila do LDH.....	82
Tabela 6.8 - Granulometria corrigida da mistura adotada nessa pesquisa e limites da faixa para agregados sintéticos de argila do LDH.....	85
Tabela 6.9 - Comparação entre as relações de densidade e consumo de CAP entre uma mistura convencional e a mistura pesquisada.....	86
Tabela 6.10 - Proporções de materiais adotados na fabricação dos corpos-de-prova desta pesquisa.....	89
Tabela 6.11 - Valores da densidade efetiva (De) e das densidades máximas medidas (DMM) obtidos nesta pesquisa.....	96
Tabela 6.12 - Propriedades volumétricas da mistura asfáltica com agregados calcinados desta pesquisa.....	100
Tabela 6.13 - Valores do MR para a mistura pesquisada.....	103
Tabela 6.14 - Resistência à tração e relação MR/RT a 25°C para a mistura pesquisada.....	107
Tabela 6.15 - Constantes, em MPa, do ensaio de fadiga a tensão controlada nas misturas M1, MCC e MCNC.....	109
Tabela 6.16 - Comparação entre os valores da permeabilidade de misturas asfálticas no laboratório e no campo (NCHRP, TRB, 2004).....	113
Tabela 7.1 - Granulometria e massa específica real dos grãos (G) do solo SFL-01.....	129
Tabela 7.2 - Granulometria dos agregados de argila calcinada usados no estudo de solo-agregado.....	130

Tabela 7.3 - Resultados dos ensaios de Mini-MCV e perda de massa por imersão.....	132
Tabela 7.4 - Granulometria da mistura solo-agregado dessa pesquisa.....	135
Tabela 7.5 - Montagem da mistura solo-agregado.....	136
Tabela 7.6 - Umidade ótima e peso específico aparente seco máximo dos materiais estudados.....	137
Tabela 7.7 - Pares de tensões e o número de repetições de carregamentos usados na determinação do módulo de resiliência em ensaios triaxiais cíclicos.....	140
Tabela 7.8 - Modelos, parâmetros K e valores de R ² do solo laterítico e mistura solo-agregado desta pesquisa.....	142
Tabela 7.9 - Condições dos corpos-de-prova ensaiados nesta pesquisa.....	142
Tabela 7.10 - Condições dos corpos-de-prova ensaiados.....	143
Tabela 7.11 - Comparação entre a deformação plástica específica dos materiais estudados nesta pesquisa e os estudados por Motta (1991).....	144
Tabela 7.12 - Modelos, parâmetros K e valores de R ² do solo laterítico e mistura solo-agregado obtidos após o ensaio de deformação permanente.....	145
Tabela 7.13 - Código dos materiais e valores de módulo de resiliência obtidos nos ensaios dinâmicos desta pesquisa.....	147
Tabela 7.15 - Valores máximos admissíveis para as tensões e deformações para as estruturas analisadas.....	149
Tabela 7.16 - Estruturas estudadas neste projeto mecanístico.....	149
Tabela 7.17 - Resultados das análises feitas com utilização do FEPAVE2 e equações da Tabela 7.14.....	150

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

O estado do Acre possui uma formação geológica e pedológica peculiar, caracterizada por imensas formações argilosas. Essa peculiaridade vem se mostrando um importante obstáculo no desenvolvimento da região, de forma que a maior parte das obras de engenharia, para se tornarem seguras, duráveis e viáveis, devem utilizar métodos construtivos direcionados às condições locais. A utilização de técnicas importadas de outros países e mesmo de outras regiões do país têm levado a inúmeros insucessos, em especial quando relacionadas a obras de infraestrutura terrestre.

De acordo com uma pesquisa conduzida na década de 80 pelo Sétimo Batalhão de Engenharia e Construção do Exército - 7º BEC, o solo do Acre é constituído, na sua maior parte, por argilas plásticas (Seixas, 1997) com baixa capacidade de suporte (medido através do ensaio de CBR) e elevada expansibilidade. Em menor proporção, essa pesquisa encontrou alguns materiais, considerados pela mesma, adequados ao uso em pavimentação, como argilas arenosas e arenitos inconsolidados, solos contendo concreções lateríticas e bancos de areia fina em quantidade suficiente para exploração.

Essa pesquisa aponta a serra do divisor (fronteira com o Peru) e a Serra do Moa como os únicos locais contendo rochas com qualidades satisfatórias ao uso em pavimentação neste estado. Na Figura A.1 (Anexo A), que mostra o mapa político do Acre, pode-se observar a disposição dessas ocorrências rochosas neste estado. Observa-se, que as principais vias terrestres da região atravessam áreas consideradas críticas de carência de agregados pétreos, comprometendo assim, a

construção e manutenção de importantes vias de ligação intermunicipais e interestaduais, quando dimensionadas por métodos tradicionais.

O Acre está situado no extremo sudoeste da Amazônia brasileira, entre as latitudes de 07°07'S e 11°08'S, e as longitudes de 66°30'W e 74°WGr. Sua superfície territorial é de 153.149,9 Km², correspondente a 3,9% da área amazônica brasileira e a 1,8% do território nacional (IBGE, 1995 e ZEE, 1999).

O clima da região é predominantemente quente e úmido apresentando um total pluviométrico anual que varia entre 1600mm e 2750mm, uma temperatura média de 24,5 °C e umidade relativa do ar em torno de 80 a 90% durante todo o ano (ZEE, 1999).

De acordo com o mapa pedológico deste estado (escala de 1:1.000.000), 64% do território acreano é constituído por argissolos (solos finos constituídos por minerais e argilas de baixa atividade), 24% por cambissolos (solos finos com possível comportamento laterítico) e 7,4% de gleissolos (argilas moles) (ZEE, 1999).

Tais peculiaridades geológicas, pedológicas e climáticas têm levado ao uso de algumas alternativas que visam minimizar o problema da escassez de agregados. Dentre elas cita-se a utilização de pavimentos cerâmicos (pavimento intertravado com tijolos maciços – Figura 1.1) e de solos contendo concreções lateríticas. Em Rio Branco, capital do estado, há ruas de tijolos que funcionam como corredores de linha de ônibus urbanos (FUNTAC, 2000). Os solos contendo concreções lateríticas foram utilizados amplamente em bases de pavimentos nas décadas de 80 e 90, principalmente em Rio Branco e adjacências. Nesse período o agregado graúdo utilizado em misturas asfálticas, normalmente era obtido através da lavagem das concreções lateríticas nesses solos, sendo este agregado conhecido como laterita lavada ou piçarra. Atualmente a escassez desse tipo de solo, nas proximidades da capital, tem limitado o seu uso nesse local, levando a importação de agregados de pedreiras localizadas em Rondônia, com distância de transporte superior a 300 km.

Estudos realizados pela COPPE em 2000 mostraram que uma mistura asfáltica com laterita lavada do Acre apresentou características físicas e mecânicas compatíveis, pela dosagem Marshall, com aqueles obtidos para agregados tradicionais, comprovando, do ponto de vista técnico, que este material apresenta plenas condições

de ser utilizado como alternativa à brita nos locais onde a exploração for possível (Guimarães e Motta, 2000).

Do setor aeroportuário, depende atualmente mais de uma dezena de municípios isolados nos períodos de chuvas. A necessidade de importação de agregados, bem como os altos custos de estabilizantes químicos, constituem os principais problemas de construção, manutenção e reabilitação dessas pistas de pouso e decolagem.



Figura 1.1 - Pavimento cerâmico: Rio Branco/AC em janeiro de 2005 (Foto do Autor).

O IME, através do Departamento de Engenharia e Construção, vem desde 1997 desenvolvendo estudos sobre a viabilidade técnica do emprego do agregado artificial de argila calcinada em várias obras em toda região Amazônica como alternativa ao problema da carência de agregados. Costa et al. (2000) e Batista (2004), estudaram no IME, parâmetros de fadiga e resiliência de misturas asfálticas contendo agregados de argila calcinada, cujas matérias-primas foram coletadas em vários locais da Amazônia, incluindo o estado do Acre. Os resultados desses estudos indicaram ser promissor o uso desses agregados artificiais em obras de pavimentação neste local.

Deve-se ressaltar que numa região com tantas peculiaridades como esta, a escassez de agregados não pode ser vista como único problema de implantação e conservação de vias terrestres e aeródromos. Os métodos de dimensionamento bem como os

critérios de aceitação dos materiais devem ser direcionados às características desta região. Não se pode pensar na concepção de um pavimento, onde o clima é predominantemente quente e úmido, baseando-se apenas nos procedimentos adotados em locais de clima temperado como França e Estados Unidos.

Os critérios de aceitação dos materiais que irão compor as camadas de um pavimento não podem ser generalizados independentemente da gênese do solo. Nogami & Villibor (1995) comentam que os procedimentos de estudos geotécnicos e de construção de pavimentos baseados essencialmente na tecnologia norte-americana não apresentaram bons resultados em solos tropicais, sobretudo quando dimensionados para tráfego intenso. As peculiaridades dos solos tropicais, a pobreza de materiais granulares naturais e o clima quente e úmido foram os motivos relevantes desse fracasso. Essas peculiaridades exigiram, então, um procedimento de estudos, diferente do tradicional, que não se baseava na consideração do LL, IP, granulometria por peneiramento e inúmeros outros índices tradicionais geotécnicos.

Segundo os princípios de dimensionamento norte americanos e europeus, as camadas da super-estrutura do pavimento devem ser executadas quase que exclusivamente com materiais pétreos devido a escassez de solos apropriados e condições climáticas adversas nestes locais (Villibor et al, 2000). No Brasil, a aplicação desses princípios tem, em muitos casos, levado à concepção de estruturas de pavimento cujo custo é inviável, como no caso das ruas e estradas de pequena intensidade de tráfego. Essa situação se agrava ainda mais em regiões carentes de agregados como o Acre.

A utilização de métodos mais apropriados às condições regionais, que levem em conta a concepção de pavimentos de baixo custo, não relacionados demasiadamente a fatores pedológicos e nem a propriedades de índices tradicionais, porém mais ligados à propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos compactados é de fundamental importância para viabilizar a construção de pavimentos em áreas carentes de agregados. Nesse sentido a classificação MCT (Miniatura, Compactada, Tropical) mostra-se uma técnica essencial na escolha de materiais finos para a composição das camadas subjacentes ao revestimento na região estudada nesta pesquisa.

Nesse sistema de classificação, a definição de material bom ou ruim difere da classificação tradicional, visto que não são levados em consideração os ensaios de

caracterização geotécnicos tradicionais, mas sim o grau de compactação e laterização do solo.

A metodologia mais utilizada no Brasil (Método do DNER) para o dimensionamento de estruturas de pavimentos e escolha de materiais para base e sub-base é baseada no ensaio de CBR onde os corpos-de-prova ficam imersos em água por quatro dias. Segundo Motta (1991) a utilização dessa metodologia em projetos de pavimentos no Brasil pode induzir a um “superdimensionamento” da estrutura, quanto ao afundamento ou à deformação permanente, uma vez que as camadas do pavimento, quando bem construídas, não atingem a condição saturada, pois a umidade se estabiliza próxima da umidade de compactação. Porém muitas vezes este “superdimensionamento” em relação à proteção do subleito não corresponde ao aumento de vida de fadiga e muitas vezes acontece a ruptura precoce por este aspecto.

Pesquisas Rodoviárias entre 1979 e 1984 avaliaram o efeito da sazonalidade nas deflexões dos pavimentos brasileiros. As medidas de deflexão foram obtidas através de provas de carga pneumáticas de caminhão (viga Benkelman) em 53 trechos experimentais distribuídos pelo Brasil. Essa pesquisa denominada P.A.E.P. (Pesquisa de Avaliação Estrutural de Pavimentos) buscou correlacionar a umidade do subleito com as deflexões medidas duas vezes na estação chuvosa e duas vezes na estação seca. O efeito da sazonalidade foi verificado insignificante pelo P.A.E.P. quanto a variações das deflexões induzidas pelas variações da umidade (Franco, 2000). Os resultados dessa pesquisa mostraram que a condição saturada do solo imposta no ensaio de CBR, não corresponde a real umidade das estruturas dos pavimentos no Brasil.

A adoção de critérios rigorosos, quanto à granulometria e aos índices físicos para escolha de materiais para as camadas de pavimentos, são justificáveis em países de clima temperado, visto que os ciclos de gelo e degelo podem provocar rupturas no pavimento. Essas rupturas se dão normalmente quando não são garantidas boas condições de drenagem do pavimento, ocasionando a expansão das camadas durante o congelamento no inverno e a infiltração da água durante o degelo da primavera (Medina, 1997).

A fim de evitar as conseqüências danosas do gelo e degelo no pavimento,

especificam-se, nos EUA, para as camadas de base, materiais granulares com poucos finos (menos de 3% passando na malha 0,02 mm). Entende-se que a condição de subleito saturado nos ensaios de capacidade de suporte como o CBR se imponha quando se tem as condições climáticas rigorosas citadas.

A Mecânica dos Pavimentos estuda os pavimentos como sistemas em camadas e sujeitos às cargas dos veículos. Faz-se os cálculos de tensões, deformações e deslocamentos, conhecidos os parâmetros de deformabilidade, geralmente com utilização de programas de computação. Verifica-se o número de aplicações de carga que leva o revestimento asfáltico ou a camada cimentada à ruptura por fadiga. Ensaios dinâmicos ou de cargas repetidas dos solos do subleito e das misturas asfálticas fornecem os parâmetros de deformabilidade necessários ao dimensionamento (MEDINA, 1997).

O uso de ensaios dinâmicos e da classificação MCT simula melhor o comportamento das camadas do pavimento sob a ação do tráfego e variação da umidade que o ensaio de CBR, permitindo o melhor aproveitamento dos materiais locais e conseqüentemente a construção de pavimentos mais econômicos. Embora estes conhecimentos não sejam tão recentes em termos nacionais, há pouca aplicação dos mesmos em obras do estado do Acre.

Os avanços obtidos com a aplicação da mecânica dos pavimentos no dimensionamento de pavimentos novos e reforço de pavimentos deteriorados tem levado a crer que a utilização de ensaios dinâmicos na caracterização de materiais de pavimentação e a análise não linear de sistemas em camadas, proporcionam os melhores parâmetros de projeto e a consideração mais racional de dimensionamento (MOTTA, 1991).

A classificação MCT é baseada na determinação das características de interesse geotécnico ligadas às propriedades mecânicas e hídricas dos solos tropicais finos, obtida através de ensaios em corpos de prova de dimensões reduzidas. Essa classificação divide os solos em dois grandes grupos, os de comportamento laterítico (são geralmente os solos superficiais que sofreram intenso intemperismo, sob condições bem drenadas, em regiões tropicais úmidas) e os de comportamento não laterítico, ou saprolíticos (normalmente solos residuais jovens).

Diferentemente dos solos saprolíticos os solos finos lateríticos quando compactados nas condições ótimas de energia e umidade, apresentam um considerável aumento da capacidade de suporte, do módulo de resiliência e diminuição da permeabilidade. Quando imersos em água, apresentam baixa expansibilidade e razoável coesão mostrando-se muito adequados ao uso em pavimentação.

As condições essenciais para o uso de solos finos lateríticos em bases de pavimentos são que estes apresentem condições mecânicas satisfatórias, sejam encontrados próximos da obra, em quantidade suficiente e em condições ambientais favoráveis à sua exploração. Na Figura 1.2 nota-se a incidência dos solos lateríticos em quase toda a extensão territorial brasileira sendo que na região deste estudo, o Estado do Acre, observa-se que a incidência dos solos é predominantemente laterítica argilosa por este critério.

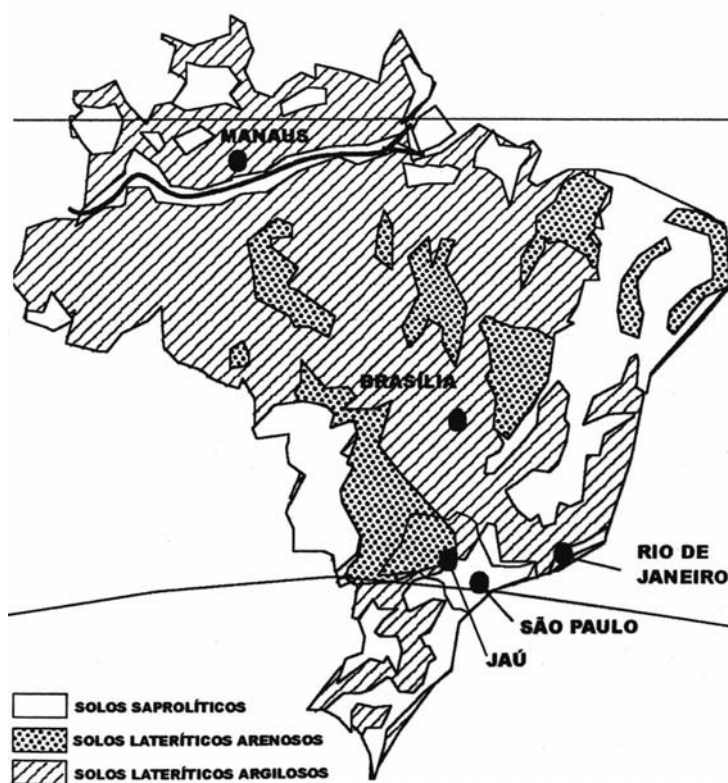


Figura 1.2 Ocorrência de solos lateríticos no Brasil (Villibor et al, 2000).

O presente trabalho pretende contribuir com o desenvolvimento de tecnologias que permitam a construção de pavimentos mais duráveis e econômicos no estado do Acre, especialmente nos municípios onde a importação de agregados é inviável. Dessa maneira pretende-se estudar o emprego de agregados artificiais de argila calcinada na composição de misturas asfálticas e bases de solo-agregado, utilizando a

classificação MCT e ensaios dinâmicos como fator de decisão da aplicabilidade dos materiais estudados em obras rodoviárias deste estado.

O presente trabalho está estruturado em sete capítulos, além deste de introdução, assim distribuídos:

- Capítulo 2 – apresenta os tipos de agregados artificiais de argila, suas aplicações, processos de produção e características das matérias-primas (solos argilosos) usadas na produção de agregados de argila calcinada;
- Capítulo 3 – estuda a possibilidade de utilizar sistemas de produção de peças cerâmicas e de agregados de argila expandida na produção de agregados de argila calcinada em escala industrial;
- Capítulo 4 – trata da coleta e caracterização de três argilas do município de Rio Branco utilizadas como matérias-primas na produção dos agregados de argila calcinada desta pesquisa;
- Capítulo 5 – apresenta a metodologia adotada para fabricar os agregados de argila calcinada desta pesquisa bem como os ensaios realizados nesses agregados com fins classificatórios;
- Capítulo 6 – trata da dosagem e caracterização sob o aspecto físico e mecânico da mistura asfáltica com agregado de argila calcinada estudada nesta pesquisa;
- Capítulo 7 – trata da coleta e caracterização um solo laterítico proveniente de Rio Branco. Estuda a possibilidade do uso in natura desse solo e em uma mistura com agregados de argila calcinada em bases de pavimentos, utilizando a classificação MCT e os ensaios dinâmicos de módulo como fator de decisão. É também apresentado um estudo mecanístico dos materiais desta pesquisa propondo algumas estruturas típicas de pavimento dimensionadas para tráfego de leve a média intensidade;
- Capítulo 8 –apresenta as conclusões deste estudo e recomendações para futuras pesquisas.

CAPÍTULO 2

2 AGREGADOS ARTIFICIAIS DE ARGILA

2.1 Conceituação, classificação e fenômenos físico-químicos.

Entende-se por agregado artificial de argila como aquele proveniente da transformação de um solo ou folhelho argiloso previamente processado, em um material inerte e com resistência mecânica satisfatória a uma determinada finalidade. Estas características são normalmente obtidas através do aquecimento da matéria-prima (solo ou folhelho) em elevadas temperaturas. A qualidade do produto acabado depende fundamentalmente da matéria-prima utilizada, da temperatura de queima e do processo de conformação da massa cerâmica (como normalmente são chamados os solos argilosos destorroados, misturados, umidecidos, laminados que são à base do processo cerâmico).

Os agregados produzidos a partir de argilas e/ou folhelhos argilosos podem ser divididos em duas classes: agregados leves (expandidos ou sinterizados) e agregados calcinados.

Segundo Santos (1989a) os agregados leves de argila podem ser classificados em dois grupos principais. O primeiro grupo baseia-se no fato de que certas argilas, folhelhos argilosos e ardósias 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 uma 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.

Segundo o dicionário Aurélio a sinterização é um processo em que duas ou mais partículas sólidas se aglutinam pelo efeito do aquecimento a uma temperatura inferior à de fusão, mas suficientemente alta para possibilitar a difusão dos átomos de duas redes cristalinas.

Nos Estados Unidos, agregados leves feitos pela expansão piropiástica de argilas e folhelhos argilosos são comercializados sob os nomes de Haydite, Rocklite, Gravelite, Cel-Seal e outros (Santos, 1989a).

O agregado leve Haydite (Figura 2.1) é obtido pelo aquecimento de fragmentos de argilas ou folhelhos em fornos rotativos em temperaturas que variam entre 1000°C e 1150°C, até que o grau desejado de formação de vesículas seja obtido (Santos, 1989a). Segundo o fabricante seu índice de absorção de água é de aproximadamente 10% (Haydite, 2004). Com esse material, concretos estruturais, de 1,60 a 1,80 g/cm³ de massa específica aparente e de resistência à compressão entre 280 a 350 kgf/cm², podem ser obtidos sem apresentar expansão apreciável pela reação álcali-agregado (Santos, 1989a).



Figura 2.1 Agregado leve Haydite (Haydite, 2004).

Na produção de agregados leves por sinterização a matéria-prima é misturada com combustível, em proporções adequadas, em seguida é depositada e queimada em fornos de sinterização de grelha móvel. 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 (Santos, 1989a). O aspecto atual da fábrica, forno de grelha móvel e do agregado Lytag estão mostrados na Figura 2.2 (Lytag, 2004).

Agregados leves podem ser feitos com uma variedade maior de argilas e folhelhos pelo processo de sinterização do que por expansão, porém os produtos obtidos pelos

dois processos são essencialmente diferentes: as partículas esféricas recobertas com uma película protetora impermeável dos agregados expandidos dão para o mesmo volume de agregado maior resistência, melhor trabalhabilidade e menor absorção de água no concreto do que os agregados de poros abertos, ou agregado sinterizados (Santos, 1989a).



Figura 2.2 Produção do agregado leve Lytag nos Estados Unidos (Lytag, 2004).

Os agregados leves expandidos já vêm a algum tempo sendo bastante utilizados pela indústria de construção civil; seja para a confecção de elementos pré-moldados de concreto armado e protendido ou ainda na construção de pavimentos como no caso da construção da ponte sobre a baía de Oakland, em São Francisco, cuja redução de peso, proporcionada pelo seu uso no revestimento do tabuleiro da ponte foi estimado em aproximadamente 134 kgf/m².

A CINEXPAN (antiga CINASITA) é a única fabricante comercial de agregados leves de argila do Brasil. O agregado da CINEXPAN se apresenta em forma de bolinhas de cerâmica leves e arredondadas (Figura 2.1), com uma estrutura interna formada por uma espuma cerâmica com microporos e com uma casca rígida e resistente. Suas principais características são: leveza, resistência, inércia química, estabilidade dimensional, incombustibilidade, além de excelentes propriedades de isolamento térmico e acústico (CINEXPAN, 2004).



Figura 2.1 Agregado leve CINEXPAN (2004)

Os agregados de argila calcinada não expandem durante o processo de calcinação apresentando boa resistência mecânica em temperaturas superiores a 760°C. Esse tipo de agregado tende a densificar com o aumento da temperatura, ganhando significativo aumento da dureza e impermeabilidade em temperaturas superiores a 1000°C. O processo de queima pode ser realizado em vários tipos de fornos, desde os fornos cerâmicos (quando a temperatura desejada é inferior a 1000°C) até em fornos rotativos. Na queima dos corpos secos (solo processado e seco ao ar ou em estufa a 110°C) ocorrem fenômenos físico-químicos em diferentes temperaturas, determinando assim, as características finais do produto (cor, resistência mecânica, absorção, porosidade, etc.).

De acordo com estudos realizados pela Divisão de Engenharia Mecânica do IPT-SP apud FUNTAC & IEL (1990) os principais fenômenos que podem ocorrer na queima de um corpo cerâmico são os seguintes:

- i. Até aproximadamente 200°C dá-se a eliminação da água livre (mesmo a que fica intercalada entre os argilo-minerais) e a eliminação da água proveniente de matéria orgânica;
- ii. Entre 350°C e 650°C ocorre a combustão de substâncias orgânicas contidas na argila e a dissociação de compostos sulfurosos;
- iii. Entre 450°C e 650°C ocorre a decomposição das argilas, com liberação sob a forma de vapor, da água de constituição (quimicamente combinada ao argilo-mineral);
- iv. Em temperaturas em torno de 570°C dá-se a rápida transformação de quartzo de sua forma cristalina alfa para beta, acompanhada de uma violenta expansão durante o aquecimento e de beta para alfa durante o resfriamento,

acompanhado de fortes contrações;

- v. Acima de 700°C, começam a se desenvolver reações químicas da sílica e da alumina com elementos fundentes, formando sílico-aluminatos complexos que dão à massa cerâmica característica como dureza, estabilidade, resistência mecânica, etc. Atinge-se assim o início da sinterização;
- vi. Entre 800°C e 950°C os carbonatos se decompõem e liberam CO₂;
- vii. Acima de 1000°C, os sílico-aluminatos que estão na forma vítrea começam a amolecer, dando ao corpo maior dureza, compacidade e impermeabilidade.

2.2 Utilização em pavimentos

O emprego da argila expandida em pavimentos rodoviários começou a partir de 1950, nos Estados Unidos, baseado em estudos pioneiros da Universidade Texas A & M. Esses estudos foram realizados com amostras de argila moldadas em umidades próximas ao limite de plasticidade, sob formas de cilindros com 125mm de diâmetro e 380mm de comprimento, com a finalidade de verificar a viabilidade técnica e econômica de emprego desses materiais em camadas de base e de revestimento, que permitiram as seguintes observações (Vieira, 2000):

- i. Os minerais argilosos do tipo montmorilonita, illita e caulinita não se reidratam, nas condições ambientes, quando são completamente desidratados (desidroxilados) através de tratamento térmico. A desidratação completa é conseguida aquecendo-se os corpos-de-prova à temperatura de 760°C por um período mínimo de 15 minutos;
- ii. Para se verificar se a desidratação dos corpos-de-prova foi completada, utilizou-se um procedimento experimental bastante simples, denominado “Pressure Slaking Test” (desgaste após fervura), que consiste, basicamente, em se ferver o agregado em uma panela de pressão de uso doméstico, medindo-se o desgaste do mesmo após agitação em água utilizando-se um

agitador de peneiras;

- iii. Os estudos concluíram que praticamente todos os solos argilosos que possuam uma razoável resistência à compressão manual quando secos ao ar, depois de umedecidos e moldados em forma de pelotas, podem servir como matéria-prima para fabricação de agregados de argila calcinada com boas características técnicas.

Nos anos de 1963 e 1964 o Distrito de Houston do Departamento de Estradas de Rodagem do Texas, construiu vários trechos experimentais de pavimentos flexíveis, totalizando cerca de 24 km com bases constituídas de uma mistura de 70% de agregados de argila calcinada e 30% de areia siltosa. Em um dos trechos utilizou-se também agregados expandidos fabricados comercialmente.

Nas verificações realizadas em 1968 observou-se que todos os trechos experimentais apresentaram um bom desempenho para as condições ambientais do Texas (IPR e ECL, 1986).

Posteriormente, o estado da Louisiana desenvolveu estudos no mesmo sentido da Universidade do Texas, sendo que a técnica do emprego agregado expandidos em misturas betuminosas e tratamentos superficiais para rodovias é bastante difundida nesses locais (DNER, 1981).

Na década de 80 o IPR (Instituto de Pesquisas Rodoviárias) promoveu uma pesquisa para fabricação de um protótipo de usina móvel de agregados de argila expandida, cujas características foram adaptadas às necessidades rodoviárias. Esse protótipo foi fabricado e montado em cima de duas carretas sendo que uma delas correspondia à unidade de conformação das argilas e a outra de queima. Infelizmente essa pesquisa não teve continuidade posteriormente (IPR e ECL, 1986).

Os estudos desenvolvidos pelo Departamento de Estradas da Louisiana - LDH (1969), conduziram às seguintes observações sobre o emprego de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) contendo agregados de argila expandida:

- i. Em misturas contendo 30% de agregado gráudo de argila expandida, 3% de filer e teor de asfalto de 7,0 a 8,0%; o volume de vazios e os vazios

preenchidos com asfalto (VFA) variaram de 5,8 a 6,8% e 62,4 a 69,1%, respectivamente;

- ii. a estabilidade Marshall média das misturas estudadas foi de 1600 lbs (725 kgf) para 7,0% e 7,5% de asfalto, passando para 1720 lbs (780 kgf) com 8,0% de asfalto, valores esses maiores do que os obtidos com misturas utilizando agregados naturais;
- iii. os valores da estabilidade Marshall foram muito influenciados pelo teor de agregado leve da mistura. Para misturas com 25% de agregado passando na #4 a estabilidade foi de 1180 lbs (535 kgf), passando para 1580 lbs (715 kgf) com 30% e para 2140 lbs (970 kgf) com 35%;
- iv. misturas asfálticas com agregados de argila sem fíler mineral mostraram-se instáveis. Por exemplo, misturas sem fíler, com 30% de agregado, apresentaram 980 lbs (445 kgf) de estabilidade, passando para 1600 lbs (725 kgf) quando se empregou 3 e 5% de fíler, com pouca variação nos resultados entre os dois teores de fíler.

Em função desse estudo o Departamento de Estradas da Louisiana (1969), recomendou a utilização dos seguintes critérios de projeto numa mistura betuminosa do tipo CBUQ com agregados de argila expandida:

- i. o teor ótimo de asfalto deve ficar entre 6 e 8,5 %;
- ii. o volume de vazios deve estar entre 5 e 8%;
- iii. os vazios preenchidos com asfalto (VFA) devem variar entre 55 e 75%;
- iv. a estabilidade Marshall a 140°F (60°C) não deve ser inferior a 1200 lbs (544 kgf);

É importante dizer que os critérios adotados pelo Departamento de Estradas da Louisiana (LDH) foram baseados em estudos de misturas contendo porcentagens inferiores a 35% de argila expandida e, portanto devem ser revistos quando utilizados em percentuais superiores.

Nota-se nesse estudo que a adoção dos agregados leves de argila elevou o teor de vazios e o consumo de ligante se comparados com misturas convencionais. Os limites adotados como critério de projeto para a determinação do volume de vazios e os vazios preenchidos com ligante, dependem fundamentalmente, do método selecionado para a determinação da densidade teórica da mistura. Diferentes métodos podem ser usados e, portanto diferentes volumes de vazios podem ser obtidos num mesmo corpo-de-prova. Para a determinação da densidade do agregado leve a ser utilizada no cálculo da densidade máxima da mistura, o LDH utilizou um método próprio denominado TR-312 /69.

A Tabela 2.1 mostra a faixa granulométrica recomendada pelo Departamento de Estradas da Louisiana (LDH) para o projeto de misturas asfálticas a quente contendo agregados de argila expandida, fíler mineral e agregados convencionais, bem como as faixas de projeto A, B, e C do DNER para agregado convencionais para compactação.

A experiência do IME, com estudos da aplicabilidade de agregados de argila calcinada em misturas asfálticas, mostrou que utilizar unicamente agregados de argila calcinada na composição dessas misturas eleva consideravelmente o consumo de ligante influenciando diretamente no custo da mesma. Batista (2004) mostrou que uma mistura composta por 95% de agregados de argila calcinada e 5% de filer de cimento portland se mostrava instável com 9% de CAP-20 conforme pode ser observado na Figura 2.3.



Figura 2.3 – Aspecto de corpos-de-prova com 9% de CAP-20 e 95% de agregados de argila calcinada do estudo de Batista (2004)

Tabela 2.1 –Faixas granulométricas de projeto do DNER e do LDH para misturas de concreto asfáltico.

PENEIRAS #	% que passa, em peso			
	Faixa A Binder	Faixa B Binder/Capa	Faixa C Capa	LDH
2"	100	-	-	-
1 ½"	95-100	100	-	-
1"	75-100	95-100	-	-
¾"	60-90	80-100	100	100
½"	-	-	85-100	80-100
⅜"	35-65	45-80	75-100	-
Nº 4	25-50	28-60	50-85	55-80
Nº 10	20-40	20-45	30-75	45-75
Nº 40	10-30	10-32	15-40	20-55
Nº 80	5-20	8-20	8-30	10-30
Nº 200	1-8	3-8	5-10	4-15
CAP – Extremos em peso (%)	4,0 - 7,0	4,5 - 7,5	4,5 - 9,0	6,0 - 8,5

Fonte: IBP (1995) e LDH (1969)

O consumo elevado de ligante nesse tipo de mistura pode ser atenuado, agregando à mistura, materiais naturais com menor absorção que o agregado calcinado e que possam ser encontrados com relativa facilidade próximos à obra, diminuindo assim o percentual de agregados calcinados nessa mistura. Criar agregados calcinados, com baixa absorção, através da otimização do processo de manufatura (processamento e calcinação) e da escolha de matérias-primas adequadas também é fundamental para a obtenção de misturas asfálticas com menores teores de ligante. Costa et al (2000) relatam que o teor mínimo aceitável de ligante encontrado numa mistura asfáltica contendo 70% de agregados de argila calcinada, 24% de areia e 6% de filer de cimento portland foi alto (8,8%) e alegam que isto se deveu à elevada absorção do agregado. No mesmo estudo esses autores verificaram que numa mistura contendo 95% desse agregado de argila e 5% de filer de cimento portland o primeiro ponto da dosagem Marshall dessa mistura possuía 16% de CAP, concluindo que seria inviável utilizar apenas o agregado produzido nessa pesquisa em misturas asfálticas. Esses autores constataram que absorção de água do agregado ficava em torno de 20%. Diante disso, nota-se que propriedades como porosidade e absorção dos agregados calcinados são proporcionais ao consumo de ligante e portanto essas propriedades devem ser minimizadas tanto quanto possíveis.

Os estudos realizados pela FUNTAC & IEL (1990) indicaram uma considerável diminuição da absorção de água, densificação e diminuição da porosidade aparente em vários solos argilosos do estado do Acre quando calcinados em temperaturas superiores a 1000°C.

No Brasil, o uso em obras rodoviárias de agregados sintéticos graúdos fabricados a partir de argila é regido pelas especificações do DNER EM 230/94 e ES 227/89. A primeira seleciona e classifica o agregado e a segunda prescreve qual a melhor utilização em função da classe e do grupo, conforme podem ser observados na Tabela 2.2 e Tabela 2.3 respectivamente.

Tabela 2.2 – Sistema de classificação de agregados sintéticos

Classificação dos Agregados Graúdos		Massa específica aparente t/m³		Desgaste na água após fervura (%)	Abrasão Los Angeles (%)
Classe	Grupo	Máx	Mín	Máximo	Máximo
I Argila expandida	A	0,880	0,560	6	35
	B	0,880	0,560	6	40
	C	0,880	0,560	10	45
II Argila não expandida	A	-	0,880	6	35
	B	-	0,880	6	40
	C	-	0,880	10	45

Fonte: DNER (1994)

Tabela 2.3 – Sistema de classificação de agregados sintéticos

UTILIZAÇÃO	CLASSE E GRUPO
Tratamentos superficiais	IA
Revestimento de concreto asfáltico	IA, IIA
Bases de concreto asfálticos	IA, B,C IIA, B,C
Estruturas e Expostas de concretos de cimento portland leve	IA
Pavimentos e concretos de cimento portland não expostos	IA, B IIA, B
Materiais para base	Todos

Fonte: DNER (1989)

2.3 Matérias-primas para a produção de agregados de argila calcinada

As matérias-primas usadas na produção de agregados artificiais de argila são os solos argilosos e os folhelhos argilosos (Santos, 1989a). Em casos específicos, quando se deseja melhorar alguma propriedade, outras matérias-primas podem ser adicionadas como, por exemplo, feldspatos e aditivos plastificantes.

Santos (1989a) define a argila como um material terroso, de granulação fina, que geralmente adquire certa plasticidade, quando umedecido com água; quimicamente, são essencialmente formadas por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio. Designa-se ainda com o nome “argila” um grupo de partículas do solo cujas dimensões se encontram entre uma faixa especificada de valores.

Em cerâmica vermelha, onde as matérias-primas (solos argilosos) sofrem variações intensas das propriedades físico-químicas devido ao processamento das mesmas, utiliza-se normalmente a faixa especificada pelo Massashusets Institute (MIT) para designar o termo argila à fração de solo composta por partículas inferiores a 0,002mm (Alexandre, 2004). Em geotecnia o maior interesse do estudo de solos está ligado ao comportamento mecânico e hídrico dos mesmos e neste caso utiliza-se normalmente a faixa de valores especificada pela ABNT onde a fração argila é composta por partículas inferiores a 0,005mm.

Segundo os estudos da FUNTAC & IEL (1990) as argilas do estado do Acre são de origem sedimentar, resultantes da decomposição de rochas silicosas e aluminosas, contendo secundariamente minerais como quartzo e óxido de ferro.

O DNER (1981) recomenda que para produzir agregados artificiais de argila expandida, a matéria-prima argilosa deve apresentar um ponto de fusão baixo além de possuir composição química semelhante a apresentada na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Composição química de argilas adequadas para a produção de agregados expandidos.

SiO ₂	50% a 65%
Al ₂ O ₃	15% a 20 %
Fe ₂ O ₃	5% a 10%
CaO	1% a 5%
Na ₂ O + K ₂ O	1% a 5%

DNER –1981

Para a fabricação de agregados de argila calcinada a matéria-prima utilizada não necessita ter as mesmas características químicas e mineralógicas das utilizadas na produção de argila expandida, já que no processo de calcinação não há necessidade da formação de gases. O agregado de argila calcinada é um produto cerâmico cujas matérias-primas, fases de conformação e calcinação são muito semelhantes às utilizadas em cerâmica vermelha, portanto várias observações aplicadas aos produtos de cerâmica vermelha são válidas para produção de agregados calcinados.

As argilas são as principais matérias-primas da indústria de cerâmica vermelha para a confecção de massas cerâmicas e, portanto, são consumidas em grandes quantidades. Para serem economicamente viáveis é necessário que essas matérias-primas tenham um custo de extração e beneficiamento baixo. Por isso, devem ter características necessárias para atender às necessidades de mercado consumidor ao menor custo possível (Batista, 2004).

Santos (1989a) alerta que se deve conhecer a composição química das argilas a fim de se obter informações para a avaliação de seus usos específicos. No entanto, essas informações devem ser complementadas com dados sobre a mineralogia, granulometria e outros parâmetros.

Quanto à composição química dessas matérias-primas, Monteiro e Dualibi (2001) recomendam que o solo argiloso deve apresentar um elevado percentual de óxidos alcalinos ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$), baixo teor de alcalinos terrosos ($\text{CaO} + \text{MgO}$) e baixa perda ao fogo para produzir materiais de qualidade. Segundo estes autores os óxidos alcalinos são fundamentais para a produção de elementos de baixa porosidade, pois esses óxidos são os principais responsáveis pela formação da fase líquida. Segundo os mesmos autores em temperaturas superiores a 1000°C ocorre uma reação desses óxidos com a sílica (SiO_2) proveniente da decomposição dos argilominerais formando a fase líquida por ação de força de capilaridade, e ainda a densificação do material. Os óxidos alcalinos terrosos estão normalmente na forma de carbonatos, a fase líquida ocorre a partir da reação destes com a sílica e são de baixa viscosidade, ocorrendo de forma brusca e podendo produzir defeitos durante a queima. Ainda a respeito da composição química de massas cerâmicas esses autores citam que óxido de ferro (Fe_2O_3) é o principal responsável pela coloração da massa e o comportamento como fundente depende da forma original da disposição desses óxidos nas partículas e da

sua interação com os outros óxidos durante a queima.

A indústria cerâmica vem ao longo dos anos aprimorando técnicas que objetivam produzir materiais de melhor qualidade em menores temperaturas. Segundo Riella et al. (2002) uma das maneiras de melhorar a qualidade de um produto cerâmico (agregados calcinados no caso) é fazer a inclusão de materiais fundentes. A importância dessa inclusão está relacionada à capacidade de diminuir a temperatura da formação da fase líquida durante o processo de queima. Este líquido formado tende a preencher os poros do corpo cerâmico, dependendo da sua viscosidade, eliminando assim a porosidade. Os elementos mais eficientes para promover a formação de fase líquida são os óxidos alcalinos (Na_2O e K_2O) e alcalino-terrosos (CaO e MgO).

Segundo Motta, Zanardo & Cabral (2001) com exceção do agregado leve, em que o material argiloso (com teores adequados de fundentes e de substâncias formadoras de gases) é queimado em fornos rotativos, com altas temperaturas (1100 a 1200°C), a maioria dos produtos cerâmicos apresenta elevada porosidade, com pouca fase vítrea, decorrente da baixa temperatura de queima (850°C a 950°C). Mesmo assim, mostram resistência mecânica suficiente para os usos a que são propostos. Segundo estes autores, os fundentes estão contidos nas estruturas das argilas illíticas e esmectíticas presentes ou adsorvidos nos argilominerais, tais como complexos ferruginosos e sais solúveis, que podem reagir durante os longos períodos de queima. A exigência técnica dos produtos de cerâmica vermelha é mais rigorosa para telhas e blocos estruturais, requerendo maior sinterização das peças. Nesses materiais, os autores recomendam que as argilas devem ser mais illíticas ou conter a mistura destas ou de outros fundentes como filitos, o que deve ser levado em consideração quando se pretende produzir agregados em fornos cerâmicos.

Quanto à granulometria deve-se ressaltar que uma massa cerâmica deve possuir características que garantam a trabalhabilidade adequada durante o processamento, obtendo assim características finais necessárias ao processo de conformação desejado. No caso de agregados artificiais de argila calcinada bem como nos demais produtos de cerâmica vermelha, essa trabalhabilidade é obtida fazendo-se o correto proporcionamento granulométrico de materiais plásticos e não plásticos. Segundo estudos da FUNTAC e IEL (1990) pode-se evitar a incidência de muitos problemas nos materiais cerâmicos, incluindo o agregado de argila calcinada, com o conhecimento da

distribuição granulométrica e forma das partículas constituintes da massa cerâmica, que podem implicar no possível surgimento dos seguintes defeitos:

- i. Falhas na formação do produto no processo de extrusão;
- ii. Baixa resistência mecânica;
- iii. Aumento da absorção de água e
- iv. Porosidade aparente alta.

Uma massa cerâmica não pode ser constituída somente de argilas plásticas, porque apresenta grandes dificuldades no processamento desde a conformação das peças, incluindo ainda a secagem e a queima. A solução destes problemas é fazer uma composição granulométrica adequada, dosando-se grãos finos, médios e grosso (Pracidelli e Melchiades, 1997). Nesse sentido, o diagrama de Winkler é considerado uma importante ferramenta de análise granulométrica de massas cerâmicas. A Figura 2.4 mostra o diagrama granulométrico de Winkler, com as regiões ótimas para diferentes produtos da cerâmica vermelha. Na Tabela 2.5 estão apresentadas as composições granulométricas mais usadas na indústria de cerâmica vermelha segundo estes autores.

Tabela 2.5 – Composição granulométrica dos produtos de cerâmica vermelha (Pracidelli e Melchiades, 1997).

Regiões usadas pela industria cerâmica	Composição granulométrica (%)		
	> 2 μm	2 a 20 μm	< 20 μm
Tipos de produtos			
A. Materiais de qualidade c/ dificuldade de produção.	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	25 a 55

Acredita-se que para a produção de agregados calcinados de boa qualidade as massas cerâmicas utilizadas devam se enquadrar, ou estarem próximas, das regiões A e B do diagrama de Winkler quando o processo de conformação adotado for à extrusão.

Obviamente a granulometria não é, isoladamente, fator determinante das características finais de um produto cerâmico, mesmo porque as partículas responsáveis pela maior parte dos fenômenos físico-químicos possuem diâmetro

inferior a 2 μm . Dessa forma o melhor entendimento do comportamento de uma matéria-prima cerâmica é obtido a partir de um estudo detalhado do comportamento físico, químico e mineralógico de cada uma das frações granulométricas.

A massa específica aparente é uma das propriedades mais importantes para a produção de materiais cerâmicos de boa qualidade, afetando o comportamento dos mesmos em diferentes etapas do processo cerâmico e influenciando de maneira decisiva na contração linear, absorção de água, deformação pirolástica e é também um fator crucial para a resistência mecânica. As variáveis de queima, da contração linear e da capacidade de absorção de água diminuem à medida que aumenta a massa específica aparente da peça, sendo esta uma relação linear. Assim a velocidade de secagem e de oxidação da peça durante o processo de queima diminuem à medida que aumenta a densidade aparente, pois o coeficiente de difusão efetivo dos gases diminui quando se tem porosidade baixa. Por outro lado, variações bruscas da densidade aparente da peça podem conduzir a contrações diferenciadas que podem fissurar as peças, conduzindo a uma perda de resistência mecânica (Bó, 2002).

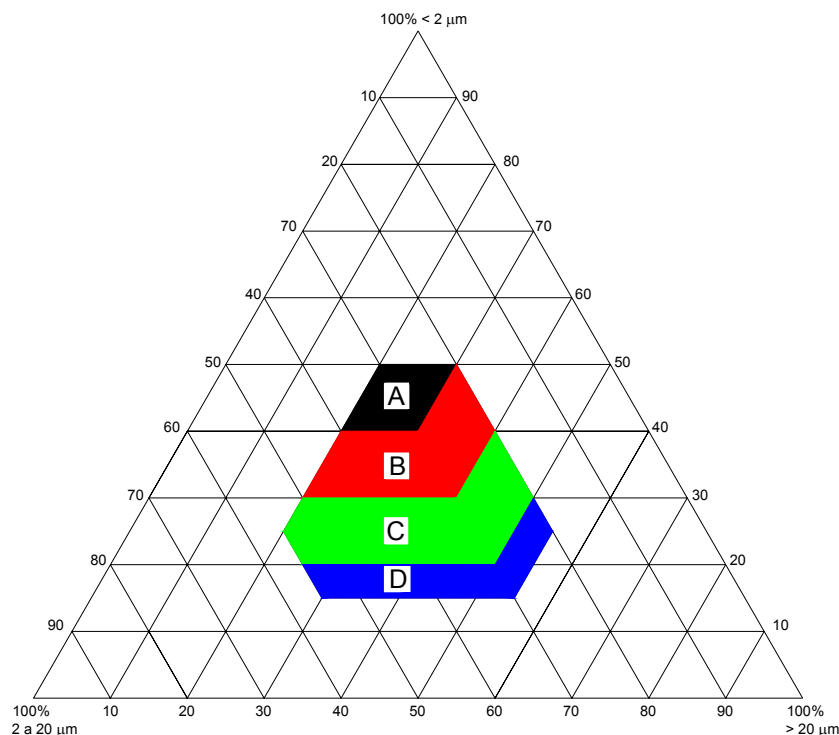


Figura 2.4 – Diagrama de Winkler (Pracidelli e Melchiades, 1997).

2.4 Considerações Finais

Com base nas informações contidas nesta breve revisão bibliográfica, pode-se dizer que a matéria-prima (solo argiloso), utilizada na fabricação de agregados calcinados de boa qualidade, deve ser preferencialmente ilítica, conter teores satisfatórios de óxidos fundentes (para gerar agregados de baixa absorção e baixa porosidade), além de granulometria adequada que possibilite boa trabalhabilidade e baixa retração, ajudando a evitar problemas na extrusão, na secagem e no aparecimento de trincas e fissuras durante a queima. Entretanto dificilmente consegue-se obter jazidas de solos argilosos que sozinhas consigam agregar todas as características citadas.

A maneira encontrada na indústria cerâmica para contornar esse problema foi estabelecer formulações que combinam várias matérias-primas e às vezes materiais sintéticos para obter produtos com as qualidades satisfatórias a cada uso (cerâmica vermelha, agregados leves, refratários, etc.). Essa indústria costuma utilizar faixas de variação de características de argilas padrões brasileiras para prever usos industriais de argilas desconhecidas, como mostra o Anexo B.

No caso do estudo de agregados artificiais de argila calcinada, também seria interessante utilizar faixas de variações de características para prever o uso de argilas desconhecidas na produção de agregados para obras de pavimentação, sendo que sua aplicabilidade poderia ser dividida em agregados para base ou para mistura asfáltica. A utilização apenas das normas do DNER (EM 230/94 e ES 227/89) como critério de aceitação de agregados calcinados em obras rodoviárias pode muitas vezes levar a insucessos, especialmente quando relacionadas à confecção de misturas asfálticas, visto que não são levadas em consideração propriedades importantes como porosidade e absorção de ligante pelo agregado.

Para criar essas faixas de variações, direcionadas à confecção de agregados de argila calcinada, seria necessária a criação de um banco de dados de diversas argilas com informações importantes quanto a granulometria, composição química, mineralogia, comportamento térmico bem como propriedades físicas e mecânicas dos agregados produzidos com estas.

Em toda a literatura consultada não foi encontrada nenhuma referência à classe pedológica dos solos empregada para se obter os agregados artificiais de argila, ou

mesmo produtos cerâmicos. Porém o autor do presente trabalho julga que a utilização de mapas pedológicos pode ajudar na identificação de jazidas de argilas, especialmente em regiões de difícil acesso, fornecendo informações superficiais quanto à classe, composição química e mineralogia dos solos para uma seleção preliminar, já que a classificação pedológica tem relação com a granulometria e com os argilominerais presentes nos solos (por exemplo argissolos).

Poderia também ser procurada alguma correlação com a classificação MCT de forma a facilitar a busca de materiais que levem a agregados artificiais mais adequados para pavimentação com menores custos.

O sistema de classificação MCT mostra-se promissor como método de escolha preliminar de solos finos para fabricação de agregados calcinados. Esse sistema já está consagrado na escolha de solos finos tropicais para o uso em bases de pavimentos. Através do coeficiente c' e do comportamento laterítico ou não laterítico pode-se obter, assim como na pedologia, informações superficiais quanto a granulometria e constituição mineralógica dos solos pesquisados.

CAPÍTULO 3

3 METODOLOGIAS PARA FABRICAÇÃO DE AGREGADOS DE ARGILA CALCINADA EM ESCALA INDUSTRIAL

A maior dificuldade de se estudar em laboratório e no campo os agregados de argila calcinada advém da inexistência de fábricas que produzam esses agregados em grandes quantidades e vários tamanhos. Isso tem levado a uma trabalhosa e pequena produção dos mesmos em laboratórios, onde os equipamentos e métodos adotados nem sempre reproduzem com fidelidade o que se espera em uma fábrica de agregados. Para se ter uma idéia, cada queima realizada nesta pesquisa, não pôde ser superior a 1,50 Kg devido à capacidade dos fornos utilizados.

Os estudos conduzidos pela FUNTAC (1999) e FUNTAC e IEL (1990) mostram que em vários municípios do Acre existem solos propícios à fabricação de agregados calcinados e portanto, no caso deste estado, a ocorrência de matérias-primas pode ser considerada como fator secundário à necessidade de implantação de meios de produção dos agregados calcinados em escala industrial.

Dessa forma, além de caracterizar os agregados obtidos em laboratório no presente estudo, sob o ponto de vista físico e mecânico, verificou-se a necessidade de avaliar algumas alternativas que venham a viabilizar a produção desses agregados em grande escala. Pretendeu-se no presente capítulo mostrar os processos de produção de agregados leves e peças cerâmicas com o objetivo de contribuir para o desenvolvimento de uma alternativa técnica e economicamente viável à produção de agregados calcinados em grande escala.

3.1 Sistema de produção de agregados de argila expandida

Embora os fenômenos físico-químicos sejam essencialmente diferentes entre agregados de argila expandida e argila calcinada, ambas possuem processos de conformação e calcinação muito similares. Portanto um melhor entendimento sobre a produção de agregados leves poderá ser de grande utilidade no estudo de uma metodologia para a produção dos agregados calcinados.

Santos (1989a), descreveu as etapas da pesquisa industrial para implantação da fábrica de agregados leves, CINASITA, na década de 60, cuja capacidade inicial seria de 9.000m³/mês. Embora essa referência seja antiga, foi a única possível de ser obtida para o presente estudo. Algumas dessas etapas foram transcritas nos próximos oito parágrafos para propiciar o melhor entendimento da metodologia de produção desses agregados.

“A argila é homogeneizada em depósito de 10.000t de capacidade do qual é abastecida a fábrica. Por intermédio de pá carregadeira abastece-se um caixão dosador, que permite obter um fluxo contínuo de argila no processo industrial. Do caixão dosador cai em um desintegrador de argila que reduz os grandes pedaços até um diâmetro máximo de 5cm, por intermédio de uma correia transportadora o material é conduzido a um misturador-homogeneizador-umidificador; onde é homogeneizado e acertada a umidade adequada para a extrusão”. As matérias-primas selecionadas necessitavam da adição de uma pequena quantidade de óleo para facilitar a extrusão”.

“Do misturador, a argila passa por um laminador que é constituído de dois rolos espaçados de 3mm a 5mm. Aí são retidos as pedras e outros objetos estranhos, laminando a argila e preparando-a para a extrusão. Do laminador passa a uma máquina de extrusão contínua (maromba) e pela passagem por um bocal com orifícios circulares (boquilha) obtêm-se cilindros de 10mm a 15mm de diâmetro. Uma cortadeira rotativa em frente ao bocal vai cortando os cilindros no comprimento médio de 15mm”.

“Esses cilindros de argila assim produzidos são conduzidos à entrada do forno por uma transportadora de correia. Como a indústria opera 24 horas por dia e sete dias por semana, existem dois conjuntos de extrusão que funcionam alternadamente

doze horas cada conjunto”.

“O forno é rotativo (Figura 3.1) com 2,4m de diâmetro e 50m de comprimento, girando com velocidade variável de uma volta a cada 30s a 50s. Pela rotação e inclinação do forno, os cilindros levam cerca de duas horas para atravessá-lo. Na zona de combustão, que atinge 1.100°C, a pelota de argila expande e cai num trocador de calor. O combustível utilizado pode ser o óleo combustível de baixo ponto de fusão (BPF) ou de alto ponto de fusão - baiano (APF)”.

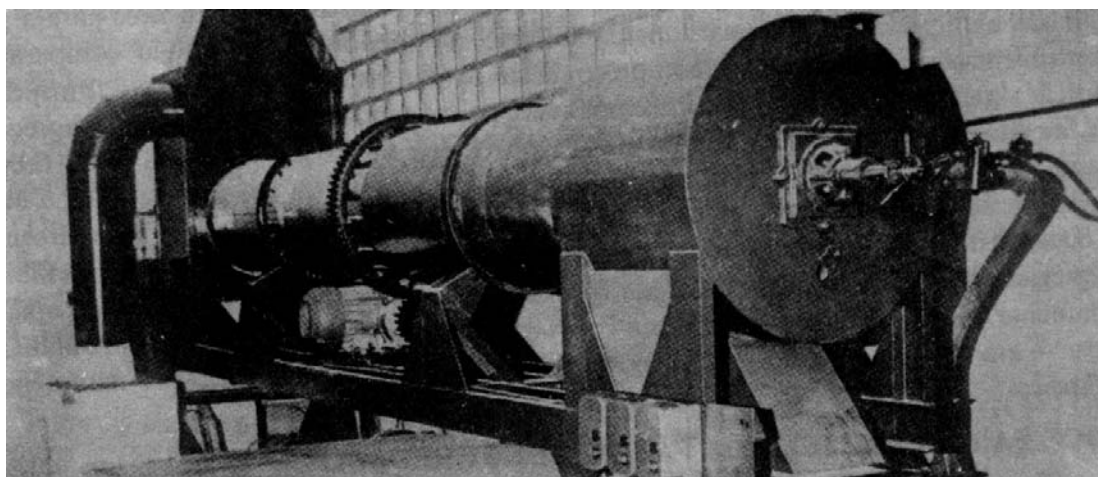


Figura 3.1 – Forno rotativo para a produção de agregados leves da Cinasita em escala piloto (Santos, 1989a)

“No trocador de calor, o agregado expandido se resfria à temperatura ambiente e o ar aquecido é injetado no forno como ar secundário de queima. O forno opera com tiragem forçada”.

“Após o resfriamento no trocador de calor, o agregado leve é conduzido a um depósito com capacidade para 15.000m³. Desse depósito, por gravidade, o material é transportado mecanicamente para a instalação de peneiramento e armazenagem. Consta de peneira de três estágios com peneiras de 20mm, 13mm e 5mm de abertura”.

“A fração mínima de 20mm é encaminhada por gravidade a um britador de martelo e fragmentada a um diâmetro máximo de 10mm e armazenada em um silo de 100m³ de capacidade. Cada uma das frações obtidas no peneiramento é armazenada em silos semelhantes de 100m³ cada. Esses silos estão em altura adequada, de maneira que o carregamento se efetua por gravidade diretamente no caminhão”.

“Durante todo o processo de fabricação o produto não é tocado ou manuseado, resultando grande economia de mão-de-obra. Toda a fábrica, inclusive pessoal de escritório, opera com 32 funcionários, sendo o pessoal efetivo de produção distribuído em quatro turnos com total de 24 pessoas”.

O diagrama de blocos da Figura 3.2 mostra o fluxograma do processo de fabricação industrial do agregado leve CINASITA na década de 60.

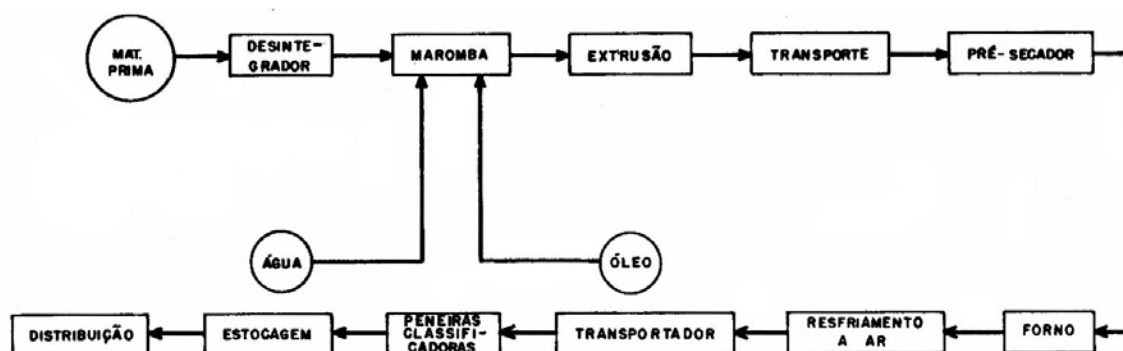


Figura 3.2 – Diagrama de blocos da fabricação do agregado leve de argila expandida da CINASITA durante (Santos, 1989a).

Em Portugal a empresa ARGEX fabrica agregados leves por expansão pirolástica de argilas em forno rotativo a temperatura de 1200°C. Na Figura 3.3 podem ser visualizadas algumas das etapas da fabricação deste agregado leve (ARGEX, 2004).

Os procedimentos descritos por Santos (1989a) serviram como base para a elaboração da metodologia adotada na fabricação dos agregados de argila calcinada desta pesquisa, ou seja, procurou-se simular em laboratório estes procedimentos de conformação, extrusão, secagem, pré-aquecimento e queima dos agregados.

Batista (2004), usou processos de conformação e extrusão semelhantes aos descritos por Santos (1989a), entretanto como o agregado de argila calcinada não expande e é importante que estes tenham forma angulosa para o uso em pavimentação, esse autor adotou a forma hexagonal do orifício de extrusão ao invés da forma cilíndrica, com o que o autor do presente trabalho concordou e utilizou nesta pesquisa. Os detalhes da metodologia usada no presente trabalho para a fabricação dos agregados de argila calcinada estão no capítulo 5.



a) exploração da jazida



b) Forno rotativo com 60m de comprimento



b) Calcinação dos agregados a 1200 °C



c) Silos de estocagem

Figura 3.3 – Etapas da produção do agregado leve em Portugal (ARGEX, 2004).

3.2 Sistema de produção de telhas e blocos cerâmicos

Procurou-se avaliar a utilização dos procedimentos adotados pela indústria cerâmica na confecção de blocos e telhas com a finalidade de adaptá-los à produção de argila calcinada. O autor do presente trabalho realizou uma pesquisa de campo em quatro cerâmicas de elevada capacidade de produção, sendo uma no Rio de Janeiro e três no Paraná.

Durante as visitas verificou-se que o processo de conformação das peças cerâmicas (telhas e blocos) apresenta certa semelhança ao utilizado durante o projeto de implantação da fábrica CINASITA de agregados leves. Nota-se que a diferença

básica entre os dois processos estudados está no tipo de forno, na distribuição da temperatura, tempo de secagem e calcinação. Como em cerâmica vermelha as dimensões das peças são maiores e o controle de características como cor e geometria são fundamentais, existe maior cuidado no controle do tempo de secagem e elevação da temperatura.

Foi verificado que três das quatro cerâmicas visitadas utilizam fornos intermitentes para a calcinação das peças e apenas uma utiliza um sistema de produção contínuo com reaproveitamento dos gases quentes na pré-secagem, secagem e pré-aquecimento das peças. O processo de produção com fornos intermitentes pode ser utilizado na produção dos agregados de argila calcinada, porém com baixa eficiência, visto que os ciclos de carga, aquecimento, resfriamento e descarga desses fornos são muito longos, chegando a durar 62 horas em cada fornada. Não foi constatado nessas cerâmicas o reaproveitamento dos gases quentes desses fornos para a secagem das peças. Dessa forma os corpos cerâmicos secam em galpões (Figura 3.4) ou ao ar livre e dependem das condições climáticas locais. Na Figura 3.5 são mostrados os fornos encontrados nas cerâmicas visitadas durante esta pesquisa. No caso da região objeto do presente estudo, onde o clima é quente mas úmido (80 a 90% de umidade média anual) e com muitos períodos de chuva, esse sistema de secagem tornaria a produção de agregados ineficiente. Segundo os donos das cerâmicas em Rio Branco - AC onde foram coletadas as três amostras usadas neste estudo, no período das chuvas, o tempo de secagem natural dos tijolos varia de 20 a 35 dias.



Figura 3.4 – Secagem natural dos corpos-verdes de blocos cerâmicos numa cerâmica de Curitiba – PR em junho de 2004 (Foto do autor).

O sistema de produção contínuo (com pré-secadores, secadores e forno túnel) mostrou-se mais eficiente em relação aos demais. Segundo o catálogo de um dos fabricantes o conjunto (secador, pré-aquecedor e forno), pode ser fabricado em versões cuja capacidade produtiva varia entre 60 e 200 toneladas/dia e a queima pode ser realizada com diversos tipos de combustível (lenha, óleo, serragem ou GLP) (ZUCCO, 2004).

No sistema contínuo com forno túnel o material ao sair da maromba é empilhado diretamente em vagonetas tipo plataforma (Figura 3.6), que percorrem, sobre trilhos, as fases de pré-secagem, secagem, pré-aquecimento, queima e resfriamento. Isso elimina o manuseio, traz considerável ganho na qualidade do material e independência das condições climáticas. Na Figura 3.9 é mostrado todo o processo de secagem e calcinação no sistema contínuo de produção.

Nas cerâmicas visitadas as temperaturas registradas, na região de queima dos fornos túnel e intermitente, ficavam em torno de 900°C no topo e 650°C na base. Devido a essa diferença de temperatura os corpos secos são empilhados de forma que as peças que necessitem de maior resistência e menor porosidade (telhas e blocos estruturais) fiquem próximos do topo.



a) Forno intermitente tipo vagão
(Curitiba – PR em junho de 2004)



b) Forno intermitente – (Cabral, 2004)
(Tanguá – RJ em abril de 2004)



c) Forno intermitente
(Curitiba – PR em junho de 2004)



d) Vagoneta entrando no forno túnel
(Curitiba – PR em junho de 2004)

Figura 3.5 – Fornos encontrados nas cerâmicas visitadas (Fotos a, c e d do autor).



Figura 3.6 – Vagoneta tipo plataforma sobre trilhos - Foto do autor
(Curitiba – PR em junho de 2004).

Um melhor entendimento do ciclo de queima em fornos tipo túnel pode se obtido em Lehmkuhl et al. (2004). Estes autores mediram as temperaturas atuantes numa carga de tijolos furados em sete posições diferentes durante o período de secagem e queima em um forno túnel de 90m de extensão. As posições dos termopares e as temperaturas medidas nesse forno estão mostradas na Figura 3.7 e Figura 3.8 respectivamente. Nota-se na Figura 3.8 que a temperatura máxima atingida no topo da carga (termo 1) foi de 900°C e na base da vagoneta (termo 8) foi inferior a 600°C o que comprova que as peças produzidas nesses fornos apresentam diferenças de propriedades em função dessa diferença de temperatura. Nota-se ainda que a diferença de temperatura não é função apenas da posição da peça em relação à altura do forno visto que, embora os termopares 2 e 6 estivessem posicionados na mesma altura, o termopar 6 registrou temperaturas significativamente superiores ao termopar

2 indicando que as peças posicionadas mais externamente na carga (pilha de tijolos), calcinarão em maiores temperaturas em relação às peças mais internas.

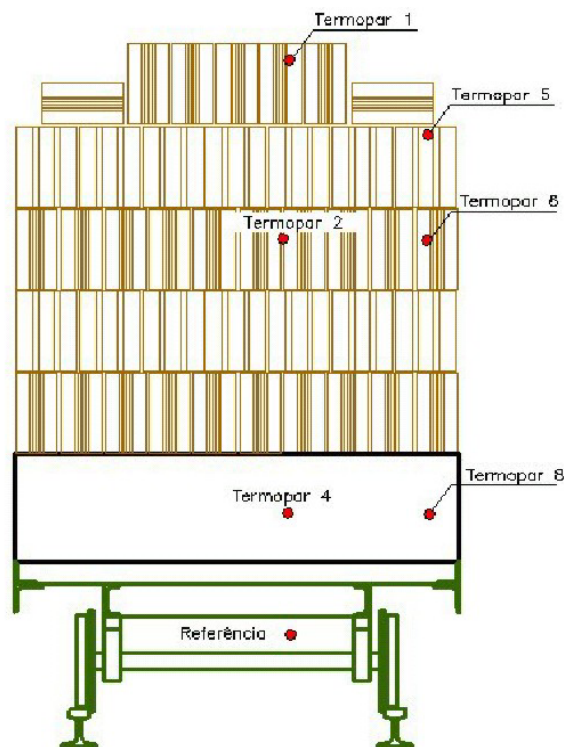


Figura 3.7 – Posição dos termopares na carga de tijolos e vagoneta (Lehmkuhl et al.2004).

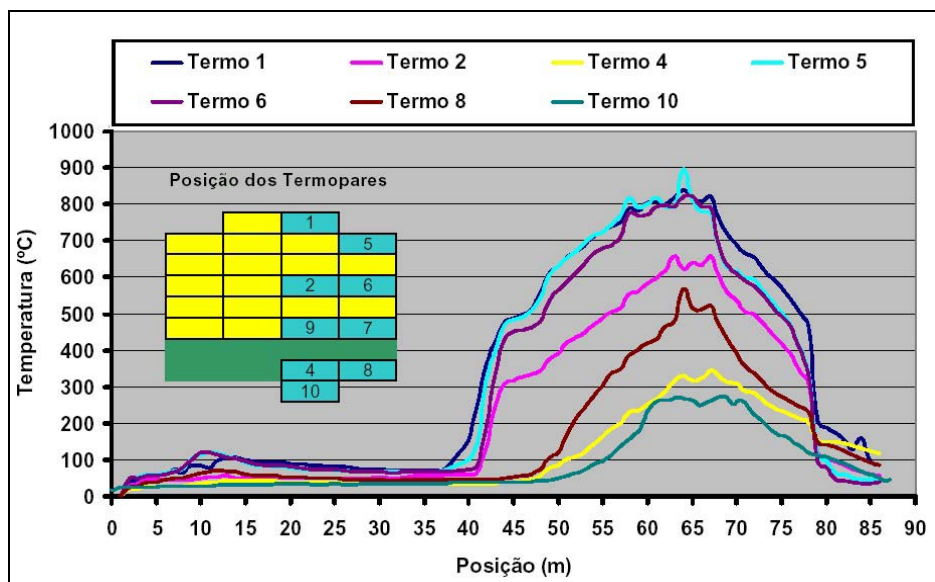


Figura 3.8 – Temperaturas registradas ao longo do ciclo de secagem e queima num forno túnel (Lehmkuhl et al.2004).

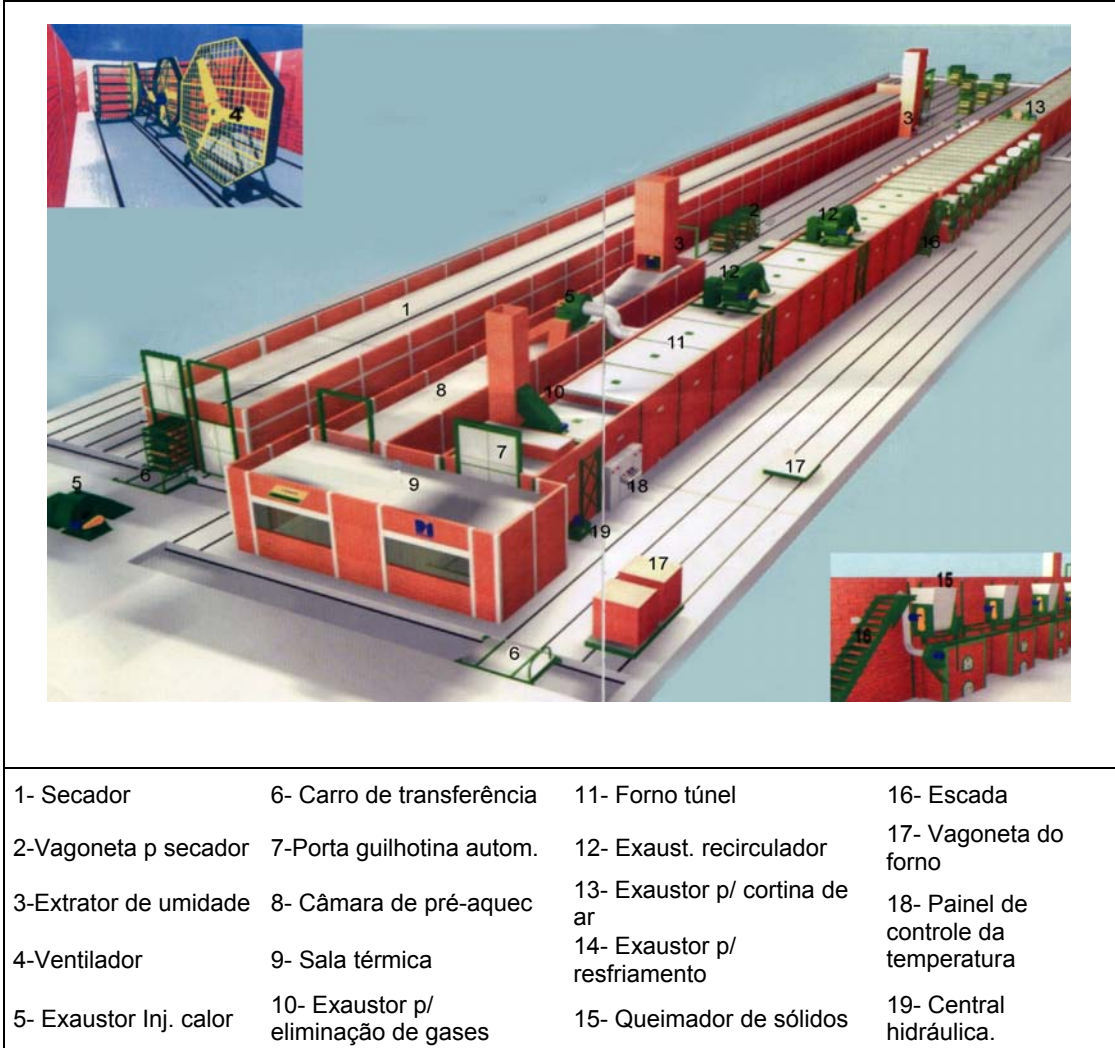


Figura 3.9 - Esquema da secagem e queima em um sistema contínuo com forno Túnel (MAQTHERM, 2004).

Um estudo conduzido pelo IPT-SP em 1996 aponta o mesmo problema de diferença de temperatura em um forno intermitente. As diferenças entre as temperaturas máximas no topo e na base, na ordem de 280°C, foram suficientes para conferir características de resistência bastante distintas aos produtos cerâmicos calcinados nesse forno. Alexandre (2004) comenta que existem técnicas de redistribuição do queimadores que podem minimizar essas diferenças de temperatura nos fornos cerâmicos.

Se comparados com os fornos rotativos, os fornos tipo túnel apresentam menor capacidade de produção, atingem temperaturas mais baixas e que variam com a altura e posição da peça. Entretanto possuem as seguintes vantagens:

- i. podem utilizar combustíveis encontrados em abundância na região de

interesse deste estudo (Acre) como pó-de-serra, lenha, carvão e cavaco;

- ii. requerem um menor custo de implantação e manutenção;
- iii. além do agregado de argila calcinada, a empresa poderia produzir peças como tijolos e telhas.

O processo de fabricação de blocos e telhas, com sistema de produção contínuo na indústria visitada em Curitiba (Junho de 2004), consistiu basicamente em:

- i. misturar as argilas em depósito por intermédio de pá carregadeira (Figura 3.10);
- ii. abastecer um caixão dosador (Figura 3.11) com proporções adequadas das matérias-primas;
- iii. levar a massa a um desintegrador para reduzir os torrões até um diâmetro máximo de 5 cm;
- iv. conduzir a massa a um misturador-homogeneizador-umidificador que pode ser um único equipamento ou equipamentos separados;
- v. passar a massa por um laminador;
- vi. do laminador levar a massa para a maromba (Figura 3.12) onde a mesma é compactada e conformada na geometria desejada;
- vii. uma cortadeira (Figura 3.13) vai cortando a massa no comprimento desejado;
- viii. os corpos verdes (termo usado para designar a massa conformada na geometria desejada e ainda úmida) são empilhados nas vagonetas e por meio de um sistema de trilhos é conduzido para o pré-secador e secador, onde o mesmo permanece por 24 horas;
- ix. ainda utilizando um sistema de trilhos os corpos secos (termo usado para designar a massa conformada na geometria desejada e seca ao ar ou em estufa a 110°C) são levados ao forno contínuo (forno túnel) onde são

queimados com o aquecimento e o resfriamento gradual da temperatura que leva em torno de 24 horas;

- x. uma empilhadeira (Figura 3.14) recolhe as peças cerâmicas e as encaminha para o galpão de estocagem e transporte.



Figura 3.10 – Depósito de argilas misturadas (Foto do autor) (Curitiba – PR em junho de 2004).



Figura 3.11 – Caixa dosador - Foto do autor (Curitiba – PR em junho de 2004).



Figura 3.12 – Maromba a vácuo - Foto do autor
(Curitiba – PR em junho de 2004).



Figura 3.13 – Cortadeira (Foto do autor)
(Curitiba – PR em junho de 2004).



Figura 3.14 – Empilhadeira - Foto do autor.

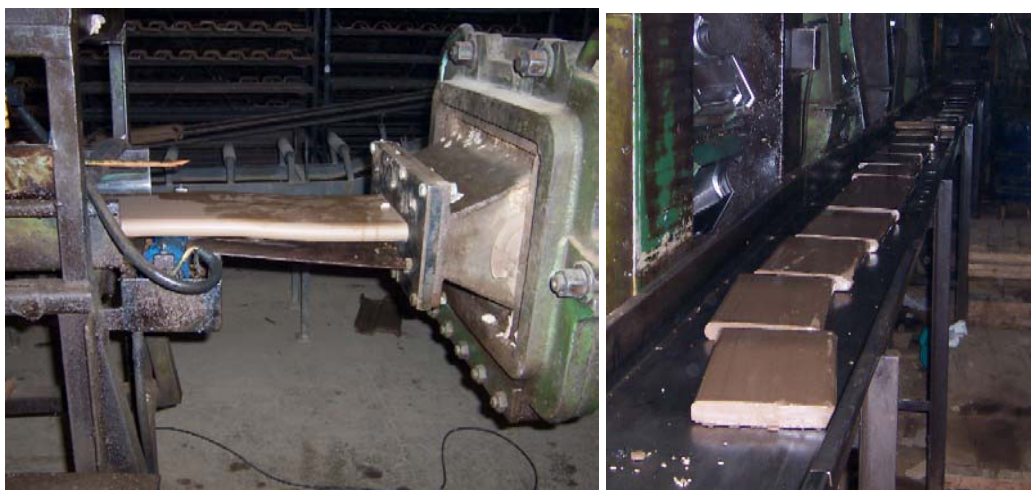
3.3 Sugestões de produção e considerações finais

Diante do que foi observado durante esta pesquisa verificou-se a possibilidade da fabricação dos agregados de argila calcinada em cerâmicas e em fábricas de agregados leves. Entretanto as características esperadas para estes agregados serão essencialmente diferentes e portanto sua aplicabilidade em obras de pavimentação dependerá não só da matéria-prima escolhida mas também do sistema de processamento, secagem e queima adotado.

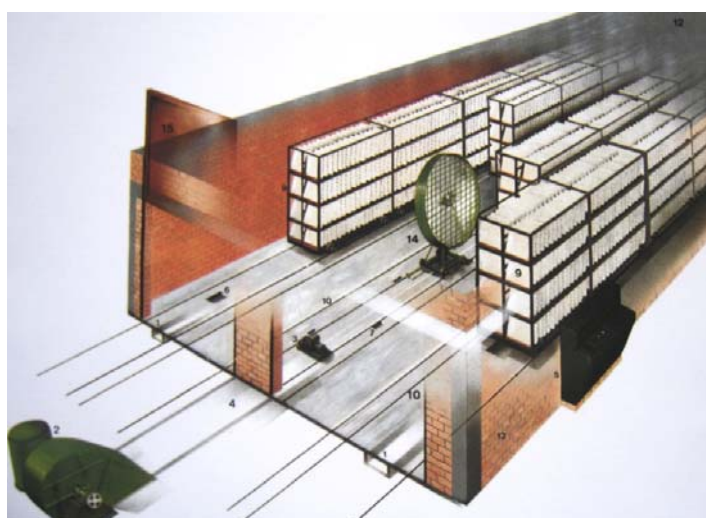
O agregado produzido a partir de um mesmo solo apresenta grandes variações de resistência mecânica, porosidade, absorção e densificação em função da temperatura máxima obtida durante a queima. Por analogia, pode-se dizer que temperatura exerce um papel tão importante nos agregados calcinados quanto à energia de compactação exerce nas propriedades de um solo. Portanto o sistema para calcinação escolhido exercerá um efeito primordial nas características e conseqüentemente na aplicabilidade dos agregados obtidos no processamento escolhido.

No caso de se optar pela produção dos agregados em fornos cerâmicos deve-se levar em consideração que o produto acabado poderá ser muito heterogêneo devido às diferenças de temperaturas já mencionadas. Outro fato a ser levado em consideração é que dificilmente as temperaturas nesses fornos serão superiores a 1000°C, de forma que se pode esperar agregados mais porosos, de maior absorção e com menor resistência mecânica em relação aos produzidos em fornos rotativos cuja temperatura fica em torno dos 1100°C. É possível que a melhor aplicabilidade dos agregados produzidos nos fornos cerâmicos seja na confecção de bases granulares. Quando se leva este contexto ao estado do Acre essa afirmação se ressalta já que a maior parte das cerâmicas funciona quase que de forma artesanal, com baixa produtividade e sem equipamentos adequados ao controle de temperatura (FUNTAC, 1999).

A título de contribuição para o desenvolvimento de uma metodologia para a produção dos agregados de argila calcinada em cerâmicas, sugere-se que a extrusão e o empilhamento nas vagonetas seja realizado de forma similar ao utilizado na fabricação de telhas, como está mostrado na Figura 3.15. Nesta pesquisa não foi possível avaliar a influência de diversos tipos de britadores na forma dos agregados calcinados ficando como sugestão para futuras pesquisas.



a) Forma da extrusão (fotos de Cabral, 2004).



b) Empilhamento para secagem (MAQTHERM, 2004).



c) Empilhamento para queima (MAQTHERM, 2004).

Figura 3.15 – Sugestão de produção dos agregados de argila calcinada em fornos cerâmicos

O sistema com forno rotativo parece ser perfeitamente aceitável ao uso na produção de agregados de argila calcinada. Os agregados produzidos nesses fornos, em função das elevadas temperaturas de queima (em torno de 1100°C), serão mais densos, impermeáveis e homogêneos que os produzidos em fornos cerâmicos. Dessa forma supõe-se que os agregados calcinados assim obtidos sejam mais adequados ao uso em misturas asfálticas.

Ressalta-se que os agregados calcinados produzidos em fornos rotativos podem apresentar qualidades mais satisfatórias em relação ao agregado expandido para o uso em pavimentação, visto que esses primeiros não apresentam o interior alveolar e extremamente poroso característico de agregados obtidos por expansão pirolástica, desta forma quando britados apresentaram menor porosidade e portanto menor absorção de asfalto em relação ao expandido.

Supõe-se que, diferentemente das fábricas de agregados leves CINASA e ARGEX, seja mais adequado a criação de usinas móveis para a produção de agregados de argila calcinada, de maneira a permitir a fabricação de agregados com maior número de jazidas e com menores distâncias de transportes. O fato de se utilizar fornos rotativos, com temperaturas superiores a 1000°C não necessariamente induzirá a elevados custos de implantação da usina e produção dos agregados calcinados. Da mesma forma que os fornos cerâmicos, os fornos rotativos podem ser dimensionados para pequena escala de produção, entretanto satisfatória para atender uma obra de pavimentação.

Uma maneira de aumentar a produção e baixar os custos dos agregados calcinados em fornos rotativos é utilizar matérias-primas que suportem o aumento acelerado das temperaturas. Dessa maneira consegue-se reduzir os custos nas fases de pré-aquecimento e queima. Uma experiência realizada por Alexandre (2004) com os agregados utilizados nesta pesquisa, para o estudo de misturas asfálticas, mostrou que os mesmos poderiam se calcinados a 1100 °C passando pelos ciclos de pré-aquecimento e queima em meia hora sem apresentar trincas ou fissuras.

CAPÍTULO 4

4 CARACTERIZAÇÃO DE TRÊS SOLOS ARGILOSOS PARA PRODUÇÃO DOS AGREGADOS DE ARGILA CALCINADA DESSA PESQUISA

4.1 Considerações iniciais

O agregado de argila calcinada, estudado nesta pesquisa, nada mais é do que um produto de cerâmica vermelha, já que é confeccionado com a mesma matéria-prima, mesmo processamento e apresenta fenômenos físico-químicos semelhantes aos produtos deste tipo de cerâmica. Entretanto, com propriedades satisfatórias ao uso em pavimentação.

Normalmente é possível fabricar produtos de cerâmica vermelha e conseqüentemente agregados de argila calcinada com variadas argilas, entretanto, é de se esperar produtos com propriedades bem diversificadas em função da argila escolhida.

Ao invés de coletar e caracterizar diversos solos em vários locais do município que além de dispendioso e trabalhoso, aumentaria as chances de insucessos, optou-se pela coleta das amostras em três cerâmicas de considerável relevância para a região de Rio Branco - AC e cujas jazidas se situam em locais distintos (Estrada do Barro Vermelho, Rodovia AC-40 e Distrito Industrial). Essas amostras receberam os nomes de “AM-01, AM- 02 e AM-03”.

A caracterização das amostras pesquisadas teve o objetivo de conhecer o comportamento físico, químico e mineralógico desses solos, de maneira a prever

sua melhor utilização. Essas argilas foram caracterizadas obedecendo a seguinte seqüência de ensaios :

- i. análise granulométrica;
- ii. limites de Atterberg;
- iii. determinação da massa específica real dos grãos;
- iv. análise de composição química;
- v. difração de raios-X
- vi. Classificação MCT.

4.2 Caracterização física

Foram realizados os seguintes ensaios:

- i. análise granulométrica - realizada obedecendo à norma NBR 7181-84. Até tamanho de partícula da peneira 200, o diâmetro dos grãos e seus percentuais relativos foram obtidos por peneiramento e abaixo desta, a técnica usada foi o ensaio de sedimentação;
- ii. limites de Atterberg - determinados de acordo com as normas NBR 6459-84 e NBR 7180-84;
- iii. massa específica real dos grãos – obtido segundo o método de ensaio da norma NBR 6508-84.

Durante as visitas às cerâmicas de Curitiba o autor do presente trabalho verificou que era comum a mistura de duas argilas em partes iguais, nessas indústrias, com objetivo de melhorar de alguma propriedade do produto final (por exemplo a melhoria da plasticidade, diminuição da umidade na extrusão, ganho de resistência, secagem mais rápida, etc.). A fim de verificar se as amostras estudadas poderiam gerar produtos

com melhores qualidades quando misturadas, optou-se no presente trabalho em estudar duas misturas preparadas em partes iguais das amostras AM-01 e AM-02 com a AM-03. Essas misturas foram denominadas de MT-13 e MT-23 respectivamente.

Nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 estão plotados os resultados das curvas de distribuição granulométrica das amostras pesquisadas e suas receptivas misturas. Na Figura 4.6 é mostrada a superposição das curvas granulométricas dos solos estudados. Na Tabela 4.1 encontram-se os valores dos limites de Atterberg, massa específica real dos grãos e os percentuais de areia, silte e argila desses materiais. Na Figura 4.7 são mostrados as localizações dos solos estudados em relação ao diagrama de Winkler.

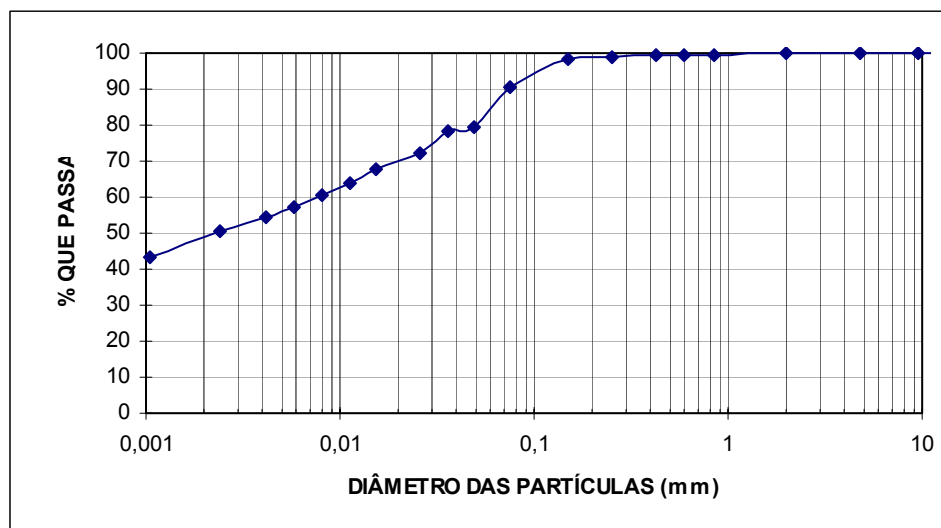


Figura 4.1 – Curva granulométrica da matéria-prima AM-01.

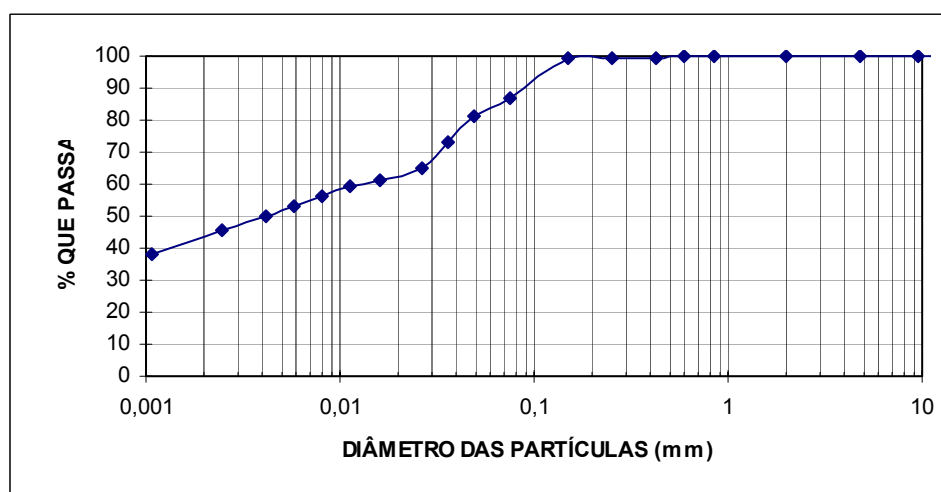


Figura 4.2 – Curva granulométrica da matéria-prima AM-02.

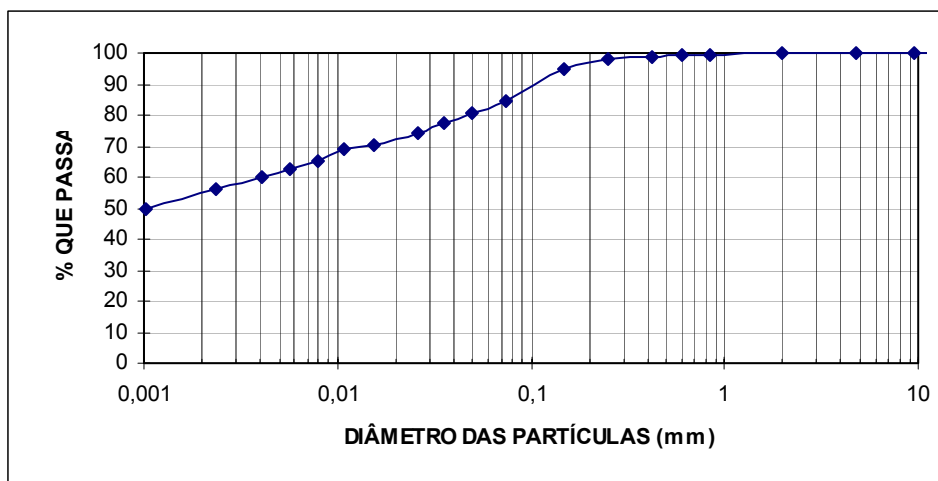


Figura 4.3 – Curva granulométrica da matéria-prima AM-03.

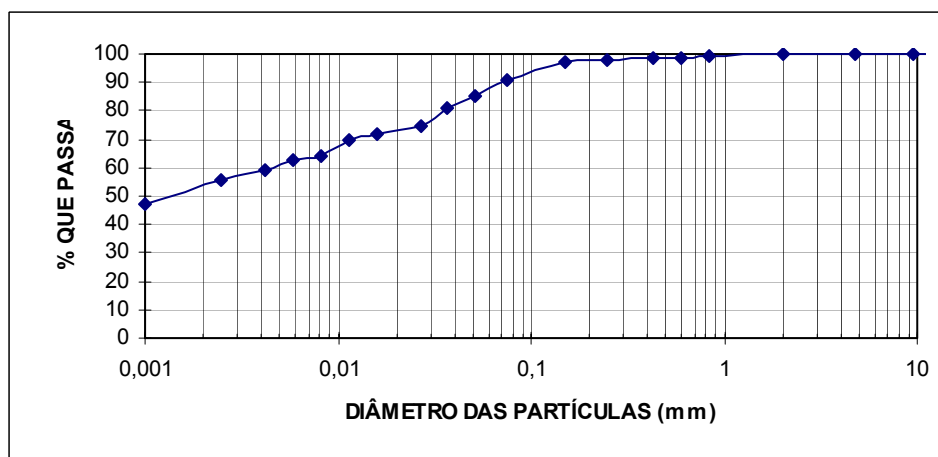


Figura 4.4 – Curva granulométrica da mistura MT-13.

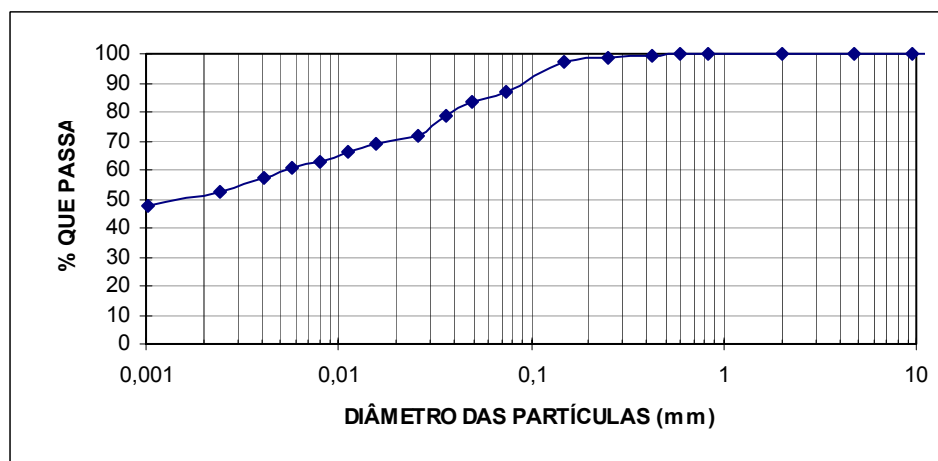


Figura 4.5 – Curva granulométrica da mistura MT-23.

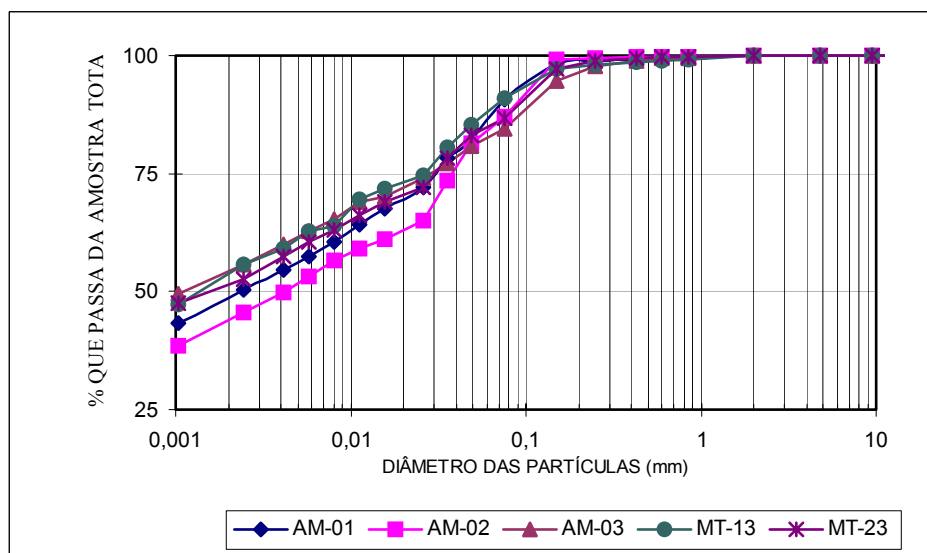


Figura 4.6 – Curvas granulométricas das matérias-primas cerâmicas estudadas nesta pesquisa.

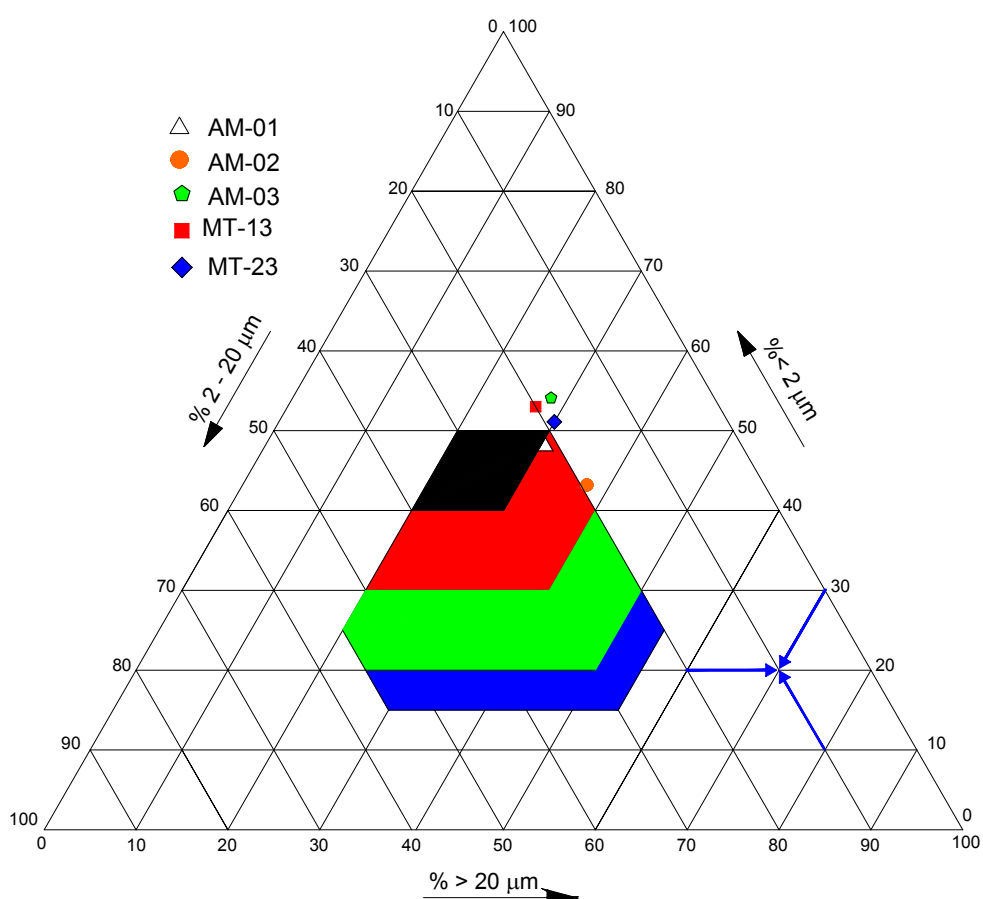


Figura 4.7 – Resultados obtidos das matérias-primas estudadas.

Tabela 4.1 – Granulometria, limites de Atterberg e massas específica real dos grãos das argilas estudadas nesta pesquisa.

Amostra	Areia Grossa (%) 0,6 - 2,0 mm	Areia Média (%) 0,2 - 0,6 mm	Areia Fina (%) 0,06 - 0,2 mm	Silte (%) 0,002 - 0,06 mm	Argila (%) < 0,002mm	Limites (%)			G* (g/cm³)
						LL	LP	IP	
AM- 01	0,62	0,69	13,05	37,46	48,18	70	32	38	2,75
AM- 02	0,21	0,43	15,64	40,51	43,21	65	28	37	2,71
AM- 03	0,63	3,12	13,83	28,32	54,09	65	27	38	2,73
MT-13	1,08	1,28	10,18	34,50	52,97	61	26	35	2,73
MT-23	0,27	1,71	13,44	33,50	51,08	50	25	25	2,72

G* = Massa Específica Real dos Grãos

Com relação a granulometria das argilas estudadas, pode-se dizer que:

- i. A amostra 01 se enquadrou no teor ótimo (faixa vermelha) do diagrama de Winkler;
- ii. A amostra 02, conforme pode ser observado na Tabela 4.1, foi a que apresentou menor teor de argila, aproximadamente 43%;
- iii. A matéria-prima AM-03 e a mistura MT-13 apresentaram os maiores percentuais da fração argila, se situando nas posições mais distantes das regiões ótimas de Winkler. Apesar de apresentarem boa conformação durante a extrusão, apresentaram maior dificuldade de secagem ao ar com o aparecimento de trincas e fissuras na maioria dos agregados quando calcinados a 1050°C e 950°C respectivamente;
- iv. A mistura MT-23 apresentou melhor relação quanto a trabalhabilidade durante a extrusão, tempo de secagem ao ar e retração, apesar do acentuado percentual de argila.

4.3 Análise química

A composição química das matérias-primas foi obtida por meio da análise semi-quantitativa realizada em um espectrômetro de fluorescência de raios-X Philips PW2400, com tubo de Rh no Laboratório de Fluorescência de Raios-X do Instituto de Geologia da UFRJ. O software utilizado para as análises semiquantitativas 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 (Mendes, C. J. ,2004 - responsável por este ensaio):

- i. detetores selado e de fluxo,
- ii. cristais analisadores PET, Ge, PXI, PX3 e L1F200 e
- iii. potência do tubo 24kV e 90 mA ou 50kV e 50 mA, dependendo do elemento químico a ser detectado.

Os resultados da análise química por fluorescência de raios-X, mostrados na Tabela 4.2, indicam que as argilas estudadas são muito homogêneas quimicamente, apresentando resultados quase idênticos de MgO, Al₂O₃, SiO₂, K₂O, Fe₂O₃, ZrO₂. Nota-se que as amostras apresentam elevados teores de óxidos corantes, resultando numa cor de queima avermelhada apresentando ainda baixos valores de perda ao fogo a 950°C. Essas argilas apresentam ainda uma carência de elementos fundentes (Na₂O, K₂O) fundamentais para a produção de elementos de baixa porosidade.

Tabela 4.2 – Composição química das argilas estudadas.

Amostra	Composição Química (%)								Total
	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	ZrO ₂	Perda ao Fogo	
AM - 01	0,56	17,42	64,36	1,63	1,05	6,54	0,09	6,54	98,19
AM- 02	0,60	16,65	65,52	1,64	0,99	5,81	0,08	6,77	98,06
AM - 03	0,66	19,15	63,36	1,64	1,06	6,61	0,08	7,45	100,00

4.4 Análise mineralógica

A análise mineralógica da fração argila (fração inferior a 0,002mm) existente nos solos estudados foi realizada 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 40kV Instituto de Geologia da UFRJ e 20mA na velocidade de 1°/minuto (LUDKA, I. P. ,2004 - responsável por este ensaio).

Para a separação da fração argila, de cada uma das amostras foi coletada 70g, passante na peneira nº60 ABNT, e colocadas em 125ml de solução de hexametáfosfato de sódio por 24 horas para dispersar as partículas. Em seguida essas foram levadas a um dispersor e foram agitadas por 20 minutos. A solução foi colocada em uma proveta de vidro tarada para 1000cm³ e completada com água. Após esta etapa, foi feita uma agitação manual do conjunto, por 2 minutos. O conjunto foi posto em repouso, por mais 24 horas. Decorrido este tempo, foi retirada por sifonagem, da parte líquida superior da proveta, até uma marca correspondente à altura de 20cm do fundo da proveta, esta solução foi transferida para um recipiente de vidro, recebeu 5ml de HCl para flocular e ficou em repouso por 30 minutos, sendo em seguida depositada em pequenas quantidades em uma cápsula de 10ml, e colocadas em uma centrífuga de laboratório modelo baby, com capacidade de 4300rpm. As amostras foram colocadas na centrífuga aos pares de forma a se equilibrar as massas e foram centrifugadas, pelo período de 1 minuto. Após este período, foi removida a parte líquida, e adicionada nova quantidade de água destilada. Com o auxílio de um bastão de vidro, foi feita uma nova mistura da parte sólida, que estava depositada no fundo da cápsula. Esse procedimento foi repetido até observar que a água destilada ficava turva após a centrifugação, o que é uma indicação da retirada do HCl. Após este período a parte líquida foi removida, e a parte sólida foi deixada secar ao ar, em ambiente protegido de poeiras.

No ensaio de difração de raios-X foi analisada a fração argila de cada uma das três matérias-primas usadas nesse estudo, em estado seco ao ar. Os difratogramas de raios-X (mostrados no Anexo C) foram obtidos percorrendo a escala 2θ a velocidade de 1° por minuto iniciando em 5° até 40° ou 45° e proporcionaram a detecção dos argilominerais caulinita e illita nessas matérias-primas.

4.5 Classificação MCT

As amostras foram submetidas aos ensaios de Mini-MCV e perda de massa por imersão conforme os procedimentos da norma DNER ME-258/94 e DNER ME-256/94 respectivamente.

A preparação das amostras consistiu em :

- i. preparar 5 porções de 200g de solo destorroado e seco ao ar cada;
- ii. umidecer e homogeneizar cada porção, aumentando o teor de umidade em 2% na porção seguinte;
- iii. colocar o solo homogeneizado e umidecido em sacos plásticos devidamente identificados e levá-los a uma câmara úmida permanecendo nesta por no mínimo 24h;
- iv. preparar os moldes passando vaselina nas paredes internas para minimizar o atrito do solo com o molde no momento da compactação e colocar um plástico no fundo do mesmo;
- v. realizar a compactação de acordo com o método DNER ME-258/94 e registrar os valores obtidos em uma planilha;
- vi. Realizar a extração da saliência (10 mm) em equipamento adequado;
- vii. imergir os corpos-de-prova por cerca de 20 h e verificar o comportamento do solo quanto à perda de massa.

Na Figura 4.8 é mostrada a localização dos solos estudados no gráfico de classificação MCT e na Tabela 4.3 estão apresentados os resultados dos ensaios de Mini-MCV e perda de massa por imersão.

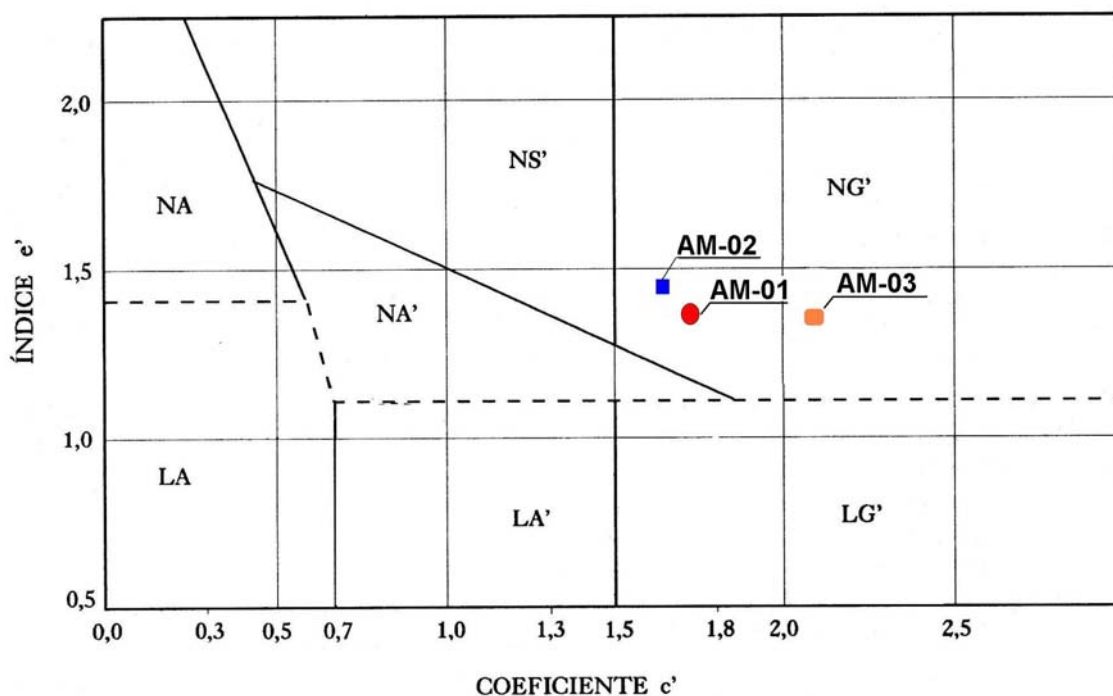


Figura 4.8 – Classe MCT das amostras pesquisadas.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de Mini-MCV e perda de massa por imersão

Solo	c'	d'	Pi	e'	Wot* (%)	Pea _{máx} * (kN/m ³)
AM-01	1,75	40,2	185	1,33	21,3	17,0
AM-02	1,64	34,7	200	1,37	18,2	16,8
AM-03	2,12	21,9	145	1,33	22,0	16,2

*umidade ótima e peso específico aparente seco máximo para a energia correspondente a 10 golpes.

Os solos coletados nas três cerâmicas são classificados como argiloso de comportamento não laterítico (NG'). Portanto segundo os critérios da metodologia MCT, estes solos não são adequados para o uso em pavimentação, entretanto apresentam características químicas, físicas e mineralógicas favoráveis à fabricação de agregados calcinados. O parâmetro c' confirma os resultados obtidos a análise granulométrica, ou seja, a amostra AM-02 (com menor c') é a menos argilosa e a amostra AM-03 (com o maior valor de c') é a mais argilosa.

CAPÍTULO 5

5 METODOLOGIA ADOTADA PARA A FABRICAÇÃO DOS AGREGADOS CALCINADOS DESTA PESQUISA E ENSAIOS PRELIMINARES

5.1 Produção dos agregados

Procurou-se reproduzir os procedimentos adotados no projeto piloto da CINASITA, onde as matérias-primas são conformadas por extrusão.

A metodologia para a produção dos agregados atendeu a seguinte seqüência:

- i. Inicialmente as matérias-primas foram desagregadas e secas ao ar. Depois foram passadas no laminador (Figura 5.1) do laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Norte Fluminense (UNF) com o objetivo de quebrar os grumos maiores;
- ii. Depois de desagregadas essas foram umedecidas para atingir aproximadamente um quarto do limite de liquidez (LL) e em seguida laminadas conforme mostra a Figura 5.2. Quando o objetivo era obter uma massa cerâmica composta por duas matérias-primas, realizava-se a mistura e homogeneização dos solos antes do umedecimento.
- iii. Em seguida, eram novamente umedecidas até atingir um valor próximo do LL/2 (teor sugerido por Alexandre, 1997, para a extrusão de algumas argilas

caracterizadas pelo mesmo em Campos dos Goytacazes – RJ);

- iv. Depois essas materias-primas eram submetidas à extrusão a vácuo no equipamento da UENF (Figura 5.3).
- v. Pela passagem por um bocal com orifício hexagonal foi possível obter barras com aproximadamente 200mm de comprimento. Foram utilizados dois tamanhos de bocal que corresponderam a 10 e 20mm do diâmetro de uma circunferência circunscrita ao orifício hexagonal.
- vi. Um cortador acoplado em frente ao bocal permitiu o corte manual das barras no comprimento médio de 15mm conforme mostra a Figura 5.4.
- vii. Os corpos verdes foram então secados, calcinados e britados.



Figura 5.1 - Laminador da UENF: Fabricante VERDES, Modelo 060, Motor de 2CV, Série 0010, RPM 1150 (Foto do autor).



Figura 5.2 - Umedecimento e matéria-prima laminada com teor de umidade próximo do LL/4 (Fotos do autor).

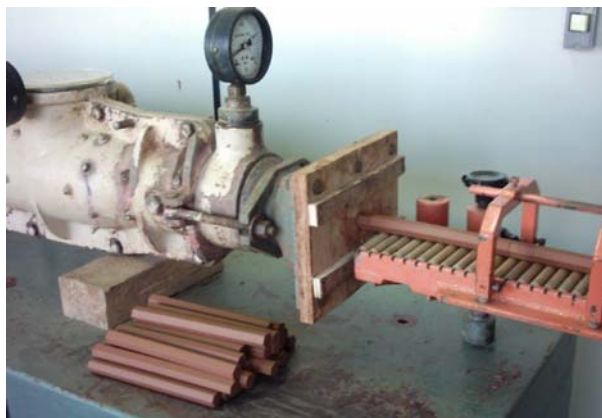


Figura 5.3 – Extrusora á vácuo da UENF: Fabricante VERDÉS, Modelo BR 051, Série 24, Ano de Fabricação 1999 (Foto do autor).



Figura 5.4 - Corte das barras extrudadas (Foto do autor).

O processo de secagem é aquele pelo qual o material conformado na extrusão perde a maior parte da água livre, adquirindo assim maior resistência mecânica e tornando-se apto à queima (FUNTAC e IEL, 1990). Sabe-se por exemplo, que uma peça queimada com teor excessivo de água está sujeita a trincas provocadas pela explosão de bolhas ou contrações intensas. Norton (1973) apud Batista (2004) alerta que no caso de vários objetos feitos da mesma massa cerâmica porém de tamanhos diferentes, os maiores não apenas secarão mais lentamente em igualdade de condições, mas também terão uma tendência maior para trincar. Portanto com o objetivo de acelerar o tempo de secagem, reduzir os problemas com trincas, com tempo necessário para a queima, com a energia gasta para a britagem optou-se por cortar as barras nas dimensões descritas e secá-las por um período médio de 24 horas ao ar e 24 horas de secagem em estufa a 110°C.

A calcinação das matérias-primas foi realizada no laboratório de solos do IME a 850, 950, 1050 e 1200°C a fim de verificar a variação de algumas propriedades com o

aumento da temperatura. O processo de queima consistiu basicamente em colocar os corpos secos em fornos elétricos tipo mufla e elevar a temperatura gradualmente (em torno de 20°C/min) até atingir a temperatura desejada, deixá-los nesse patamar por um determinado período, em seguida permitir o resfriamento gradual dos mesmos. O tempo de queima em cada patamar máximo de temperatura foi estipulado em 3 horas para o ensaio de tensão de ruptura à flexão (devido à dimensão maior de 7,0cm dos corpos-de-prova) e 45 minutos para os agregados de 1,0 a 2,5cm de comprimento.

Para conseguir a granulometria desejada para os estudos com mistura asfáltica, mistura solo-agregado e ensaios preliminares de classificação procedeu-se à quebra dos grãos hexagonais de duas maneiras. Primeiramente foram quebrados por compressão numa prensa Amsler conforme proposto por Batista (2004). Em seguida os agregados foram peneirados num peneirador mecânico. Se a quantidade de material fino não fosse suficiente ao ensaio proposto separava-se a fração em excesso colocando-a num aparelho de abrasão Los Angeles submetendo a 600 ciclos com 10 esferas. O material submetido à abrasão era peneirado e separado em frações.

Da Figura 5.5 até a Figura 5.9 podem ser observados os processos de secagem, queima e britagem usados nesse estudo.



Figura 5.5 Secagem ao ar dos corpos verdes (Foto do autor).

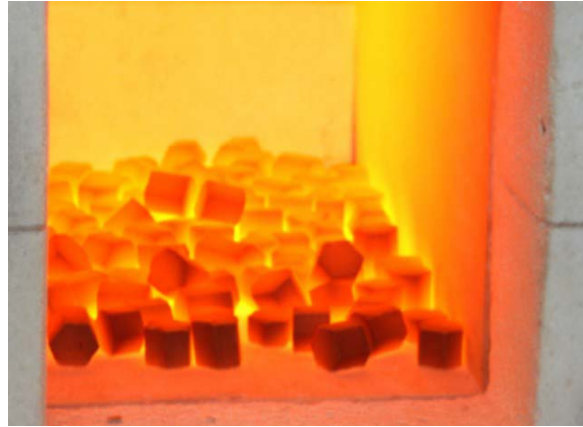


Figura 5.6 – Calcinação dos agregados em forno mufla do IME (Foto do autor).



Figura 5.7 – Prensa Amsler do IME e o aparelho de abrasão Los Angeles da COPPE: Equipamentos usados nesse estudo para a britagem dos agregados (Fotos do autor).



Figura 5.8 – Peneirador mecânico da COPPE (Foto do autor).



Figura 5.9 – Aspecto dos agregados antes e após a britagem por compressão (Foto do autor).

Quanto ao aspecto observado da conformação da massa cerâmica pode-se dizer que todas as amostras de solo deste estudo e suas misturas mostraram características satisfatórias ao processo de extrusão. Fato peculiar é que as matérias-primas AM-01 e AM-02 apresentaram problemas de conformação durante a extrusão no equipamento do IME, conforme pode ser observado na Figura 5.10. A fim de verificar se este problema era originado pela matéria-prima ou pelo equipamento utilizado, essas foram extrudadas no equipamento da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) e mostraram-se muito propícias ao processo, não apresentando qualquer falha de conformação como mostra a Figura 5.11. Estima-se que a falta de vácuo no equipamento do IME, que leva ao uso de massas muito úmidas (próximas do LL), aliadas às características físicas dessas argilas, tenham sido causadores desta falha.

As cinco massas estudadas foram extrudadas no equipamento da UENF com uma umidade média de 33% (próximo do LL/2) e pressão de vácuo de aproximadamente 27 pol Hg (0,142kPa). Mello & Oliveira (2004) recomendam o uso da pressão de vácuo de aproximadamente 26 pol Hg (0,136kPa), para garantir que haja perfeita compactação do material cerâmico, bem como a retirada de todo ar da massa. A falta ou a redução do vácuo pode ser responsável pelo comprometimento das propriedades físicas dos produtos fabricados, causando problemas como trincas, aumento da absorção d'água e diminuição da resistência mecânica. Isso é causado pelos poros formados pela não retirada de todo o ar da massa.



Figura 5.10 – Falha na massa cerâmica oriunda da matéria-prima AM-01 extrudada no equipamento do IME (Foto do autor).



Figura 5.11 – Massa cerâmica oriunda da matéria-prima AM-01 durante a extrusão no equipamento da UENF (Foto do autor).

5.2 Ensaios preliminares para fins classificatórios

Para classificar o agregado produzido com as três matérias-primas e respectivas misturas, e selecionar a que resulta na melhor relação temperatura versus propriedades físico-mecânicas, foram realizados os seguintes ensaios:

- i. ensaio de perda de massa após fervura;
- ii. absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente e
- iii. tensão de ruptura à flexão.

5.2.1 Perda de massa após fervura

O ensaio obedeceu aos procedimentos descritos no método ME 225/89 do DNER.

Esse ensaio é oriundo de um do procedimento de laboratório do Departamento de Estradas do Texas denominado "Pressure Slaking Test" e tem como objetivo verificar se a desidratação dos agregados foi satisfatória.

A preparação das amostras consiste basicamente em obter uma quantidade que seja capaz de encher metade do frasco de vidro de 500cm³ com granulometria compreendida entre peneira 3/4" e a peneira n°10 sendo permitido quebrar as amostras de modo a obter esta granulometria. Segundo o método não é permitido a lavagem das amostras.

O ensaio consiste em:

- i. colocar uma quantidade de amostra tal que encha o frasco de vidro de 500cc até a metade. Utilizar um frasco de vidro para cada amostra a ser ensaiada. Não é necessário pesar a amostra antes de colocá-la no vidro. A quantidade de amostras a serem ensaiadas de cada vez é limitada apenas pela quantidade de vidros que caibam dentro da panela de pressão;
- ii. adicionar 200cm³ de água destilada ao frasco com a amostra;
- iii. colocar os frascos com as amostras na panela de pressão e adicionar água destilada à panela, a fim de formar uma lâmina d'água de mais ou menos 2cm;
- iv. aquecer a panela depois de fechada hermeticamente até a válvula da pressão indicar a fervura (soltar vapor);
- v. deixar ferver por 15 minutos. Em seguida retirar os frascos da panela;
- vi. deixar esfriar os frascos com as amostras e água até mais ou menos 27°C. Arrolhar os frascos e colocá-los em um recipiente conveniente no agitador de peneiras. O próprio fundo de peneira dependendo dos frascos a serem utilizados poderá servir. Utilizar mantas de borracha para calçar bem os

frascos. A tampa das peneiras pode ser utilizada também para fixação dos frascos;

- vii. agitar os frascos por um período de 30 minutos;
- viii. depois de remover as rolhas dos frascos lavar as amostras na peneira nº 40 tomando-se cuidado de não perder nenhum material retido ou passando na peneira nº40;

Secar na estufa separadamente para cada amostra os materiais retidos e que passaram na peneira nº40.

A percentagem de desgaste no ensaio é expressa pela seguinte fórmula:

$$\text{Desg.} = (\text{Peso do Mat. passando na peneira nº 40} / \text{Peso total do Material}) \times 100$$

Na Figura 5.12 estão indicados os valores obtidos neste ensaio com os agregados calcinados á 950°C com as diferentes matérias-primas e na Figura 5.13 são mostradas etapas de execução do ensaio, nesse estudo.

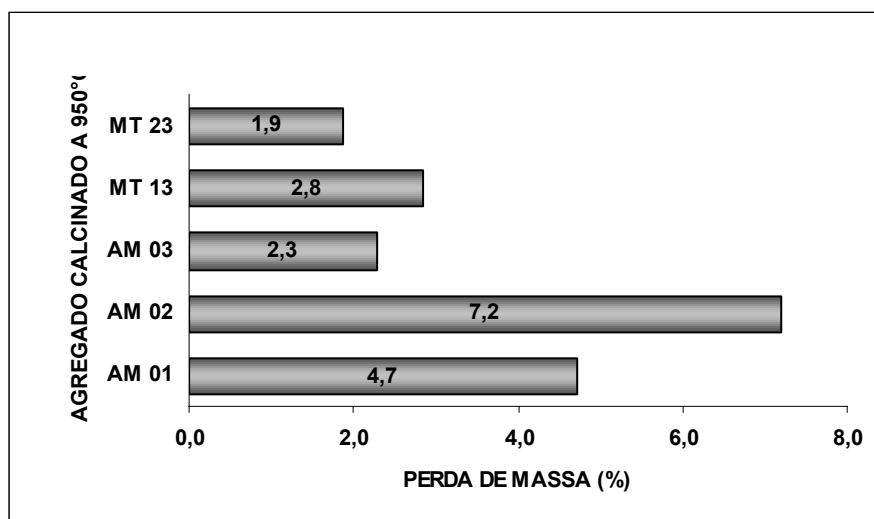


Figura 5.12 Perda de massa após fervura dos agregados calcinados a 950°C por 45 minutos.

Os ensaios de desgaste após fervura indicaram que os agregados produzidos com essas massas cerâmicas apresentaram resistência mecânica satisfatória para os critérios da especificação DNER-ES 227/89. Esta especificação considera 10% a perda de massa máxima aceitável para que um agregado de argila possa ser usado

em pavimentação, conforme mostra a Tabela 2.2. Os agregados produzidos com a matéria prima AM-02 foram os que apresentaram maior desgaste, portanto foram considerados de qualidade inferior aos demais. Desta forma, visando economizar tempo durante a pesquisa, optou-se por não realizar os ensaios de caracterização subseqüentes com esta massa cerâmica.



Figura 5.13 Etapas do ensaio de perda de massa após fervura realizadas neste estudo.

5.2.2 Determinação da absorção de água, porosidade aparente, densidade aparente.

Embora o ensaio de absorção de água conduza a valores superiores se comparado com a absorção de ligante numa mistura asfáltica, o mesmo permite avaliar a variação desta propriedade em função da temperatura de queima e da massa cerâmica utilizada. Dessa forma o ensaio de absorção de água, juntamente com a determinação da porosidade aparente e massa específica aparente, permitem prever em qual temperatura e qual massa cerâmica apresentará melhor grau de impermeabilidade e conseqüentemente menor consumo de ligante.

Os ensaios para a determinação da absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente dos materiais estudados foram realizados seguindo a norma da ABNT NBR-6220.

Adotou-se os procedimentos prescritos nesta norma e não os do método DNER ME-081/98 pelos seguintes motivos:

- i. A saturação é realizada em 1 hora, pela fervura dos materiais ou em 2 horas quando os corpos-de-provas são submetidos a um vácuo não superior a 6,66 kPa,;
- ii. Foi constatado pelo autor do presente trabalho que a saturação completa (constância de massa) dos corpos-de-prova ocorria a aproximadamente 72 (setenta e duas) horas após a imersão em água à temperatura ambiente. O método do DNER recomenda imersão por 24 (vinte quatro) horas levando a diferenças entre 1 e 2% nos resultados do ensaio ;
- iii. Requer uma menor quantidade de amostras.

O ensaio da norma NBR-6220 consiste em:

- i. Obter uma amostra com volume variando entre 100 e 200cm³;
- ii. Retirar o pó e as partículas que não estejam firmes dos corpos-de-prova;
- iii. Secá-los em estufa até a obtenção da constância de peso;
- iv. Determinar a massa seca (Ms);
- v. Saturá-los, pelo processo da fervura ou vácuo, não permitindo que o corpo-de-prova toque o fundo do recipiente através do uso de uma cesta;
- vi. Resfriá-los até a temperatura ambiente e
- vii. Determinar a massa imersa (Mi) e a massa saturada com superfície seca (Mu).

A massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água dos agregados foi obtida através das seguintes fórmulas:

$$V_a = \frac{M_u - M_i}{M_e} \quad (5.2.1)$$

$$Mea = \frac{Ms}{Va} \quad (5.2.2)$$

$$Pa = \left(\frac{Mu - Ms}{Me - Va} \right) \times 100 \quad (5.2.3)$$

$$A = \left(\frac{Mu - Ms}{Ms} \right) \times 100 \quad (5.2.4)$$

Onde:

Mu é a massa saturada com superfície seca (em g);

Mi é a massa imersa (em g);

Me é a massa específica da água (1,0 g/cm³);

Va é o volume aparente (em cm³);

Mea é a massa específica aparente (em g/cm³);

Pa é a porosidade aparente (em %) e

A é o índice de absorção de água (em %).

Na Figura 5.14, Figura 5.15 e Figura 5.16 apresentam-se os resultados obtidos no presente estudo.

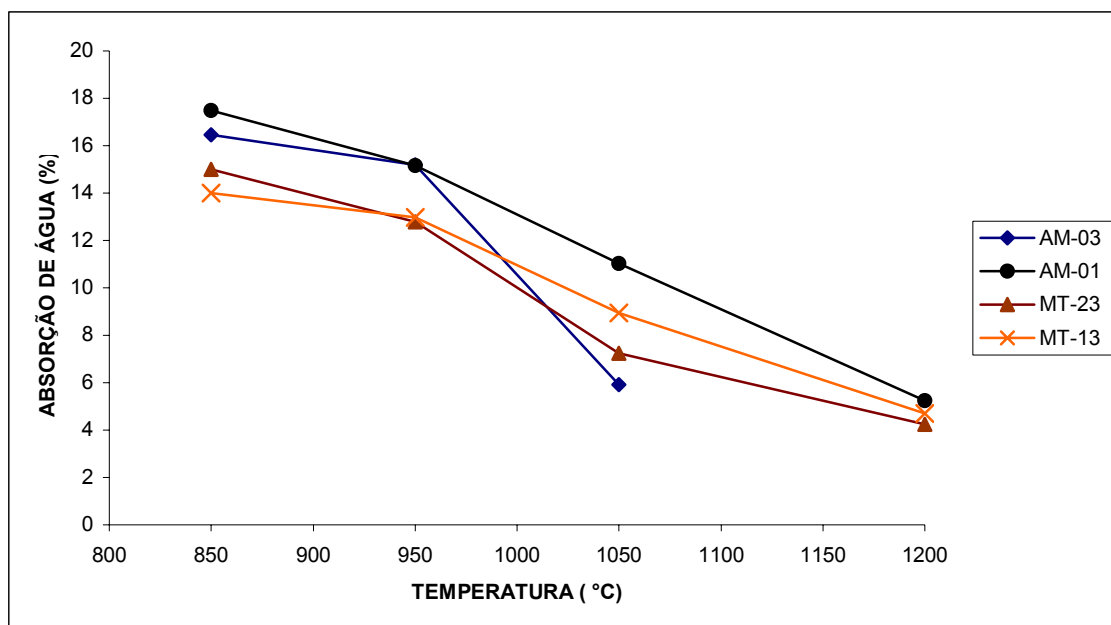


Figura 5.14 Gráfico da absorção de água versus temperatura de queima para as amostras do presente estudo.

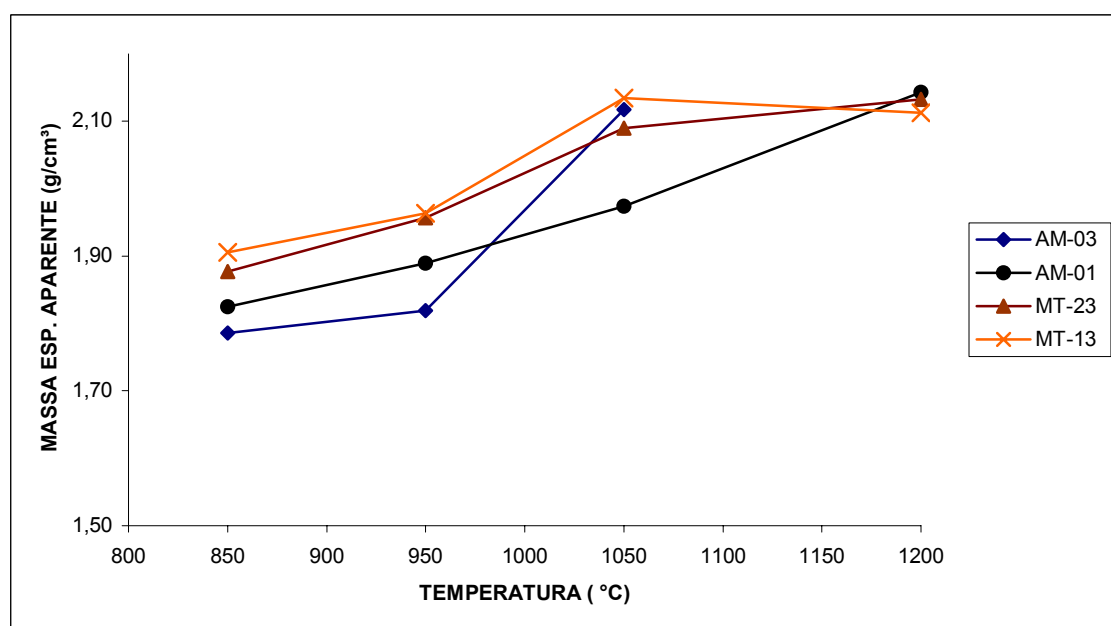


Figura 5.15 Gráfico da massa específica aparente versus temperatura para as amostras do presente estudo.

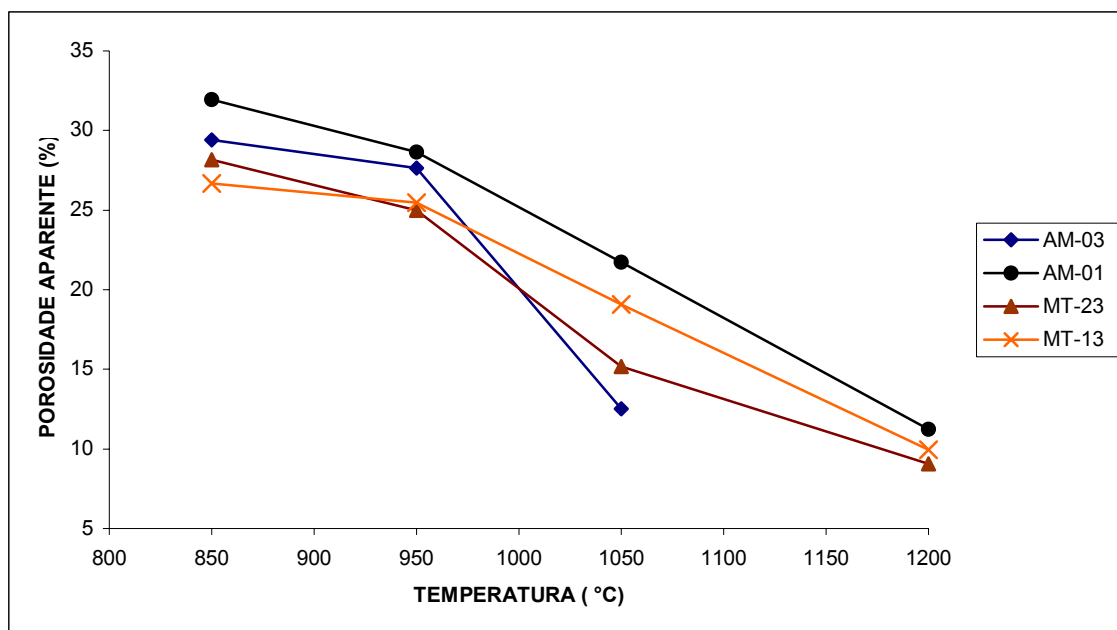


Figura 5.16 Gráfico da porosidade aparente versus temperatura para as amostras do presente estudo.

A matéria-prima AM-03, apesar de produzir o agregado com menor absorção e menor porosidade a 1050°C, apresentou grande quantidade de trincas e fissuras, mostrando-se inadequada à produção de agregados de baixa porosidade e permeabilidade, nesta temperatura (Figura 5.17) para o método de calcinação adotado nesta pesquisa. Para economizar tempo nos demais ensaios optou-se por não continuar os estudos com este material.



Figura 5.17 Corpo-de-prova produzido com a matéria-prima AM-03 á 1050°C

Os ensaios mostraram que há uma tendência em todas as massas cerâmicas deste estudo em aumentar a densidade, diminuir porosidade e absorção com o crescimento da temperatura de queima. Nota-se que este fato se intensifica à 1050°C. Esta observação também foi feita nos estudos realizados pela Divisão de Engenharia Mecânica do IPT-SP (FUNTAC e IEL, 1990) sobre os processos térmicos em massas cerâmicas (vide item 2.1), ou seja, acima de 1000°C, os sílico-aluminatos que estão na

forma vítrea amolecem e dão ao corpo maior dureza, compacidade e impermeabilidade.

Verifica-se que a massa cerâmica mais adequada, no que diz respeito à porosidade aparente e grau de impermeabilização para a produção de agregados a serem usados em misturas asfálticas é a MT-23 calcinada a 1050°C. Nota-se na Tabela 5.1 que a absorção de água desta mistura cai de 13% calcinada a 950°C para 7% calcinada a 1050°C.

Tabela 5.1 – Densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água das massas cerâmicas estudadas.

Massa Cerâmica	T (°C)	Mea (g/cm³)	Pa (%)	A (%)
AM-01	850	1,82	32	17
AM-01	950	1,89	29	15
AM-01	1050	1,97	22	11
AM-01	1200	2,14	11	5
AM-03	850	1,79	29	16
AM-03	950	1,82	28	15
AM-03	1050	2,12	13	6
MT-23	850	1,88	28	15
MT-23	950	1,96	25	13
MT-23	1050	2,09	15	7
MT-23	1200	2,13	9	4
MT-13	850	1,91	27	14
MT-13	950	1,96	25	13
MT-13	1050	2,13	19	9
MT-13	1200	2,11	10	5

5.2.3 Tensão de ruptura à flexão (módulo de ruptura)

O ensaio de tensão de ruptura à flexão é comumente realizado em pesquisas com materiais cerâmicos e consiste basicamente em aplicar uma carga crescente sobre um corpo-de-prova de dimensões conhecidas e apoiado sobre dois cutelos até a ruptura.

Segundo Gonçalves (SD) este ensaio é aplicado em amostras de todos os produtos da indústria cerâmica com as seguintes finalidades :

- i. Controlar a uniformidade dos produtos e matérias-primas cerâmicas no processo de conformação;

- ii. Determinar as temperaturas ideais de queima, através da tensão de ruptura a várias temperaturas;
- iii. Controlar o produto após queima.

Nessa pesquisa a execução desse ensaio teve os seguintes objetivos:

- i. verificar a variação da resistência de ruptura a flexão das matérias-primas estudadas em função da temperatura de queima e
- ii. servir como critério de seleção e classificação dessas matérias-primas.

A norma brasileira NBR 6113 recomenda a confecção de corpos-de-prova constituídos por um prisma reto com dimensões aproximadas de 22,9 x 11,4 x 6,3 ou 7,6 cm³ para a realização deste ensaio. Como a confecção de corpos-de-prova com essas dimensões seria muito trabalhosa e a finalidade da determinação do módulo de ruptura ser puramente qualitativa neste estudo, optou-se por realizar este ensaio em corpos-de-prova obtidos por processo de extrusão, com dimensões de aproximadamente 7,0 x 2,7 x 1,7cm³ e calcinados por um período de três horas em cada patamar de temperatura.

As características da prensa, segundo Alexandre (1997), para a execução do ensaio são as seguintes:

- i. Possuir um dispositivo de distribuição uniforme da carga nos cutelos;
- ii. Permitir a aplicação de cargas progressivas e sem golpes;
- iii. Possuir dispositivos de regulação e comando que possibilite observar as condições relativas à velocidade de aplicação da carga (8kgf/s a 12kgf/s);
- iv. Permitir a gravação dos resultados através de um sistema de aquisição de dados;
- v. O dispositivo de medição de carga deve ter resolução de 2% do valor mínimo esperado através de leitura direta, com o mínimo de inércia e de atritos, de tal

modo que estes não influenciem sensivelmente no valor do ensaio.

Para executar este ensaio, inicialmente foram medidas a distância entre apoios (aproximadamente 55mm), a largura e a espessura dos corpos-de-prova com um paquímetro de 0,05mm de precisão.

Para cumprir com as características descritas por Alexandre (1997), foram encaixados numa prensa Wykenham (do laboratório de Geotecnia da COPPE) dois cutelos cilíndricos de transmissão e um de reação. Para obtenção da carga de ruptura foi acoplada, no cutelo de reação, uma célula de carga ligada a um sistema de aquisição de dados como mostra a Figura 5.18.



Figura 5.18 Adaptação numa prensa Wykenham e o sistema de aquisição de dados usado na determinação do módulo de ruptura dos corpos-de-prova deste estudo.

A tensão de ruptura foi calculada pela seguinte expressão:

$$Tr = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (5.2.4)$$

Sendo:

Tr = tensão de ruptura ;

L = distância entre os pontos de apoio do corpo-de-prova;

h = altura do corpo-de-prova;

b = largura do corpo-de-prova.

Na Figura 5.19 estão apresentados os módulos de ruptura (média de três determinações) dos corpos-de-prova produzidos com as matérias-primas estudadas.

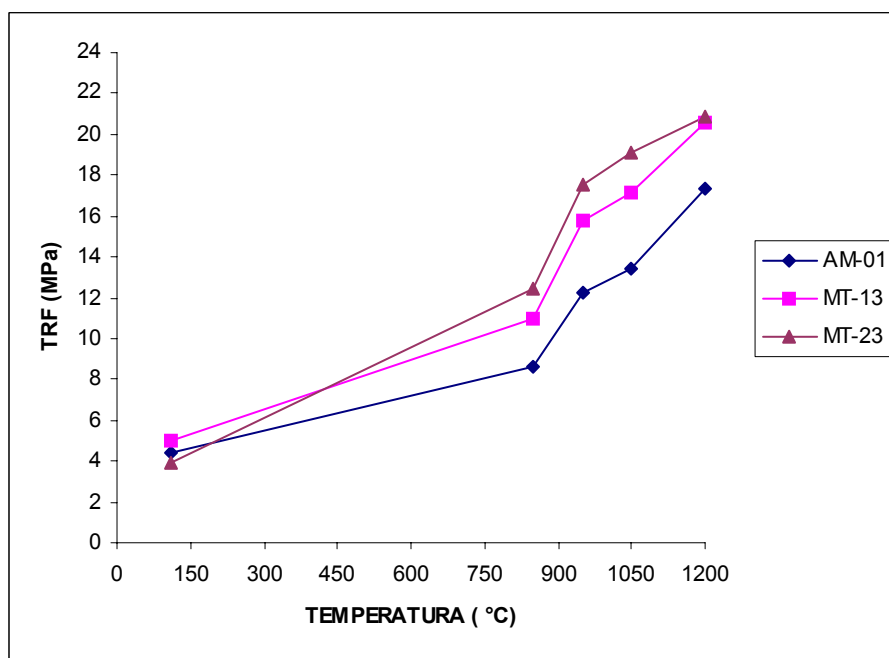


Figura 5.19 – Gráfico da tensão de ruptura à flexão versus temperatura de queima para três materiais deste estudo.

Verifica-se na Figura 5.19 que a 110°C (estado de seco em estufa) o módulo de ruptura dos materiais estudados ficou em torno de 4MPa indicando que a extrusão a vácuo originou uma resistência considerável nesses materiais. De 850°C a 950°C ocorreu um crescimento médio de 42,5% na resistência a flexão nas três amostras

estudadas neste ensaio. Nota-se que esse aumento na resistência tende a se tornar linear a partir de 950°C.

5.3 Seleção da massa cerâmica para a composição da mistura asfáltica e base solo-agregado

Os ensaios preliminares deram uma boa noção das características das massas cerâmicas estudadas, sendo importantes instrumentos na seleção de matérias-primas, bem como na escolha da temperatura para a produção de agregados de boa qualidade.

Deve-se ressaltar que para a finalidade proposta (o uso em pavimentação) os agregados de argila calcinada devem apresentar:

- i. desgaste após fervura inferior a 10% para o uso em bases e 6% para utilizar em misturas asfálticas (DNER EM 230/94);
- ii. baixa absorção e porosidade para o uso em misturas asfálticas;
- iii. resistência mecânica satisfatória a finalidade proposta (base, ou mistura asfáltica).

Em função dos resultados obtidos nos ensaios preliminares e das características esperadas em agregados de boa qualidade, as massas cerâmicas deste estudo foram classificadas de acordo com o apresentado na Tabela 5.2. A classificação dessas massas está disposta em ordem hierárquica, sendo designada por “1º” a que produz, para um determinado ensaio, a propriedade mais adequada ao uso como agregado para pavimentação, “2º” de qualidade inferior a “1º” e assim sucessivamente.

Tabela 5.2 – Classificação das massas cerâmicas estudadas para produzir agregados calcinados.

Massa cerâmica	Classificação das massas cerâmicas estudadas		
	Desgaste após fervura	(Abs., poros. e MEA.) versus Temperatura.	Módulo de ruptura
AM- 01	4º	4º	3º
AM- 02	5º	-	-
AM- 03	2º	3º	-
MT-13	3º	2º	2º
MT-23	1º	1º	1º

A massa cerâmica MT-23 foi selecionada para a realização dos ensaios com misturas asfálticas e solo-agregado por:

- i. Apresentar os melhores resultados nos ensaios mecânicos;
- ii. Apresentar ausência de fissuras em todas as temperaturas;
- iii. Apresentar absorção e porosidade aparente relativamente baixos a 1050°C;
- iv. Possibilitar o uso de duas jazidas que se situam em locais próximos (distância inferior a 15km), que isoladamente produziram agregados de qualidade inferior, para produzir um produto com qualidades mais satisfatórias ao uso em pavimentação.

5.4 Ensaios de análise térmica diferencial (DTA) e Análise termogravimétrica (DTG).

A análise térmica diferencial (DTA) é um instrumento de grande aplicação no estudo de argilas como método de identificação de argilominerais. O ensaio consiste no aquecimento em velocidade constante, de uma argila, juntamente com uma substância termicamente inerte, registrando as diferenças de temperatura entre a substância inerte e a argila estudada em função da temperatura; quando ocorrem transformações endo ou exotérmicas, estas transformações aparecem como deflexões em sentidos opostos numa curva termodiferencial. Pela posição, forma e intensidade dos picos

endo e exotérmicos, é possível realizar uma identificação bastante precisa de argilominerais puros. Contudo existem restrições ao uso dessa técnica em misturas de argilominerais. A análise térmica diferencial é também um instrumento de grande importância em pesquisa de produtos cerâmicos, pois permite obter informações importantes sobre as reações ocorridas durante o processo de queima (Santos, 1989b).

A análise termogravimétrica consiste no aquecimento da argila em velocidade constante, com ligação a uma balança, o que permite o registro das variações de massa em função da temperatura de queima.

A utilidade prática deste ensaio no estudo do agregado de argila calcinada desta pesquisa foi permitir detecção das transformações energéticas e das variações de massa na mistura MT-23 durante o processo de queima. Essas detecções permitem prever em quais temperaturas as transformações físico-químicas serão mais intensas de maneira a minimizar as tentativas realizadas na escolha da temperatura de calcinação.

A Figura 5.20 mostra as curvas termogravimétrica (TG), termogravimétrica derivada (DTG) e de análise térmica diferencial (DTA) da massa cerâmica MT-23. O ensaio foi realizado na Escola de Química da UFRJ utilizando um equipamento de análise simultânea TG/DTA da TA Instruments, modelo SD2960, feito a uma razão de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$ de 25 a 1100°C , em presença de um fluxo de $100\text{ml}.\text{min}^{-1}$ de ar, usado como gás de purga.

As observações do responsável pelo ensaio, professor Jô Dwek, da Escola de Química da UFRJ, estão apresentadas no próximo parágrafo.

“Através da curva TG, observa-se até aproximadamente 200°C , uma perda de massa relativa à água livre presente e/ou adsorvida, conforme indicado pelo pico endotérmico respectivo na curva DTA. Tudo indica que a perda de massa que se segue na faixa de temperaturas entre 200 e 400°C , caracterizada por um pequeno pico DTG, é prioritariamente devida a pirólise de material orgânico, visto o caráter exotérmico apresentado na curva DTA nesta faixa de temperaturas. Entre 400 e 600°C , há significativa perda de massa conforme indicada na curva TG, muito provavelmente, decorrente das etapas de desidroxilação das argilas presentes caracterizadas pelo pico DTA endotérmico respectivo. Esta desidroxilação,

aparentemente, estende-se até 800°C, porém com taxa de perda de massa bem menor. Cabe observar que, durante a fase de desidroxilação, ocorre simultaneamente, um pequeno pico DTA endotérmico agudo, com mínimo a 573°C, característico da transformação do quartzo alfa em beta. De 800°C a 1100°C, ocorre nova etapa de perda de massa, devido a uma transformação endotérmica, conforme indicada na curva DTA”.

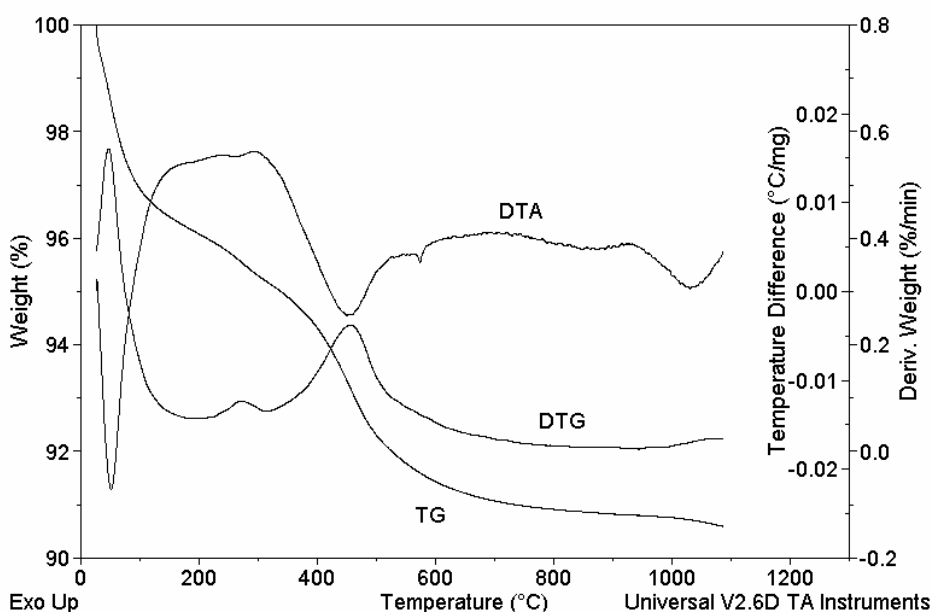


Figura 5.20 - Curvas TG, DTG e DTA da massa cerâmica MT-23.

Nota-se na curva DTA que ocorre uma forte transformação energética a 1050°C. Isso significa que nessa temperatura está acontecendo um processo físico-químico intenso (provavelmente devido ao amolecimento de alguns argilominerais), que pode ser favorável ou não a produção dos agregados calcinados. Se durante a queima nessa temperatura a massa cerâmica MT-23 apresentasse trincas e fissuras (como ocorreu na massa AM-03) o agregado perderia resistência mecânica e não seria adequado ao uso. Entretanto, isso não ocorreu, fato que permitiu ao agregado considerável ganho de impermeabilidade e resistência mecânica como constatado nos ensaios de absorção e módulo de ruptura.

O ganho de resistência mecânica e a redução da porosidade e da absorção a 1050°C tornou o agregado produzido a partir da mistura MT23 mais adequado ao emprego em misturas asfálticas. Deve-se ressaltar que essa temperatura é muito elevada para ser alcançada em fornos cerâmicos tornando inviável a confecção deste agregado,

nessa temperatura, nestes tipos de fornos. Já no sistema de produção com fornos rotativos esta temperatura é facilmente alcançada, segundo Santos (1989b) uma das condições para viabilizar a implantação da fábrica da CINASA, na década de 60, era que o agregado leve atingisse as características desejadas em temperaturas entre 1050°C e 1350°C (temperaturas de trabalho do forno rotativo do projeto piloto). Este foi o principal motivo que levou o autor do presente trabalho a sugerir o uso de fornos rotativos para produzir agregados destinados a utilização em misturas asfálticas.

Todo material calcinado para o uso nos estudos seguintes foi conformado por extrusão na UENF e calcinado no IME no total 50Kg, que consumiram muitas horas de trabalho, pois como já comentado o processo de produção foi muito artesanal e os equipamentos de baixa produção horária.

Foram produzidos 35 kg de agregados calcinados a 1050°C, para o estudo com misturas asfálticas, que simularam a produção em fornos rotativos e 15 kg calcinados a 850°C, para o estudo de misturas de solo-agregado, que simularam a produção dos mesmos em fornos cerâmicos.

CAPÍTULO 6

6 MISTURA ASFÁLTICA COM ARGILA CALCINADA ESTUDADA NESSA PESQUISA

O objetivo de um projeto de dosagem de CBUQ (concreto betuminoso usinado à quente) é determinar uma mistura econômica de agregados bem graduados, dentro dos limites das especificações e um teor de asfalto correspondente, que produza uma mistura com as seguintes propriedades (I.A, 1989):

- i. Asfalto suficiente para assegurar um pavimento durável;
- ii. Mistura suficientemente estável para satisfazer as demandas de tráfego sem distorção ou deslocamento;
- iii. Teor de vazios na mistura compactada que permita uma expansão térmica do asfalto e agregado sob as temperaturas do verão, sem danos ao pavimento;
- iv. Trabalhabilidade satisfatória para permitir espalhamento da mistura sem segregação.

Os procedimentos de projetos de mistura correntes são considerados empíricos, isto é, são baseados nos valores de ensaios que foram estabelecidos com base em observações de campo (Sá, 2003). Destaca-se neste momento que pelos materiais usados nessa pesquisa não originarem uma mistura convencional, a metodologia Marshall usada neste estudo teve que ser adaptada em relação a um concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) tradicional, composto por agregados naturais britados e ligante. A elevada porosidade e absorção do agregado artificial, bem

como sua baixa massa específica levou a adoção de alguns métodos diferentes dos tradicionais na dosagem de misturas asfálticas, como mostrado a seguir.

A intenção do presente estudo foi verificar a variação do comportamento físico e mecânico de uma mistura betuminosa com os agregados calcinados deste estudo e comparar com os resultados obtidos em outros estudos com agregados calcinados e agregados convencionais.

6.1 Caracterização dos agregados

Uma mistura asfáltica do tipo CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente é composta basicamente de cimento asfáltico de petróleo CAP, agregado e filer.

Para a composição da mistura tipo CBUQ foram empregados os seguintes agregados:

- i. agregado de argila calcinada resultante da queima da matéria-prima MT-23 a 1050°C. Este agregado foi denominado a partir deste ponto de AGC23-1050 e
- ii. areia fina proveniente do rio Acre.

A caracterização dos agregados obedeceu a seguinte seqüência de ensaios:

- i. análise granulométrica;
- ii. determinação das densidades real e aparente;
- iii. abrasão Los Angeles e
- iv. adesividade.

A análise granulométrica da areia foi realizada obedecendo à norma ME 83/84 do DNER. O agregado de argila calcinada foi britado e separado em frações granulométricas conforme explicado no capítulo 5. Na Tabela 6.1 é mostrada a

granulometria do agregado produzido neste estudo e da areia de rio usada.

Tabela 6.1 – Granulometria dos agregados usados na dosagem do CBUQ

#		% que passa	
(pol.)	(mm)	AGC23-1050	Areia de rio
3/4"	19	100	-
1/2"	12,7	83	-
3/8"	9,5	68	-
n.º 4	4,8	53	-
n.º 10	2,0	41	100
n.º 40	0,42	22	99,52
n.º 80	0,18	19	21,08
n.º 200	0,075	11	0,62

Para os ensaios de obtenção da massa específica dos agregados artificiais a prática, nesse estudo, mostrou que em alguns casos a imersão em água por 24h não foi suficiente para saturar completamente os agregados de argila calcinada e portanto recomenda-se que a saturação seja realizada por vácuo, fervura ou imersão em água por 72 horas.

As densidades real e aparente dos agregados graúdos e miúdos (retidos e passantes na peneira nº 4 respectivamente) de argila calcinada foi obtida através dos métodos ASTM C127 e C128 respectivamente. Em função da elevada porosidade dos agregados de argila calcinada procedeu-se a saturação dos agregados graúdos com o auxílio de uma pressão de vácuo de 630mm.Hg por 15 minutos, conforme mostrado na Figura 6.1. Para os agregados miúdos de argila calcinada a saturação foi realizada por imersão em água por 72 horas. Para a areia de rio foi realizado o procedimento de saturação descrito na norma ASTM C127, ou seja imersão em água por 24h. Os valores encontrados para as densidades real e aparente desses materiais encontram-se na Tabela 6.2. Essas densidades, nos agregados de argila calcinada, aumentaram com redução de tamanho dos mesmos, indicando que o percentual de vazios impermeáveis desse material, diminui proporcionalmente ao tamanho do grão. Nota-se que o agregado miúdo de argila calcinada possui densidade real próxima a da areia de rio. Considerou-se agregado calcinado graúdo a fração retida na peneira nº4 e agregado calcinado miúdo o passante nesta peneira.

Tabela 6.2 – Densidades dos agregados usados no projeto de misturas asfálticas deste estudo.

Densidades	AGC23-1050 Graúdo	AGC23-1050 Miúdo	Areia De rio
Real	2,44	2,71	2,74
Aparente	2,16	2,40	2,62



Figura 6.1 – Ilustração do procedimento de saturação dos agregados de argila calcinada através de vácuo, usado neste estudo.

O ensaio de desgaste por abrasão obedeceu aos procedimentos descritos no método ME 222/89 do DNER que dita as modificações necessárias ao método DNER ME35/98 para ensaio de desgaste por abrasão de agregados sintéticos graúdos (incluído os agregados de argila calcinada). Este ensaio foi realizado com uma amostra do agregado AGC23-1050 na graduação B da Tabela 6.3 e com 500 rotações do tambor. O resultado da abrasão, bem como os valores das correções das massas de agregados e carga abrasiva, estão expressos na Tabela 6.4. Essas correções visam minimizar o excesso de finos devido a menor densidade dos agregados de argila em relação aos agregados convencionais.

Tabela 6.3 - Graduação para o ensaio Los Angeles da norma ME-035/98.

Peneiras (mm)		Amostra – massa parcial (gramas)		
Passando	Retido	Grad. B	Grad. C	Grad. D
38,1	25,4	1.250 ± 25	-	-
25,4	19,1	1.250 ± 25	-	-
19,1	12,7	1.250 ± 25	2.500 ± 10	-
12,7	9,5	1.250 ± 25	2.500 ± 10	-
9,5	6,3	-	-	2.500 ± 10
6,3	4,8	-	-	2.500 ± 10
4,8	2,0	-	-	-

Tabela 6.4 - Resultado do ensaio de abrasão Los Angeles para o agregado de argila calcinada AGC23-1050.

GRADUAÇÃO	B		
Peneira #	Peso da amostra (g)	Massa unitária do agreg. calcinado (g/cm³) 3/4"-1/2"	1,21
3/4"-1/2" (A)	2502,5		
1/2"-3/8" (B)	2500,4	Massa unitária do agreg. calcinado (g/cm³) 1/2"-3/8"	1,22
Massa total	5002,9		
Massa unitária do agreg. convenc. (g/cm³)		1,55	
Massa corrigida (A)	1940,9	Total (g)	3910,9
Massa corrigida (B)	1970,0		
Carga abrasiva	11 esferas	4584,0	g
Carga abras. Corrigida (Y)	8 esferas	3478,6	g
Peso seco retido na #1,7	2947,5		g
Los Angeles	24,6		%

A abrasão los angeles do agregado AGC23-1050 foi inferior ao valor máximo estabelecido pelo DNER (ES 230/94), que é de 35%, para o uso de agregados de argila em misturas asfálticas como foi mostrado na Tabela 2.3 indicando que este agregado possui esta característica favorável ao uso em misturas asfálticas.

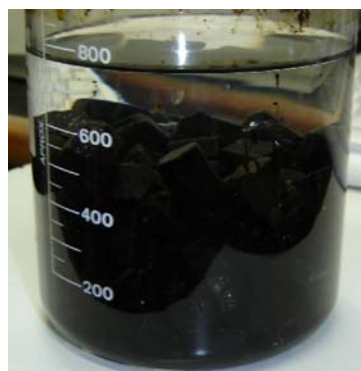
A adesividade, que é a propriedade que o agregado possui de ser aderido por um material betuminoso, foi verificada nos agregados graúdos de argila calcinada pelo método do DNER ME-78/94, que consiste em verificar se ocorre ou não o descolamento da película betuminosa quando a mistura é submetida à imersão em água destilada por 72 horas a uma temperatura de 40°C.

Os resultados mostraram que a adesividade do agregado de argila calcinada AGC23-1050 é insatisfatória necessitando da inclusão de um agente melhorador de adesividade (DOPE). O mesmo ensaio repetido com 0,5% de DOPE mostrou que esta inclusão melhorou a adesividade a ponto de torná-la satisfatória, conforme pode ser

observado na Figura 6.2. As características do CAP e do DOPE utilizados nesse ensaio encontram-se descritas no item 6.2.



a) adesividade sem DOPE



b) adesividade com DOPE

Figura 6.2 – Verificação da adesividade do agregado sintético de argila (DNER ME-78/94) (Foto do autor).

6.2 Obtenção e características do CAP e do DOPE

O ligante usado nesse estudo foi um cimento asfáltico classificado por viscosidade como CAP-20, proveniente da refinaria REDUC, Duque de Caxias - RJ, que atendeu às especificações do DNC (Departamento Nacional de Combustíveis). Na Tabela 6.5 são mostradas as características, os métodos, especificações e resultados obtidos com esse ligante.

Em função dos problemas com a adesividade do agregado de argila calcinada, constatados no item 6.1, foi selecionado o agente melhorador de adesividade CAP-DOP fornecido pela Petrobrás Distribuidora S.A. O material foi incorporado ao CAP-20 na proporção de 0,5% em relação ao peso do ligante. Esta mistura foi utilizada unicamente nos ensaios de verificação da adesividade (DNER ME 78/94) e resistência à tração retida por umidade induzida (AASHTO T-293/89). As especificações básicas do DOPE utilizado nessa pesquisa estão descritas na Tabela 6.6.

Tabela 6.5 – Dados referentes ao ligante usado nessa pesquisa

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Viscosidade Absoluta a 60°C	D 2171	2000 a 3500	2660	p
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	E 102	120 min.	212	s
Viscosidade Saybolt Furol a 177°C	E 102	30 a 150	42,5	s
ECA-Variação em Massa	D 1754	1,0 max.	0,04	%
ECA-Relação de Viscosidade	X 016	4,0 max.	1,8	
ECA-Dutilidade a 25°C	D 113	20 min.	>150	cm
Índice de Sucetibilidade Térmica	X 018	-1,5 a 1,0	-1,2	
Penetração	MB 107	50 min.	54	0,1mm
Ponto de Fulgor	D 92	235 min.	>336	°C
Solubilidade no Tricloretileno	D 2042	99,5 min.	100,0 (1)	% massa
Densidade Relativa a 25/25 °C	D 70	Anotar (2)	1,034 (3)	
Aquecimento a 175 °C	X 215	NESP (4)	NESP	
Ponto Amolecimento	D 36	Anotar	49,3	°C

Notas

(1) 99,7% massa

(2) Ensaio não faz parte da especificação

(3) Densidade a 20/4°C=1,036

(4) NESP = Não espuma

Tabela 6.6 – Características e especificações do CAP-DOP usado neste estudo

Característica	Resultado	Especificação
Aparência visual (aspecto a 25°C)	ok	Líquido negro e sem grumos
Ponto de fulgor (°C)	182	180 no mínimo
Viscosidade a 40°C (SSF)	85	70 a 110
Densidade a 25°C	0,9459	0,930 a 1,03

6.3 Projeto da mistura betuminosa

6.3.1 Escolha da curva granulométrica

A intenção no presente estudo foi estabelecer uma curva granulométrica de melhor adequação às condições da região de estudo. Como a quantidade de material fabricado foi relativamente baixa, devido ao trabalhoso processo de produção artesanal de laboratório já citado, os estudos com mistura asfáltica tiveram que ser otimizados, de forma a se trabalhar com um único traço. Para tanto os seguintes aspectos foram levados em consideração:

- i. A utilização da cal como material de enchimento poderia ser uma alternativa ao melhoramento da adesividade. Entretanto a adição da mesma elevaria

consideravelmente o custo da mistura, portanto optou-se por utilizar o filer proveniente da britagem dos agregados sintéticos como material de enchimento. Como alternativa ao problema da adesividade foi estudada a utilização do CAP-DOP;

- ii. Conforme foi descrito no capítulo 2 tem-se observado nas pesquisas do IME que misturas contendo unicamente agregados de argila calcinada aumentam sensivelmente o consumo de ligante. Logo, torna-se interessante agregar na mistura materiais naturais, de menor absorção e encontrados com relativa facilidade na região do estudo. Nesse sentido a utilização de uma faixa granulométrica que valorize a aplicação de um maior percentual da areia de rio foi considerada como mais adequada para a obtenção de teores mais baixos de ligante.

Diante do exposto, a composição granulométrica da mistura a ser estudada foi estabelecida baseando-se na faixa granulométrica recomendada pelo departamento de Estradas da Louisiana (LDH) por permitir a utilização de um maior percentual de areia de rio em relação às faixas do DNER. Os agregados sintéticos foram divididos em miúdos e graúdos devido à variação das densidades nessas frações. Dessa forma foi criada uma mistura com 80% de agregados calcinados (25% graúdo e 55% miúdo) e 20% de areia de rio. Na Tabela 6.7 estão indicadas as porcentagens adotadas na confecção desta mistura.

Tabela 6.7 – Granulometria da mistura adotada nessa pesquisa e limites da faixa para agregados sintéticos de argila do LDH.

# (pol.)	AGC graúdo 25%		AGC miúdo 55%		Areia 20%		Faixa LDH (%)	Projeto (%)
3/4"	100,00	25,00	100,00	55,00	100,00	20,00	100	100,00
1/2"	64,00	16,00	100,00	55,00	100,00	20,00	80-100	91,00
3/8"	32,00	8,00	100,00	55,00	100,00	20,00	-	83,00
n.º 4	-	-	85,00	46,75	100,00	20,00	55-80	66,75
n.º 10	-	-	64,00	35,20	100,00	20,00	45-75	55,20
n.º 40	-	-	33,00	18,15	99,52	19,90	20-55	38,05
n.º 80	-	-	26,00	14,30	21,00	4,20	10-30	18,50
n.º 200	-	-	14,00	7,70	0,62	0,12	4-15	7,82

A título de curiosidade verificou-se que a presente mistura esta parcialmente enquadra na nova faixa C do DNER. A Figura 6.3 mostra os limites da faixa do LDH, da faixa C do DNER e o traço médio adotado neste estudo.

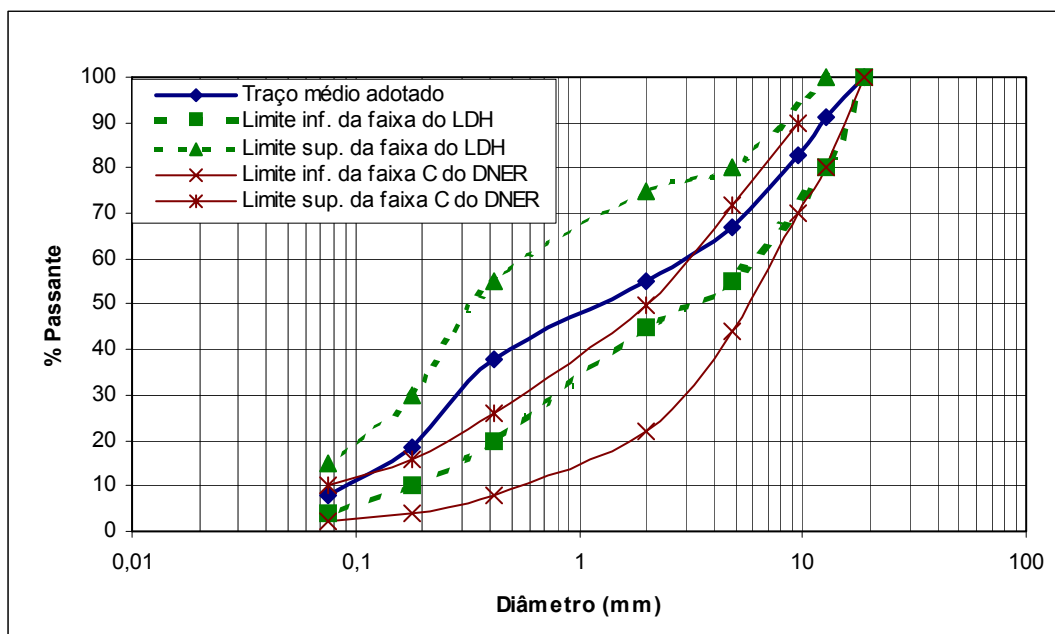


Figura 6.3 – Enquadramento da mistura de agregados na nova faixa C do DNER e na faixa criada pelo LDH para CBUQ contendo agregados sintéticos de argila.

Segundo Marques, Motta e Castelo Branco (2004) deve-se compreender que o projeto de mistura é um processo volumétrico cujo propósito é determinar o volume de cimento asfáltico e agregado requeridos para produzir uma mistura com as propriedades projetadas. Os autores ressaltam que devido à dificuldade de realizar medidas volumétricas no laboratório ou campo é que comumente pesos são usados no lugar de volumes e a massa específica é usada para converter peso para volume. A falta deste conhecimento leva em muitos casos a erros de projetos, especialmente quando se trabalha com materiais com densidades distintas. Segundo Dias et al (2004) o uso de materiais com massas específicas distintas aplicadas à metodologia baseada na distribuição granulométrica conduz a resultados muito diferentes quanto ao conteúdo volumétrico de cada fase constituinte, podendo haver falta ou excesso de grãos em determinadas frações, com implicações no volume de vazios da mistura e variação dos pontos de contato dos grãos. Esta constatação leva a que para enquadrar misturas compostas por materiais com densidades distintas em faixas convencionais deva-se realizar uma ponderação entre suas densidades. Essa ponderação foi obtida para os materiais estudados com o uso das seguintes equações preconizadas pelo Asphalt Institute (1962) :

$$G_a = \frac{P_{v1} \cdot G_1 + P_{v2} \cdot G_2 + P_{v3} \cdot G_3}{100} = \frac{25 \cdot 2,44 + 55 \cdot 2,71 + 20 \cdot 2,74}{100} = 2,65 \quad (6.3.1)$$

$$P_{w1} = \frac{P_{v1} \cdot G_1}{G_a} = \frac{25 \cdot 2,44}{2,65} = 23\% \quad (6.3.2)$$

$$P_{w2} = \frac{P_{v2} \cdot G_2}{G_a} = \frac{55 \cdot 2,71}{2,65} = 56\% \quad (6.3.3)$$

$$P_{w3} = \frac{P_{v3} \cdot G_3}{G_a} = \frac{20 \cdot 2,74}{2,65} = 21\% \quad (6.3.4)$$

Onde:

G_a = densidade real média dos agregados;

G_1 = densidade real do agregado graúdo de argila calcinada;

G_2 = densidade real do agregado miúdo de argila calcinada;

G_3 = densidade real da areia;

P_{v1} = percentual em volume do agregado graúdo de argila calcinada;

P_{v2} = percentual em volume do agregado miúdo de argila calcinada;

P_{v3} = percentual em volume da areia;

P_{w1} = percentual em peso do agregado graúdo de argila calcinada;

P_{w2} = percentual em peso do agregado miúdo de argila calcinada;

P_{w3} = percentual em peso da areia.

Com base nos resultados dos percentuais corrigidos a nova composição granulométrica do traço adotado está expressa na Tabela 6.8. Nota-se que a ponderação dessas densidades fez com que houvesse uma diminuição em 2% na

massa dos agregados graúdos (devido sua menor densidade) e o aumento de 1% na massa de cada agregado miúdo (argila calcinada e areia) na mistura pesquisada. Essa mistura foi enquadrada no traço médio adotado através da separação, por peneiramento, das frações especificadas para os agregados sintéticos mais a adição, sem peneiramento, da areia de rio conforme pode ser observado na Figura 6.4.

Tabela 6.8 – Granulometria corrigida da mistura adotada nessa pesquisa e limites da faixa para agregados sintéticos de argila do LDH.

# (pol.)	AGC graúdo 23%		AGC miúdo 56%		Areia 21%		Faixa LDH (%)	Traço Adotado (%)
3/4"	100,00	23,00	100,00	56,00	100,00	21,00	100	100,00
1/2"	64,00	14,72	100,00	56,00	100,00	21,00	80-100	91,72
3/8"	32,00	7,36	100,00	56,00	100,00	21,00	-	84,36
n.º 4	-	-	85,00	47,60	100,00	21,00	55-80	68,60
n.º 10	-	-	64,00	35,84	100,00	21,00	45-75	56,84
n.º 40	-	-	33,00	18,48	99,52	20,90	20-55	39,38
n.º 80	-	-	26,00	14,56	21,00	4,41	11232	18,97
n.º 200	-	-	14,00	7,84	0,62	0,13	42095	7,97



a) mistura de agregados

b) separação dos agregados em frações

Figura 6.4 – Aspecto da montagem da mistura de agregados usadas na confecção dos corpos-de-prova de mistura asfáltica deste estudo (Foto do autor).

6.3.2 Teores de projeto

Inicialmente pensava-se em estabelecer os teores de projeto baseando-se nos valores preconizados pelo DNER para volume de vazios (entre 3 e 5%) e Relação Betume-Vazios (entre 75 e 82%). Entretanto verificou-se em algumas tentativas de moldagem que para atender esses parâmetros volumétricos o primeiro ponto da dosagem deveria iniciar em 9,5% de ligante o que, na prática, inviabilizaria economicamente o

desenvolvimento do projeto. Foi verificado durante a revisão bibliográfica que o volume de vazios das misturas estudadas pelo Departamento de Estradas da Louisiana com até 30% de agregados de argila expandida apresentou um sensível aumento do volume de vazios ficando entre 5 e 8%.

Diante do exposto optou-se por não estabelecer os teores a serem estudados na presente pesquisa baseando-se nos parâmetros volumétricos utilizados para misturas convencionais. Dessa maneira, não houve uma preocupação em determinar um “teor ótimo” conforme a prática corrente, mas sim em escolher um teor que fosse técnica e economicamente viável para a concepção deste tipo de mistura na região de estudo. Sendo assim o estudo da viabilidade técnica do traço a ser escolhido foi realizado através da verificação das propriedades e do comportamento mecânico em três teores distintos, sendo estes iguais a 7,5; 8,5 e 9,5% de ligante.

A princípio pode-se pensar que os teores escolhidos são muito elevados se comparados com os utilizados em misturas convencionais. Todavia deve-se ressaltar que uma mistura com agregados sintéticos de argila apresenta menor densidade em relação à convencional. Para exemplificar isto, foi moldado um corpo-de-prova com uma mistura convencional (caracterizada por Fritzen, 2004), contendo agregados de origem granítica, proveniente da usina da Concessionária Rio-Teresópolis cujo traço está enquadrado na faixa B do DNER. Essa mistura foi comparada com outro corpo-de-prova de mesmo volume moldado com o traço adotado nessa pesquisa e com o teor de 7,5% de ligante. Os resultados desta comparação estão disponíveis na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 – Comparação entre as relações de densidade e consumo de CAP entre uma mistura convencional e a mistura pesquisada.

Mistura	Peso seco (g)	Volume (cm³)	Densidade aparente	Consumo de CAP (g)	Teor de projeto (%)
Pesquisada	988,8	500,9	1,97	74,16	7,5
Convencional	1.198,0	500,9	2,39	65,89	5,5

Nota-se que enquanto são necessários 1198,0 g para moldar um corpo-de-prova com 500,9 cm³ na mistura convencional, no traço pesquisado contendo agregados calcinados e areia consegue-se o mesmo volume com 988,8 g de massa asfáltica no teor de 7,5% de ligante. Isso significa dizer que a mistura pesquisada é 17,5% mais leve que mistura convencional e que para consumirem a mesma quantidade de ligante

a mistura convencional deveria estar no teor de 6,20% que pode ser considerado como perfeitamente aceitável.

6.3.3 Temperaturas de trabalho

Com base nos dados de viscosidade contidos na

Tabela 6.5 foi gerada a Figura 6.5 que mostra a relação viscosidade x Temperatura do ligante usado nesse estudo. Segundo a diretriz técnica DT-P 18/91 do DNER a faixa de viscosidade para o CAP ser misturado a um agregado é de 75 a 150 SSF, sendo a ideal de 75 a 95 SSF. A diretriz ainda faz as seguintes recomendações:

- i. Não podem ser feitas misturas a temperaturas inferiores à 107°C e nem superiores a 177°C;
- ii. Os agregados devem ser aquecidos a temperaturas de 5°C a 10°C, acima da temperatura do CAP, sendo que ambos jamais podem ultrapassar a temperatura de 177°C;
- iii. A temperatura de compactação é aquela em que o ligante apresenta uma viscosidade de 140 SSF.

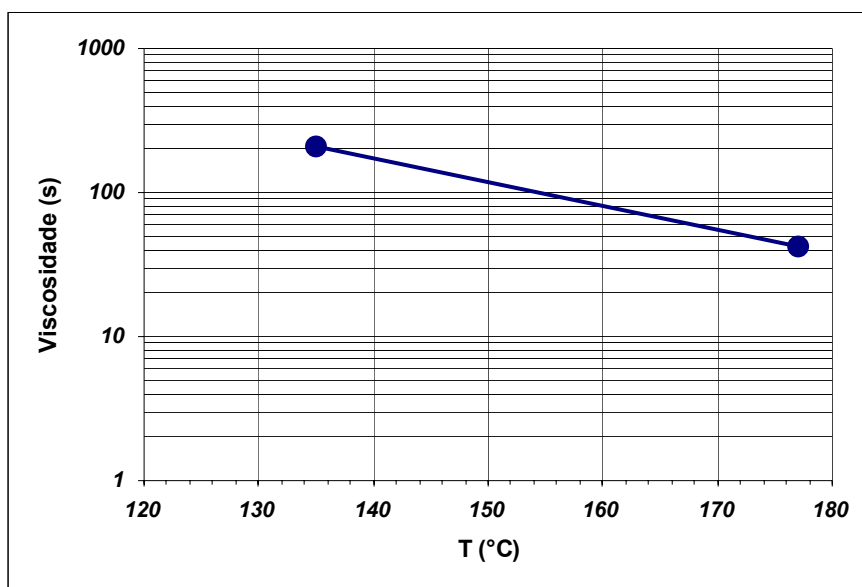


Figura 6.5 – Relação viscosidade versus temperatura do CAP usado neste estudo.

Com base nos dados da Figura 6.5 e na diretriz técnica DT-P 18/91 obteve-se as seguintes temperaturas de trabalho dessa pesquisa:

- ⇒ 158°C para o CAP-20;
- ⇒ 168°C para os agregados para mistura e
- ⇒ 148°C para a compactação.

Segundo a norma da AASHTO R-30/02 (Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt) pode-se prever com mais acurácia a performance e as propriedades de uma mistura asfáltica a quente através do condicionamento térmico das mesmas antes da compactação. Uma das maneiras descrita na norma consiste em condicionar a mistura na temperatura de compactação $\pm 3^{\circ}\text{C}$ por $2\text{h} \pm 5\text{min}$. Tal procedimento é usado para a concepção do projeto volumétrico da mistura e visa simular os efeitos da absorção do ligante pelos agregados. Esta norma ainda cita outros tipos de condicionamento que simulam o envelhecimento da mistura a curto e longo prazo, ou seja, é simulado em laboratório o envelhecimento da mistura na usinagem e durante a construção (curto prazo) e de sete a dez anos após a execução dos serviços (longo prazo).

No presente estudo optou-se por realizar apenas o condicionamento para projetos volumétricos, que como já citado visa simular a absorção do ligante na mistura. Devido a pouca quantidade de agregados produzidos não houve a possibilidade de simular os outros tipos de condicionamentos térmicos, entretanto entende-se que seja de considerável importância o estudo desses outros tipos de condicionamento na verificação do desempenho deste tipo de mistura em estudos futuros.

6.3.4 Procedimento adotado na usinagem e moldagem dos corpos-de-prova

Devido a menor densidade dos agregados sintéticos de argila os corpos-de-prova foram moldados com 1000g de mistura pronta e condicionada. Basicamente a usinagem e moldagem dos corpos-de-prova consistiu em :

- i. montar misturas de agregados nas proporções especificadas na Tabela 6.10;
- ii. aquecer o ligante e os agregados separadamente, em estufas apropriadas e nas temperaturas especificadas no item 6.3.2;
- iii. adicionar o ligante e os agregados em um tacho previamente aquecido e misturá-los durante dois ou três minutos sobre uma placa aquecedora, como mostra a Figura 6.6;
- iv. realizar o condicionamento térmico por $2h \pm 5 \text{ min}$ em estufa apropriada, na temperatura de compactação $\pm 3^{\circ}\text{C}$;
- v. realizar a compactação em compactador Marshall automático duplo com 75 golpes em cada face.

Os corpos-de-prova desta pesquisa apresentaram um aspecto homogêneo e compacto, entretanto foi notória a falta de recobrimento nos agregados graúdos, mesmo quando moldados com 9,5% de asfalto. A Figura 6.7 mostra a aparência de alguns corpos-de-prova desta pesquisa com 7,5% de ligante.

Tabela 6.10 – Proporções de materiais adotados na fabricação dos corpos-de-prova desta pesquisa.

Materiais	Teor (%)	7,5	8,5	9,5
	Granul.(%)	(g)	(g)	(g)
AGC 3/4-1/2	8,3	76,6	75,8	74,9
AGC 1/2 - 3/8	7,4	68,1	67,3	66,6
AGC 3/8 - N°4	15,8	145,8	144,2	142,6
AGC N° 4 - N° 10	11,8	108,8	107,6	106,4
AGC N° 10 - N° 40	17,4	160,6	158,8	157,1
AGC N° 40 - N° 80	3,9	36,3	35,9	35,5
AGC N° 80 - N° 200	6,7	62,2	61,5	60,8
Filer de AGC	7,8	72,5	71,7	71,0
AREIA	21,0	194,3	192,2	190,1
CAP 20	-	75,0	85,0	95,0
Total (g)		1000	1000	1000



Figura 6.6 –Etapas da mistura do concreto asfáltico desta pesquisa (Foto do autor).



Figura 6.7 – Exemplo de corpos-de-prova moldados com 7,5% de CAP-20 e agregados calcinados nesta pesquisa (Foto do autor).

6.4 Características físicas da mistura

6.4.1 Densidade específica máxima medida – DMM

A determinação da máxima densidade de uma mistura asfáltica é necessária no cálculo do volume de vazios de ar na mistura compactada, do teor de asfalto efetivo e da quantidade de ligante absorvido pelo agregado.

No Brasil a Densidade Máxima Teórica (DMT) de uma mistura asfáltica é tradicionalmente obtida pela formulação mostrada a seguir.

$$DMT = \frac{100}{\frac{P_{CAP}}{D_{CAP}} + \frac{P_1}{D_1} + \frac{P_2}{D_2} + \dots + \frac{P_n}{D_n}} \quad (6.4.1)$$

Onde:

P_{CAP} , P_1 , P_2 e P_n = porcentagens das massas dos materiais que compõem a mistura;

D_{CAP} , D_1 , D_2 e D_n = Massas específicas (densidades reais) dos materiais.

Marques, Motta e Castelo Branco (2004) constam que o valor da DMT obtido pela equação (6.4.1) leva em consideração os componentes da mistura asfáltica na proporção que eles ocupam dentro da mesma porém de forma separada, ou seja, não é considerada a penetração do ligante nos agregados, o que leva a uma limitação do seu uso sendo aplicável a misturas contendo agregados com baixa absorção de ligante.

Segundo os autores o cálculo dos parâmetros volumétricos em misturas asfálticas depende essencialmente da taxa de ligante absorvido pelos agregados, ou seja, se o cimento asfáltico não é absorvido pelo agregado, o cálculo da DMT é relativamente direto e a massa específica aparente do agregado pode ser usada para calcular o volume de agregado na equação (6.4.1), se essa absorção é idêntica à absorção de água, a densidade real pode ser usada para calcular o volume de agregados porém, se a absorção do asfalto pelo agregado é parcial os cálculos são menos diretos.

No presente estudo pôde-se observar que a absorção de ligante é parcial o que exigiu a adoção de um método diferente do tradicional na determinação da densidade máxima da mistura. Na Figura 6.8 nota-se que o envelhecimento (condicionamento térmico) proporcionou o descobrimento de boa parte dos agregados. Ao quebrar alguns grãos, notou-se que o ligante penetrou nos mesmos descartando-se assim a hipótese de descobrimento por escoamento da película.

Para considerar a interpenetração do ligante nos agregados no presente estudo, a DMT foi obtida experimentalmente em laboratório seguindo os procedimentos do método ASTM D-2041. Nessa circunstância é mais conveniente usar o termo Densidade Máxima Medida (DMM) ao invés de Densidade Máxima Teórica (DMT).



a) antes do envelhecimento



b) após o envelhecimento

Figura 6.8 – Aspecto da mistura asfáltica com agregados calcinados antes e após o condicionamento térmico (Fotos do autor).

Alguns autores ainda sugerem para a situação em que a absorção de ligante é parcial, a substituição da densidade real pela densidade efetiva na equação (6.4.1). São sugeridas as seguintes equações no cálculo da densidade efetiva:

$$D_{ef} = \frac{D_r + D_a}{2}; \text{ (Pinto, 1996);} \quad (6.4.2)$$

$$D_{ef} = D_r + 0,8.(D_r - D_a); \text{ (SUPERPAVE)} \quad (6.4.3)$$

Onde:

D_{ef} = densidade efetiva;

D_r = densidade real e

D_a = densidade aparente.

O Departamento de Estradas da Louisiana sugere, para misturas contendo uma parte de agregado gráudo de argila expandida e os demais sendo convencionais, que no cálculo da máxima densidade sejam usadas densidades efetivas para os agregados de argila e densidades reais para os demais agregados. Esse departamento sugere que a densidade efetiva dos agregados de argila seja obtida através do método TR – 312/69.

Verifica-se que os limites adotados como critério de projeto para a determinação do volume de vazios e os vazios preenchidos com ligante, dependem fundamentalmente, do método selecionado para a determinação da densidade teórica da mistura. Se diferentes métodos podem ser usados, portanto diferentes valores de vazios podem ser obtidos para um mesmo corpo-de-prova. Todavia sugere-se que sejam utilizados métodos que mais se aproximem da situação de campo.

O método selecionado para o cálculo da DMM, o ASTM D-2041, consiste em :

- i. Preparar uma quantidade de mistura de maneira idêntica à utilizada na moldagem dos corpos-de-prova (descrita no item 6.3.4), porém sem compactá-la;
- ii. Desagregar manualmente a mistura pronta e envelhecida até a mesma atingir 25°C, não permitindo a formação de grumos com diâmetro superior a 6,0mm.
- iii. Pesar a mistura na condição solta e colocá-la em um recipiente para aplicação de vácuo (Massa A);
- iv. Adicionar à amostra uma quantidade suficiente de água a 25°C de forma que a mesma fique completamente submersa.
- v. Aplicar gradualmente o vácuo no recipiente até atingir uma pressão residual de 4KPa ou menos e então mantê-la por 15 ± 2 min. Durante este processo deve-se acoplar o recipiente a um agitador de maneira a facilitar a expulsão das bolhas de ar;
- vi. Ao final do período de vácuo, este deve ser gradualmente aliviado;
- vii. Adicionar uma quantidade suficiente de água a 25°C para completar o recipiente e realizar a pesagem do conjunto (Massa B);
- viii. Esvaziar o recipiente e depois adicionar uma quantidade suficiente de água a 25°C para encher o recipiente e realizar a pesagem do conjunto (Massa C);
- ix. Obter a DMM pela equação seguinte:

$$DMM = \frac{A}{A - B + C} \quad (6.4.4)$$

Durante a aplicação do vácuo na mistura com teor de 7,5% pôde-se observar que ocorria a penetração de água no interior dos agregados devido à falta do recobrimento de ligante, citado anteriormente. Nessas circunstâncias o método sugere a realização de um procedimento suplementar, que consiste em substituir a massa seca (A) pela massa de mistura na condição saturada com superfície seca (A'). Esse valor é obtido da seguinte maneira:

- i. Após a determinação da massa B drenar toda a água do recipiente. Essa drenagem pode ser realizada com o auxílio de uma peneira de 75 µm a fim de evitar perda de material;
- ii. Espalhar a mistura sobre uma bandeja plana com superfície não absorvente e colocá-la em frente a um jato de ar (ventilador);
- iii. Revirar a mistura intermitentemente para garantir a secagem uniforme das partículas;
- iv. Pesar o conjunto em intervalos de 15 minutos. Quando a perda de massa for inferior a 0,05% a amostra pode ser considerada saturada com superfície seca;
- v. Subtrair o peso da bandeja e anotar a massa da mistura nesta condição (massa A');
- vi. Substituir a massa A por A' e determinar a DMM na equação (6.4.4).

A Figura 6.9 mostra uma visão geral do equipamento utilizado para a aplicação do vácuo na mistura asfáltica com agregado de argila calcinada.

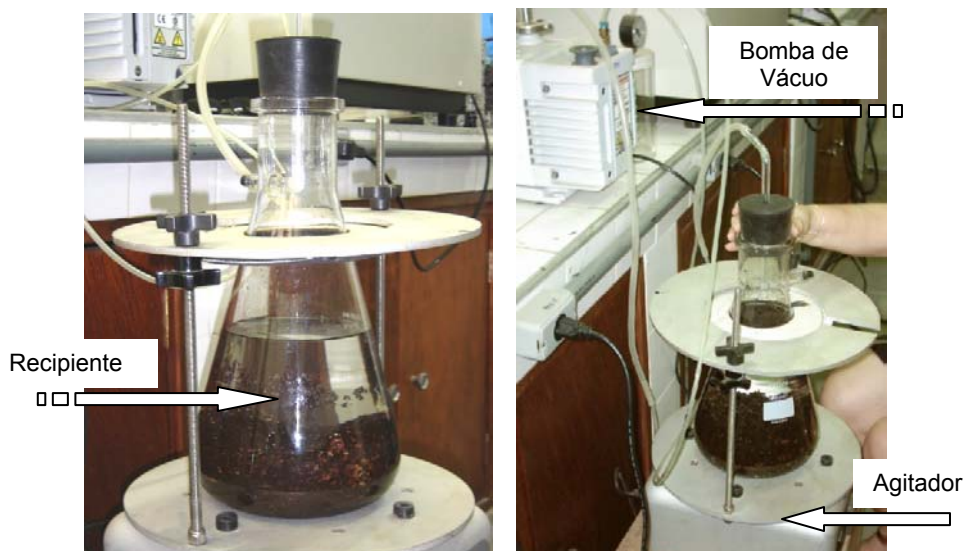


Figura 6.9 – Equipamento utilizado nesse estudo para a determinação da DMM (Fotos do autor).

Marques (2001) explica que normalmente a DMM é obtida para um teor de asfalto e calculada para os demais teores. Segundo este autor a densidade efetiva de um agregado é função do valor da DMM da mistura a um teor de ligante, portanto pode-se calcular a DMM da mistura a outro teor de ligante visto que, para efeito prático a densidade efetiva dos agregados é constante, pois a absorção de ligante não varia apreciavelmente com a variação no teor de asfalto. Desta maneira a DMM para outros teores pode ser obtida como se segue:

- i. Obtém-se a DMM para um determinado teor e então é calculada a densidade efetiva da mistura pela equação (6.4.5);
- ii. Com o valor da densidade efetiva da mistura de agregados é calculado o valor da DMM para outro teor de ligante pela equação (6.4.6).

$$D_{ef} = \frac{1 - P_b}{\frac{1}{DMM} + \frac{P_b}{D_b}} \quad (6.4.5)$$

$$DMM_t = \frac{1}{\frac{1 - P_b}{D_{ef}} + \frac{P_b}{D_b}} \quad (6.4.6)$$

Onde:

D_{ef} = densidade efetiva da mistura de agregados;

DMM = densidade máxima medida obtida para um determinado teor através do método ASTM D-2041;

P_b = percentual de cimento asfáltico;

D_b = densidade específica do cimento asfáltico;

DMMt = densidade máxima medida para outro teor de asfalto.

Para a determinação das DMMs deste estudo foram preparadas duas amostras para o teor 7,5% de ligante, com a massa de 1500g. O valor considerado foi obtido pela média aritmética dos resultados obtidos com os ensaios dessas duas amostras. As DMMs dos demais teores foram calculados pelas equações (6.4.5) e (6.4.6). Os valores encontrados para as DMMs e densidade efetiva da mistura estudada encontram-se na Tabela 6.11.

Tabela 6.11 – Valores da densidade efetiva (D_e) e das densidades máximas medidas (DMM) obtidos nesta pesquisa.

De	Teor de CAP		
	7,5%	8,5%	9,5%
2,54	DMM		
	2,29	2,26	2,23

6.4.2 Absorção e teores de asfalto efetivo na mistura

Devido a mudança de aspecto da mistura após o condicionamento térmico, ilustrado na Figura 6.8, optou-se em realizar a verificação da taxa de asfalto absorvido pela mistura de agregados bem como o teor de asfalto efetivo para os três teores de projeto.

Segundo Marques (2001) a porcentagem de asfalto absorvido numa mistura pode ser

determinada pela seguinte equação:

$$P_{ab} = 100 D_b \frac{D_{ef} - D_{ag}}{D_{ag} \cdot D_{ef}} \quad (6.4.7)$$

Onde:

P_{ab} = asfalto absorvido em relação à percentagem em peso do agregado;

D_{ef} = densidade efetiva da mistura de agregados;

D_{ag} = densidade aparente da mistura de agregados;

D_b = densidade do cimento asfáltico.

A D_{ap} foi obtida a partir da seguinte equação:

$$D_{ag} = \frac{100}{\frac{P_{W_1}}{D_1} + \frac{P_{W_2}}{D_2} + \frac{P_{W_3}}{D_3}} = \frac{100}{\frac{23}{2,16} + \frac{56}{2,40} + \frac{21}{2,62}} = 2,38 \quad (6.4.8)$$

Onde:

D_1 = densidade aparente do agregado gráudo de argila calcinada

D_2 = densidade aparente do agregado miúdo de argila calcinada

D_3 = densidade aparente da areia;

P_{W_1} = percentual em peso do agregado gráudo de argila calcinada;

P_{W_2} = percentual em peso do agregado miúdo de argila calcinada;

P_{W_3} = percentual em peso da areia.

Usando os valores da D_{ef} indicada na Tabela 6.11, D_b indicada na

Tabela 6.5 e D_{ap} calculado pela equação (6.4.9) foi determinada a porcentagem de asfalto absorvido como se segue:

$$P_{ab} = 100.1,03 \frac{2,54 - 2,38}{2,54.2,38} = 2,73\% \quad (6.4.9)$$

Como era de se esperar pode-se constatar que parte do ligante que deveria estar sendo utilizado para impermeabilizar e promover a ligação dos agregados foi absorvido pela mistura de agregados. O teor de absorção encontrado é alto se comparado à variação admissível em relação ao teor de ligante em campo estabelecido pelo DNER para agregados convencionais, que é de $\pm 0,3\%$, e baixo se comparado ao valor de absorção d'água encontrado para o agregado calcinado a 1050°C que foi da ordem de 7% .

A porção de asfalto que recobre a parte externa dos agregados, portanto o teor de ligante responsável pelo desempenho da mistura asfáltica é conhecido como teor de asfalto efetivo (P_{ef}) (Marques, 2001). Esse teor foi obtido para a mistura estudada a partir da seguinte equação:

$$P_{ef} = P_b - \frac{P_{ab}}{100} \cdot (100 - P_b) \quad (6.4.10)$$

Os resultados encontrados para os três teores de asfalto estudados encontram-se na Figura 6.10.

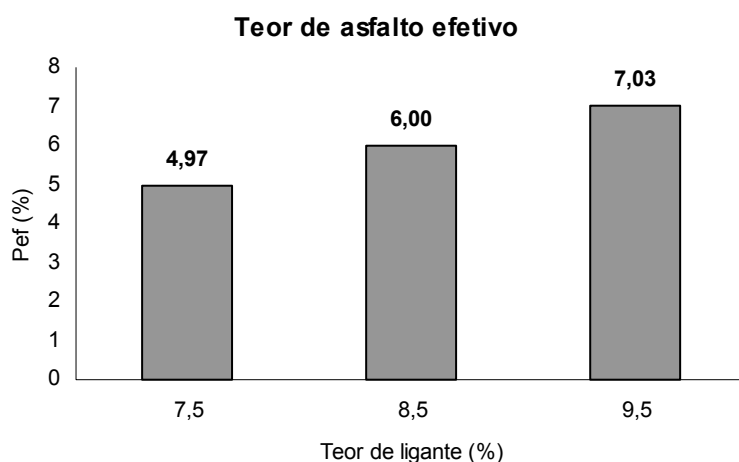


Figura 6.10 – Teores de asfalto efetivo para a mistura com agregado de argila calcinada e areia de rio.

6.4.3 Propriedades volumétricas

As dimensões dos corpos-de-prova foram estimadas através da média aritmética de quatro medidas do diâmetro e quatro medidas da altura.

A densidade aparente dos corpos-de-prova foi estimada pesando-se primeiramente os mesmos secos, depois submersos e por fim na condição úmida com superfície seca.

Os valores obtidos foram aplicados na seguinte equação:

$$D_{ap} = \frac{P_s}{P_h + P_i} \quad (6.4.11)$$

Onde:

D_{ap} = densidade aparente do corpo-de-prova;

P_s = peso do corpo-de-prova seco ao ar;

P_i = peso do corpo-de-prova após a imersão por 3 minutos;

P_h = peso do corpo-de-prova após a imersão e seco superficialmente.

As propriedades volumétricas porcentagem de vazios de ar na mistura compactada (V_a), vazios cheios de betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM) e relação betume-vazio (RBV) foram calculadas com as seguintes equações:

$$V_a = 100 \cdot \frac{DMM - D_{ap}}{DMM} \quad (6.4.12)$$

$$VCB = \frac{D_{ap} - P_b}{D_b} \quad (6.4.13)$$

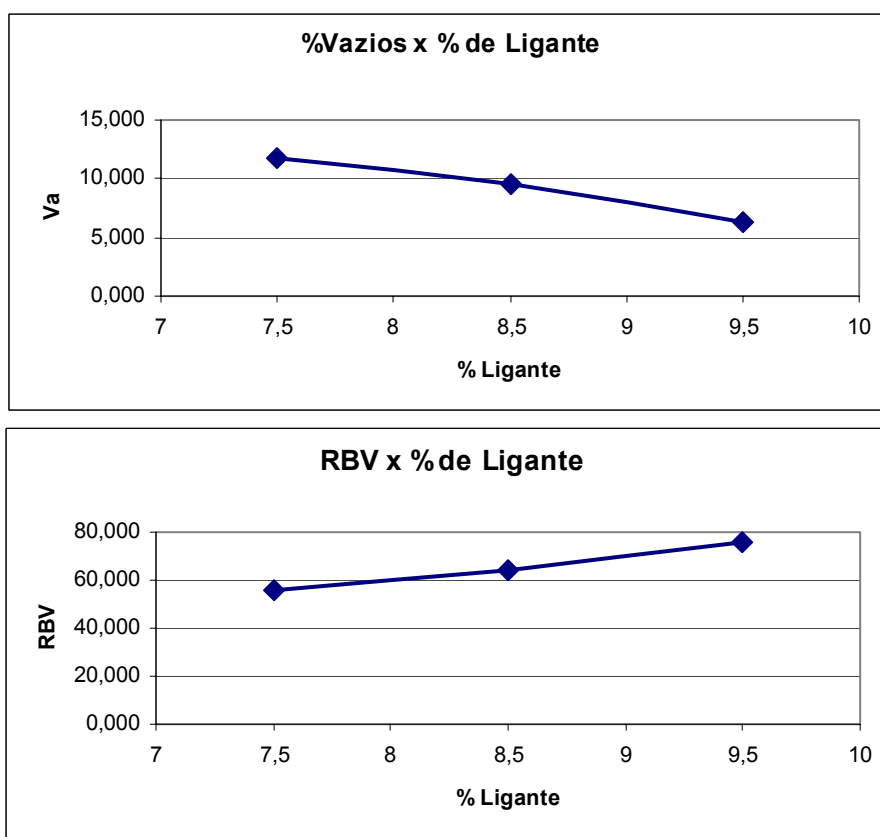
$$VAM = V_a + VCB \quad (6.4.14)$$

$$RBV = 100 \cdot \frac{VCB}{VAM} \quad (6.4.15)$$

Para a determinação dessas propriedades foram moldados nove corpos-de-prova sendo três em cada teor. O resultados obtido são mostrados na Tabela 6.12 e representam a média dos resultados encontrados em cada teor de asfalto. Esses valores foram também plotados na Figura 6.11 para permitir melhor visualização.

Tabela 6.12 – Propriedades volumétricas da mistura asfáltica com agregados calcinados desta pesquisa.

Teor de ligante	7,5%	8,5%	9,5%
Densidade aparente (D_{ap})	2,02	2,04	2,09
% Vazios (V_a)	11,79	9,59	6,28
Vazios cheios de Betume (VCB)	14,71	16,86	19,28
Vazios do Agregado Mineral (VAM)	26,50	26,45	25,55
Relação Betume - Vazios (RBV)	55,51	63,75	75,43



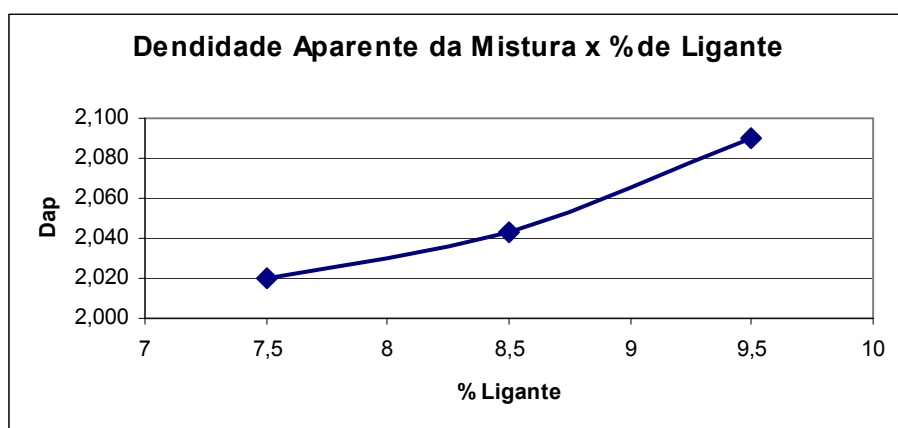


Figura 6.11 – Propriedades volumétricas da mistura asfáltica com agregados calcinados desta pesquisa.

6.5 Ensaios para a determinação do comportamento mecânico da mistura experimental

A avaliação do comportamento mecânico da mistura experimental foi realizada através de ensaios de compressão diametral em corpos-de-prova cilíndricos com dimensões em torno de 10cm de diâmetro e 6cm de altura, moldados em laboratório de acordo com os procedimentos descritos no item 6.3.4.

Os ensaios de compressão diametral foram realizados no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, setor de pavimentos, na temperatura de 25°C, a fim de determinar o módulo de resiliência, a resistência à tração estática e a vida de fadiga da mistura asfáltica pesquisada.

Foram também comparados os resultados obtidos no presente estudo com os obtidos em uma mistura convencional e em outra que continha agregado calcinado, porém calcinado e usado em outras circunstâncias.

A mistura asfáltica convencional escolhida foi caracterizada por Magalhães (2004). Trata-se de um CBUQ enquadrado na faixa B do DNER e composto por: brita 1 (21,7%), brita 0 (24,6%), pó-de-pedra (45,8%), cimento portland (2,8%) e CAP-20 (5,5%).

A mistura asfáltica com agregados de argila calcina escolhida foi caracterizada por Batista (2004). Trata-se de um CBUQ enquadrado na faixa B do DNER. Essa mistura foi composta por 95% de agregados sintéticos de argila calcinada, 5% de cimento portland (filer) e 9,7% de CAP-20.

Os agregados produzidos e caracterizados por Batista (2004) receberam tratamento semelhante de conformação da massa cerâmica aos usados no presente estudo, ou seja, foram moldados por extrusão, cortados em espessuras de 1 a 2 cm, secaram ao ar e em estufa. Esses agregados se diferenciaram basicamente na forma de calcinação (que consistiu em colocá-los em fornos previamente aquecidos e calciná-los a 900°C por 30 minutos) e na matéria-prima utilizada.

A mistura asfáltica convencional caracterizada por Magalhães (2004) foi identificada como “MCC” (Mistura comparativa convencional) e a caracterizada por Batista (2004) como “MCNC” (Mistura comparativa não convencional).

6.5.1 Módulo de resiliência

A norma DNER ME-133/94 define o módulo de resiliência de uma mistura asfáltica como a relação entre a tensão de tração (σ_t), aplicada repetidamente sobre o plano diametral vertical de um corpo-de-prova cilíndrico e a deformação específica resiliente (ϵ_t) correspondente à tensão aplicada, numa dada temperatura, Equação (6.5.1).

$$MR = \left(\frac{\sigma_t}{\epsilon_t} \right)_T \quad (6.5.1)$$

O ensaio de módulo visa simular as condições encontradas no campo onde os materiais que constituem o revestimento asfáltico são submetidos a carregamentos de curta duração originados pela ação do tráfego. Para simular essas condições em laboratório aplicam-se cargas repetidas, geradas por um dispositivo pneumático, num corpo-de-prova cilíndrico através de frisos curvos de 1,27cm de corda, com duração 0,1s ocorrendo em seguida um repouso de 0,9s. A deformação específica resiliente, ou recuperável, é medida por um LVDT (Linear Variable Differential Transformer) acoplado a um sistema de aquisição de dados e posicionado no plano

perpendicular ao sentido do carregamento. Dessa forma consegue-se avaliar o comportamento da mistura na zona onde ocorrem as deformações específicas de tração, responsáveis pela fadiga da camada (Mourão, 2003). A Figura 6.12 mostra o equipamento usado nessa pesquisa para a determinação dos módulos de resiliência e fadiga da mistura estudada.

Para a realização desse ensaio foram moldados inicialmente três corpos-de-prova para cada um dos teores estudados entretanto, devido à grande dispersão constatada nos teores de 8,5% e 9,5% foram moldados mais quatro corpos-de-prova, sendo dois para cada teor. Os resultados considerados para o módulo de resiliência correspondem à média aritmética obtida em cada teor, mostrado na Tabela 6.13. Na Figura 6.13 é feita uma comparação entre os resultados da mistura pesquisada com os obtidos nas misturas MCC e MCNC. Para melhor visualização deste e de outros resultados comparativos optou-se por denominar a mistura estudada com 7,5% de CAP-20 de “M1”, com 8,5% de “M2” e com 9,5% de “M3”.



Figura 6.12 - Equipamento usado nesta pesquisa para o ensaio de Módulo de Resiliência (MR) de misturas asfálticas (Foto do autor).

Os valores encontrados para a mistura estudada foram satisfatórios. Nota-se que o módulo praticamente não variou com o aumento do teor de ligante. Vale ressaltar que apenas a mistura MCNC não foi submetida ao envelhecimento de curto prazo (condicionamento de 2h na temperatura de compactação), fato que influencia nas propriedades mecânicas da mistura e conseqüentemente explica pelo menos grande parte da diferença de valores desta com as demais misturas.

Tabela 6.13 – Valores do MR para a mistura pesquisada					
Mistura	Nº do c.p. Lab.	Proj	MR (MPa)	Média	% de CAP
M1	6515	1	4545	4373	7,5
	6525	2	4898		
	6572	3	3676		
M2	6516	4	5002	4401	8,5
	6517	5	6081		
	6571	6	3428		
	6617*	10	4267		
	6619*	11	3227		
M3	6518 **	7	7340	4129	9,5
	6573	8	3437		
	6574	9	3961		
	6618*	12	5337		
	6620*	13	3779		

*Corpos-de-prova adicionais, ** Não considerado no valor médio

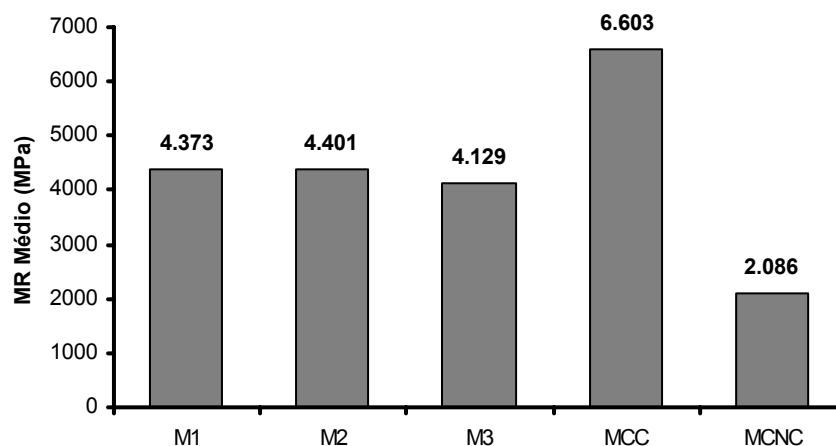


Figura 6.13 – Média dos valores do módulo de resiliência a 25°C para a mistura estudada em três teores de ligante e misturas comparativas MCC e MCNC.

O que foi observado no ensaio de MR para a mistura estudada é que existe uma zona onde a dispersão dos valores é maior. Sugere-se que em futuros trabalhos sejam verificados quais os fatores causadores dessa dispersão. Nota-se na Tabela 6.13 que para o teor de 9,5% a variação dos valores encontrados foi superior a 50% por esse motivo o corpo-de-prova 6518 foi desconsiderado no cálculo do módulo médio. Batista (2004) também encontrou diferenças significativas nos resultados com a mistura MCNC. Acredita-se que uma das possíveis causas dessa dispersão esteja relacionada com a heterogeneidade dos agregados e com a viscosidade do ligante na temperatura de mistura, visto que quanto mais heterogêneo for o agregado e menos viscoso for o ligante maior será a variação da absorção e conseqüentemente do teor efetivo de

asfalto.

6.5.2 Resistência à tração estática

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) ou tração indireta foi desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro, em 1943, com o objetivo de avaliar a resistência à tração em corpos-de-prova de concreto de cimento portland quando submetidos a um carregamento estático. Esse ensaio veio posteriormente a ser aplicado no estudo de misturas asfálticas.

A resistência à tração estática da mistura estudada foi determinada através de uma prensa Marshall adaptada (Figura 6.14), conforme a norma NBR – 15087/04. Para otimizar os ensaios a RT foi determinada nos mesmos corpos-de-prova utilizados no ensaio de módulo e a temperatura de 25°C.



Figura 6.14 – Equipamento usado nesta pesquisa no ensaio de resistência à tração indireta (RT) (Foto do autor).

O ensaio consiste em:

- i. Determinar a altura (H) (média de quatro medições com paquímetro) e o

diâmetro (D) (média de três medições com paquímetro) do corpo-de-prova;

- ii. Submetê-lo a um condicionamento em estufa ou câmara de resfriamento, por no mínimo duas horas de modo a colocá-lo na temperatura específica para o ensaio (25°C neste caso);
- iii. Colocá-lo entre os dois frisos metálicos do modo que os frisos fiquem posicionados ao longo das geratrizes de apoio superior e inferior;
- iv. Ajustar os pratos da prensa para manter a posição do corpo-de-prova;
- v. Aplicar a carga progressivamente ($0,80 \pm 0,1\text{mm/s}$) até que ocorra a ruptura do corpo-de-prova;
- vi. Realizar a leitura no extensômetro (L);
- vii. Multiplicar o valor da leitura pela constante do anel dinamométrico da prensa utilizada para obtenção da carga de ruptura (F).

O valor de RT é dado pela seguinte equação:

$$RT = \frac{2F}{\pi DH} \quad (6.5.2)$$

Onde:

F é dada em unidade de força;

D e H são dados em unidade de comprimento.

Os resultados obtidos para a mistura pesquisada com três teores de ligante bem como as relações MR/RT estão apresentadas na Tabela 6.13. Na Figura 6.13 podem ser observados os resultados obtidos nesse estudo e os obtidos com as misturas comparativas convencional (MCC) e com argila calcinada (MCNC).

Nota-se que não houve variação significativa no valor médio da resistência a tração com o aumento do teor de ligante. Como era de se esperar o corpo-de-prova 6518

apresentou um valor de RT muito diferente dos demais com mesmo teor, portanto esse valor foi desconsiderado no cálculo do valor médio.

A relação MR/RT permaneceu igual nos três teores indicando que a relação de flexibilidade e resistência à tração permaneceu inalterada com aumento do teor de ligante. Segundo Magalhães (2004) quanto menor esta relação, melhor o comportamento mecânico da mistura garantindo uma combinação de boa flexibilidade para uma certa resistência à tração.

Ressalte-se, novamente, que o valor de RT da mistura MCNC também reflete a influência do não condicionamento térmico desta mistura e que as outras tiveram.

Tabela 6.14 – Resistência a tração e relação MR/RT a 25°C para a mistura pesquisada

Mistura	Nº do c.p.		RT	RT (MPa) Média	Relação MR/RT	% de CAP
	Lab.	Proj.	(MPa)			
M1	6515	1	1,11	1,09	4.009	7,5
	6525	2	1,19			
	6572	3	0,98			
M2	6516	4	1,12	1,10	4.009	8,5
	6517	5	1,28			
	6571	6	1,03			
	6617*	10	1,08			
	6619*	11	1,02			
M3	6518 **	7	1,79	1,22	4.009	9,5
	6573	8	1,10			
	6574	9	1,24			
	6618*	12	1,33			
	6620*	13	1,20			

*Corpos-de-prova adicionais, ** Não considerado no valor médio

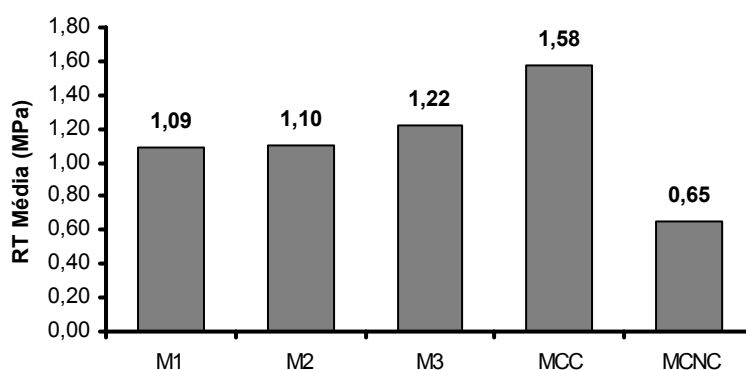


Figura 6.15 – Valores de Resistência à Tração indireta (RT) para mistura estudada em três teores e misturas comparativas MCC e MCNC

6.5.3 Determinação da vida de fadiga

A repetição de cargas das rodas dos veículos solicita à flexão a camada de concreto asfáltico do revestimento betuminoso. Iniciam-se trincas, geralmente na parte inferior do revestimento, que se propagam para cima até atingir a superfície (Medina, 1997). No ensaio de fadiga por compressão diametral, realizado a tensão controlada, são simuladas as solicitações de cargas de roda no revestimento betuminoso através de carregamentos aplicados em um corpo-de-prova por um sistema pneumático. Esse sistema pneumático gera uma tensão constante σ_t que é aplicada repetidamente no friso superior colocado na geratriz (Figura 6.16) do corpo-de-prova até a ruptura completa. É acoplado ao sistema pneumático um sistema de aquisição de dados que registra o número de repetições de carregamento necessárias à ruptura. A vida de fadiga a tensão controlada (N) é tida como número de solicitações de carga necessário para levar a amostra à ruptura (Medina, 1997).

A temperatura do ensaio adotada em geral é de $25^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. O equipamento usado na determinação do módulo de resiliência pode ser facilmente ajustado às condições necessárias para o ensaio de fadiga. Neste ensaio as cargas solicitantes verticais devem induzir tensões de 10% a 50% da resistência a tração estática.

A vida de fadiga pode ser expressa pelas equações (6.5.3) e (6.5.4). A Figura 6.16 mostra o posicionamento do corpo-de-prova para a realização do ensaio na prensa de compressão diametral do laboratório de ensaios dinâmicos da COPPE.

$$N = K_1 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_1} \quad (6.5.3)$$

$$N = K_2 \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^{n_2} \quad (6.5.4)$$

Onde:

N = vida de fadiga em número de solicitações

ε = deformação específica resiliente;

$\Delta\sigma$ = diferença entre as tensões de compressão e tração no centro da amostra;

K, n = constantes determinadas a partir dos resultados de laboratório.



Figura 6.16 – Posicionamento do corpo-de-prova para a realização do ensaio de fadiga (Foto do autor).

Os resultados dos ensaios de MR e RT indicaram que o aumento no teor de ligante não influenciou significativamente na melhoria do comportamento mecânico da mistura pesquisada. Portanto, em termos de resistência mecânica, o teor de 7,5% foi o que apresentou melhor relação custo-benefício. Por isso e visando otimizar os ensaios, em função da quantidade de agregados disponíveis, optou-se por realizar o ensaio de fadiga nessa pesquisa apenas no teor de 7,5%.

Os ensaios foram realizados para tensões de tração equivalentes de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% do maior valor da RT encontrada para o teor especificado, temperatura de 25°C e frequência de 1Hz, com tempo de carregamento de 0,1s e de descarregamento de 0,9s.

Foram moldados 12 corpos-de-prova no compactador Marshall com 75 golpes em cada face. Os resultados obtidos neste estudo estão apresentados na Tabela 6.15, Figura 6.17 e Figura 6.18. Na Tabela 6.15 são apresentados, a título comparativo, os resultados obtidos por Magalhães (2004) e Batista (2004) nas misturas de referência já citadas, utilizando o mesmo procedimento de ensaio de fadiga.

Tabela 6.15 – Constantes ($\Delta\sigma$ em Mpa) do ensaio de fadiga a tensão controlada nas misturas M1, MCC e MCNC.

Mistura	$N = K_1 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_1}$			$N = K_2 \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^{n_2}$		
	K_1	n_1	R^2	K_2	n_2	R^2
M1 (Este estudo)	$2,3 \times 10^3$	2,85	0,92	2×10^{-9}	2,85	0,92
MCC (Magalhães, 2004)	$3,7 \times 10^4$	4,52	0,99	4×10^{-16}	4,52	0,99
MCNC (Batista, 2004)	$5,4 \times 10^2$	2,89	0,96	3×10^{-9}	2,89	0,96

Percebe-se que para baixas tensões a mistura M1 apresentou uma maior dispersão dos resultados, por isso foram ensaiados três corpos-de-prova com o carregamento equivalente a 10% da RT.

A análise comparativa entre as curvas de fadiga de diversas misturas só pode ser desenvolvida nos casos em que as misturas tenham rigidez, ou especificamente módulos de resiliência, semelhantes. Isto se deve ao fato de que misturas mais rígidas “absorvem” muito mais tensões, gerando tensões de tração também maiores, não sendo possível neste caso simplesmente comparar a vida de fadiga de cada mistura para um mesmo valor de $\Delta\sigma$ (Magalhães, 2004). Portanto para saber se a mistura M1 irá apresentar maior ou menor vida de fadiga em relação às misturas comparativas MCC e MCNC o ideal é fazer um projeto mecanístico e realizar essa verificação para uma mesma estrutura de pavimento, a partir das tensões geradas nessa estrutura utilizando-se os dados de módulo de resiliência de cada um dos materiais.

Apesar de não poder comparar a vida de fadiga dessas misturas, nota-se na

Tabela 6.15 através do coeficiente “n” que as curvas de fadiga das misturas com agregados de argila (M1 e MCNC) são menos sensíveis a variação de diferença de tensões em relação à mistura convencional de comparação neste caso, o que é um fato positivo.

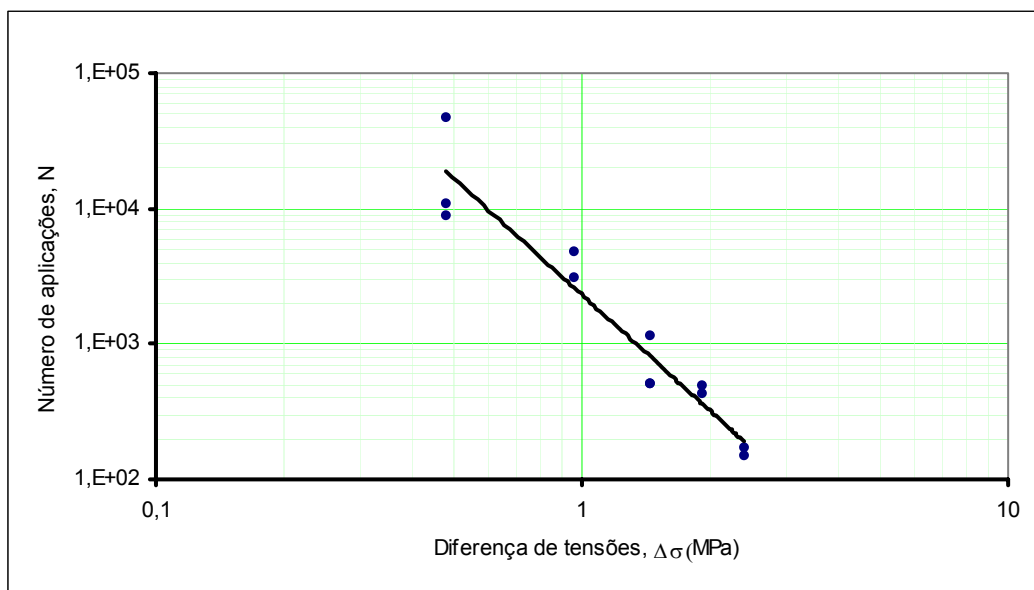


Figura 6.17 – Curva de fadiga da mistura M1 (7,5% de CAP-20)em função de diferença de tensões.

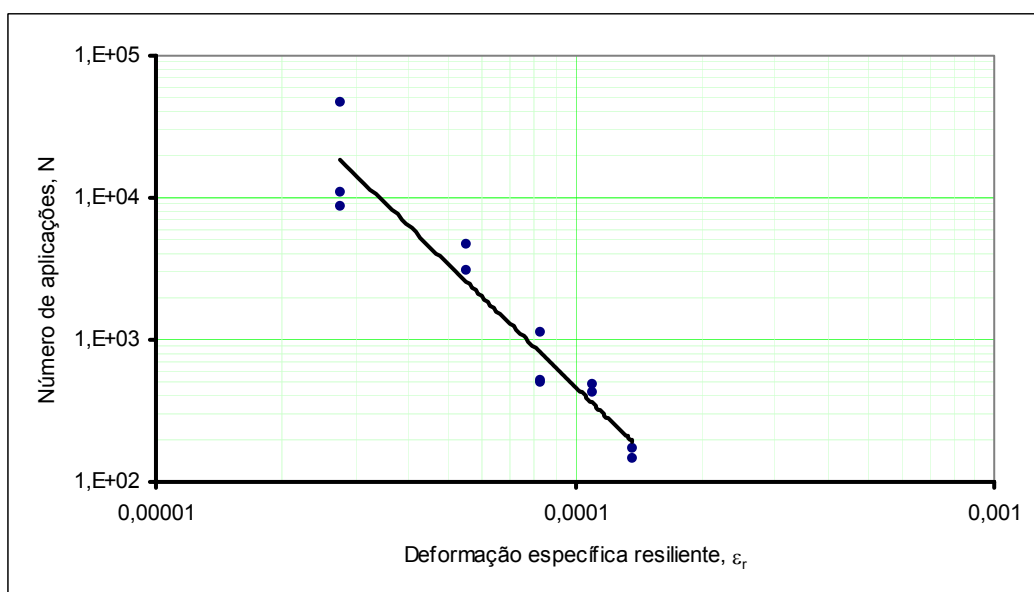


Figura 6.18 – Curva de fadiga da mistura M1 (7,5% de CAP-20)em função de deformação específica resiliente.

6.6 Influência da água na durabilidade da mistura

Através estudo do comportamento mecânico pôde-se verificar que mesmo com elevados volumes de vazios, a mistura M1 (teor de 7,5% de ligante) apresentou resistência mecânica satisfatória. Entretanto, para considerar esta mistura

tecnicamente viável, ainda seria necessário responder os seguintes questionamentos:

1. que consequências danosas o elevado percentual de vazios poderia trazer ao pavimento?
2. A utilização do DOPE torna a adesividade dos agregados suficientemente satisfatória?

A princípio imaginou-se que um volume de vazios elevado originaria uma mistura muito permeável o que poderia comprometer a durabilidade das camadas subjacentes do pavimento. Portanto, seria conveniente determinar o coeficiente de permeabilidade desta mistura.

O outro fator questionado, relacionado com a adesividade do agregado de argila, pode ser respondido pelo ensaio AASHTO T-283/89 (determinação do dano por umidade induzida). Os procedimentos adotados para a realização deste ensaio, bem como os resultados obtidos podem ser vistos no item 6.6.2.

6.6.1 Influência do volume de vazios na permeabilidade da mistura pesquisada

O coeficiente de permeabilidade (K) é a grandeza que mede a velocidade com que um fluido escoar através de um meio poroso. O princípio que rege a determinação dessa grandeza baseia-se na lei de Darcy e considera o escoamento laminar.

A permeabilidade de uma mistura asfáltica pode ser obtida em laboratório utilizando permeâmetros de carga constante ou de carga variável dependendo da velocidade do escoamento no meio poroso. Deve-se ressaltar que um concreto asfáltico com elevado volume de vazios não necessariamente terá um coeficiente de permeabilidade alto visto que esses parâmetros não são diretamente proporcionais.

Para que um meio poroso seja bastante permeável é necessário que os vazios desse meio se comuniquem e evidentemente, quanto maior o percentual de vazios maior será a probabilidade de comunicação entre esses. Este fato leva à constatação de que o arranjo do esqueleto mineral, diâmetro e uniformidade das partículas e a

espessura da camada exercem forte influência na permeabilidade do meio. Portanto é de se esperar, em concretos asfálticos de mesma espessura e curvas granulométricas distintas, que os de graduação mais densa sejam menos permeáveis em relação aos de graduação mais aberta (misturas com baixas quantidades de materiais finos). Um estudo realizado pela NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (NCHRP, TRB, 2004) avaliou a permeabilidade de sete tipos de misturas betuminosas compactadas no campo e em laboratório. Em síntese esse estudo verificou que as misturas com graduação grossa (coarse-graded mixes) apresentam coeficientes de permeabilidade superiores ao recomendado ($K = 1,25 \times 10^{-3}$ cm/s) quando o volume de vazios é superior a 8%. Quando a mistura possui uma graduação fina (fine graded mixes) esse limite não é ultrapassado, mesmo para volume de vazios de até 10% como mostra Tabela 6.16.

Nesse sentido, entende-se que misturas contendo agregados de argila calcinada, com volume de vazios elevado, serão menos permeáveis quando enquadradas em faixas granulométricas que valorizam a utilização dos agregados miúdos e filler, como a faixa recomendada pelo LDH e faixa C do DNER.

Tabela 6.16 – Comparação entre os valores da permeabilidade de misturas asfálticas no laboratório e no campo (NCHRP, TRB, 2004).

Seção Nº	Tipo de mistura	Vazios de Campo (%)	Permeabilidade de Campo (cm/s x 10^{-5})	Permeabilidade em Laboratório (cm/s x 10^{-5})
1	9,5mm FG	6,6 a 8,8	1 a 28	1 a 35
2	9,5mm CG	9,0 a 12,6	14 a 632	107 a 1070
3	9,5mm SMA	7,7 a 12,6	110 a 651	29 a 168
4	12,5mm SMA	4,1 a 17,9	3 a 1778	0,1 a 5850
5	19.0mm FG	5,7 a 9,5	38 a 161	1 a 77
6	19.0mm FG	5,3 a 9,8	10 a 1760	1 a 141
7	19.0mm FG	4,8 a 15,2	72 a 3030	0 a 1203

O estudo realizado pela NCHRP (RTP-531) ainda avaliou a influência da relação $t/NMAS$ (espessura do corpo-de-prova/diâmetro máximo do agregado) na permeabilidade de sete tipos de misturas betuminosas moldadas em compactador giratório cujo volume de vazios ficou em $7.0 \pm 1\%$, mesmo quando compactadas com 300 giros. Todas as amostras foram ensaiadas com relação $t/NMAS$ igual a 2.0, 3.0 e 4.0. Em geral foi constatado que a permeabilidade dessas misturas decresceu com

o aumento da relação t/NMAS como mostra a Figura 6.19. Este fato indica que a permeabilidade é fortemente afetada por esta relação.

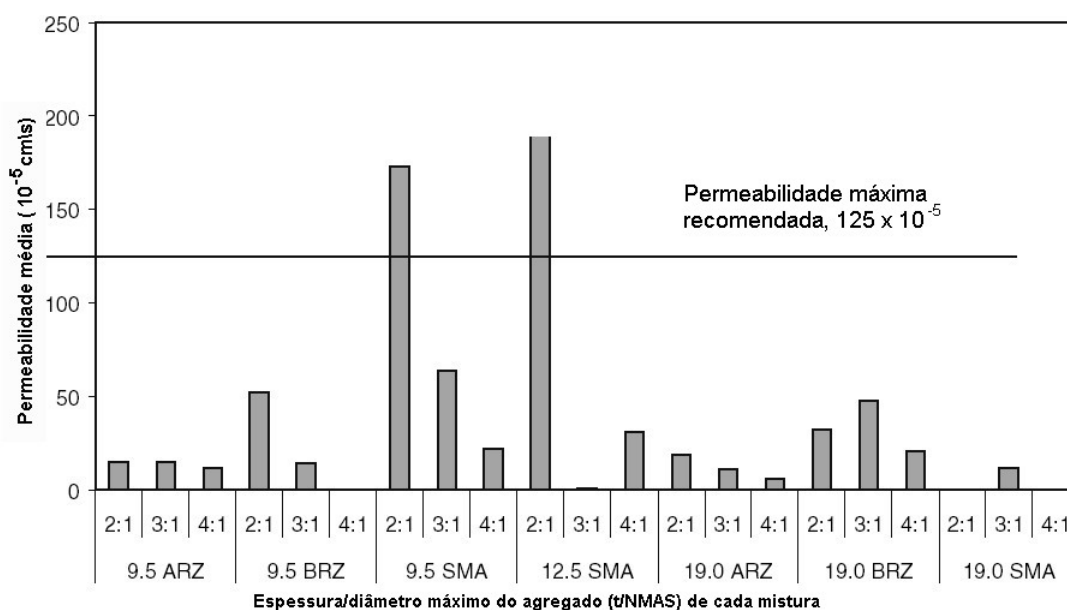


Figura 6.19 – Permeabilidade versus relação espessura/diâmetro máximo do agregado (NCHRP, TRB, 2004).

Para que misturas não convencionais, contendo elevados percentuais de agregados porosos, se tornem economicamente viáveis, é de se esperar que o teor efetivo de asfalto seja relativamente baixo, o que normalmente induzirá a elevados volumes de vazios. A maior preocupação com esses altos percentuais de vazios está relacionada com uma permeabilidade elevada do concreto asfáltico, a qual pode induzir a danos tanto na camada de rolamento como nas camadas subjacentes, reduzindo consideravelmente a vida útil do pavimento. Entretanto o estudo da NCHRP (TRB, 2004) comprovou que em muitas situações este problema pode ser contornado adotando curvas granulométricas fechadas e usando a correta relação t/NMAS.

A determinação da permeabilidade da mistura pesquisada foi realizada em laboratório através de um permeâmetro de carga variável. Para efeito comparativo, duas amostras foram compactadas num cilindro Marshall com 75 golpes em cada face. A primeira foi moldada com uma massa asfáltica convencional (agregados de origem granítica), enquadrada na faixa B do DNER e oriunda da usina da CRT (Concessionária Rio - Teresópolis), cuja dosagem atendeu os parâmetros volumétricos especificados na metodologia Marshall (Fritzen, 2004). A outra amostra escolhida foi a mistura M1 devido ao maior percentual de vazios. Adotou-se como a permeabilidade

máxima admissível a recomendada pela NCHRP (Report 531) que é igual a $1,25 \times 10^{-3}$ cm/s.

A mistura M1 apresentou relação t/NMAS igual a 4,7 e a mistura convencional igual a 3.

O ensaio de permeabilidade consistiu em:

- i. Determinar a altura e o diâmetro médio de cada corpo-de-prova;
- ii. Acoplar o cilindro contendo a mistura compactada no permeâmetro como mostrado na Figura 6.20.
- iii. saturar a amostras através da imersão em água por oito dias;
- iv. Medir o tempo (t) necessário para que a coluna de água decresça 10 cm na régua graduada mostrada na Figura 6.20.

Para o cálculo do coeficiente de permeabilidade foi utilizada a seguinte equação:

$$K_{20} = \frac{2,3 \cdot a \cdot L \cdot R_T}{A \cdot t} \cdot \log_{10} \frac{h_o}{h_f} \quad (6.6.1)$$

Onde:

a = área da seção transversal do tubo;

A = área da seção transversal da amostra;

R_T = fator de correção da viscosidade da água;

h_o = altura da coluna d'água para um tempo $t=0$;

h_f = altura da coluna d'água para um tempo t;

t = tempo;

L = espessura da amostra compactada.



Figura 6.20 – Esquema do ensaio de permeabilidade realizado nesta pesquisa (Fotos do autor).

Os resultados deste ensaio encontram-se na Figura 6.21 e representam a média de cinco determinações. Pôde-se verificar que mesmo com um volume de vazios (avaliado pelo processo de variação de densidade) próximo de 12% a mistura M1 apresentou um coeficiente de permeabilidade bem abaixo do recomendado pela NCHRP (Report 531) e ainda muito próximo do obtido com a mistura convencional indicando que sua permeabilidade é perfeitamente aceitável para finalidade proposta, sob este aspecto. Provavelmente o maior índice de vazios presentes nesta mistura com agregados calcinados correspondem a vazios não conectados.

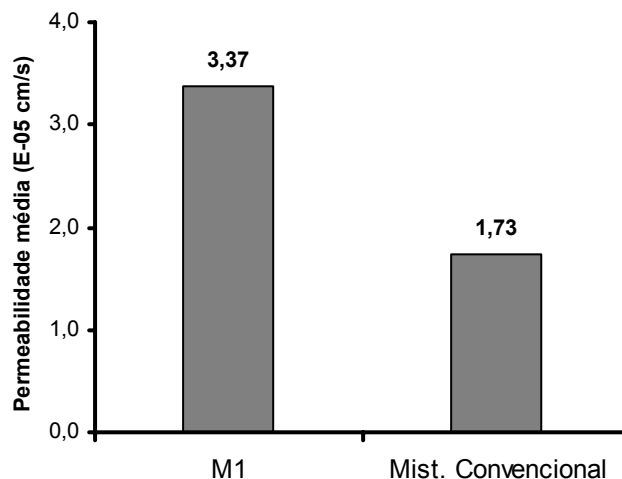


Figura 6.21 – Coeficientes de permeabilidade das misturas M1 e Convencional.

6.6.2 Dano por umidade induzida

A ação da umidade influencia diretamente na perda de desempenho e vida de serviço de um revestimento betuminoso, já que provoca o descolamento da película de asfalto (causando a perda da adesão) e reduz a interação ligante-agregado (causando a perda da coesão). A intensidade desse efeito deletério depende basicamente da capacidade do ligante em aderir aos agregados (Adesividade).

Na região de estudo (estado do Acre), onde a média pluviométrica anual é superior a 2.000mm, a utilização de misturas com adesividade insatisfatória pode comprometer severamente a vida do pavimento.

O ensaio de resistência à tração retida (AASHTO T-283/89) visa identificar misturas que possam apresentar uma degradação prematura devido ao dano causado pela umidade. O método utilizado neste estudo apresentou uma pequena modificação do método AASHTO T-283/89 quanto à consideração do teor de vazios e condicionamento dos corpos-de-prova.

No método tradicional o efeito danoso da água é avaliado em corpos-de-prova com volume de vazios entre 6,0% e 8,0%, através do ensaio de RT. Moldam-se dois grupos de corpos-de-prova. No primeiro grupo realiza-se o ensaio de RT sem que seja feita qualquer alteração prévia nos mesmos. Já o segundo grupo, é submetido a efeitos

de saturação e de condicionamento acelerado na presença de água. A Razão de Resistência à Tração Retida por compressão diametral (RRT) é obtida dividindo-se o valor da RT dos corpos-de-prova com condicionamento (média de três determinações) pelo valor da RT sem condicionamento. O valor mínimo recomendado pelo SUPERPAVE para a RRT é 70% para o ensaio com condicionamento severo (Magalhães, 2004).

O processo de saturação e condicionamento severo descrito no método (AASHTO T-283/89) consiste em:

- i. submeter os corpos-de-prova, imersos em água a 25°C, a uma pressão de vácuo de 254mm - 660mm de hg por aproximadamente 5 minutos para garantir que a saturação dos mesmos fique entre 55% e 80%;
- ii. emergí-los durante 24 ± 1 hora em água a temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$;
- iii. envolvê-los em filme plástico e colocá-los em um saco plástico com 10 ml de água (25°C), refrigerar os mesmos a $-18^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ por no mínimo 16 horas;
- iv. submergí-los em água ($60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) por 24 horas, depois de retiradas as proteções (filme e saco plástico);
- v. submergí-los em água (25°C) por duas horas para condicioná-los para a temperatura de realização do ensaio de RT.

No presente estudo os corpos-de-prova foram moldados da mesma maneira que os utilizados nos ensaios mecânicos (conforme especificado no item 6.3.4) já que, neste caso o percentual de vazios era superior ao especificado pelo método. Foram moldados dois grupos no teor de 7,5% de CAP-20 sendo que em um grupo foi adicionado 0,5% de CAP-DOP ao ligante. O objetivo deste ensaio foi verificar através da Razão de Resistência à Tração qual seria o dano causado a mistura pela água e se a adoção do CAP-DOP poderia promover uma melhora significativa na adesividade dessa mistura.

O valor da DMM da mistura é necessário para o cálculo do grau de saturação de um corpo-de-prova. Para determinar a saturação dos corpos-de-prova neste ensaio ao

invés de utilizar o valor da DMM obtido na Tabela 6.11 foi utilizado o valor de DMM igual a 2,34, obtido sem a substituição da massa A (massa da mistura em estado seco e solto) pela massa A' (massa da mistura saturada e superficialmente seca) na equação (6.4.4), ou seja, foi considerada a entrada de água nos vazios dos agregados para simular o que realmente acontecia nos corpos-de-prova durante a saturação por vácuo no método AASHTO T-283/89. Como já foi comentada, a falta de recobrimento do ligante nos agregados graúdos de argila calcinada proporcionou a entrada de água nos mesmos quando submetidos a saturação por vácuo.

Os resultados dos dois grupos estudados nesta pesquisa foram comparados com o valor da RT sem condicionamento, obtido na Tabela 6.14, para o teor de 7,5%. Devido ao elevado volume de vazios o grau de saturação (entre 55% e 80%) foi obtido com a aplicação de vácuo de 500mm de hg durante 1 minuto. As etapas de condicionamento foram realizadas de acordo com o especificado pelo método para o condicionamento severo (AASHTO T-283/89). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 6.22.

Vale ressaltar que o tipo de condicionamento severo não tem o objetivo de simular as condições climáticas ocorridas em campo, mas sim objetiva reproduzir de forma acelerada o efeito da ação deletéria da água em misturas betuminosas, sendo que o congelamento destina-se a criar fissuras nos corpos-de-prova.

Percebe-se que os valores de Resistência à Tração Indireta para a mistura avaliada, com o melhorador de adesividade e sem este são bastante próximos. A diferença encontrada entre os valores de RRT foi de 3%. Este fato indica que a utilização do DOPE na mistura pesquisada não foi relevante para este ensaio, embora o método DNER ME – 078 tenha aprovado a adesividade ao agregado graúdo com a utilização de 0,5% de DOPE. A mistura pesquisada não atingiu o valor mínimo especificado para a RRT, apresentando resultados muito baixos.

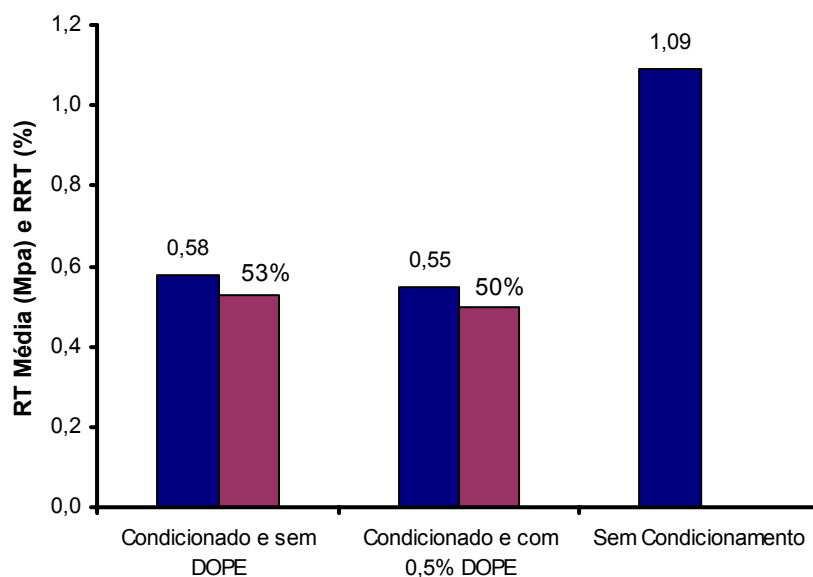


Figura 6.22 – Avaliação da adesividade da mistura M1 (7,5% de CAP-20) através da Razão de resistência à Tração (AASHTO T-283/89).

Durante o processo de mistura do ligante com os agregados pôde-se perceber uma certa dificuldade do ligante envolver os agregados graúdos mesmo no teor de 9,5%. Com o objetivo de investigar as causas desses resultados procurou-se na literatura possíveis explicações para o problema da adesividade. Fularn et al. (2004) referem-se à influência das características de alguns agregados na suscetibilidade a dano por umidade induzida em misturas asfálticas. Os autores fizeram as seguintes considerações, que podem ser tidas como pertinentes aos problemas com a adesividade na mistura pesquisada:

- i. Tem-se observado que asfaltos mais viscosos apresentam maior resistência ao deslocamento da película na presença da água que asfaltos menos viscosos
- ii. Há indicações que misturas de granulometria densa geralmente exibem perda de resistência na presença de água quando o volume de vazios ou a umidade são excessivos ou a quantidade de asfalto é insuficiente, muitas vezes causada por uma absorção elevada de asfalto pelo agregado.
- iii. Embora as características do asfalto e do tipo de mistura possam influenciar a sensibilidade das misturas à umidade, as propriedades dos agregados são as principais responsáveis pela resistência adesiva entre o asfalto e o agregado. Os agregados apresentam composições mineralógicas e estruturas

cristalinas específicas, podendo ser classificados em ácidos e básicos, de acordo com o teor de sílica presente. O aumento do teor de sílica (SiO_2) num agregado aumenta a afinidade com a água e, por isso são chamados de agregados hidrofílicos. Já agregados básicos como basalto e diábasio devido a menor quantidade de sílica tendem a desenvolver melhores ligações ao asfalto que a água.

Na Tabela 4.1 pode-se observar que todas as três matérias-primas estudadas apresentam valores superiores a 60% de sílica (SiO_2) em sua composição, fato que leva a um melhor entendimento da falta de afinidade do agregado entre o agregado AGC23-1050 com o asfalto.

Foram medidos os PHs em água da argila calcinada e da areia de rio sendo respectivamente 7,26 e 7,50, que colaboram com o resultado desfavorável de adesividade obtido para mistura M.

Outro fator relevante é que segundo Fularn et al. (2004) a diminuição do filme de asfalto torna a mistura mais suscetível às ações do clima, da água, do envelhecimento e do tráfego. A mistura com um ligante muito mole, como o CAP-20, não é muito adequada como indica o item “i”. Se por um lado à graduação fina é favorável a diminuição da permeabilidade, por outro é mais sensível aos danos causados pela umidade.

Sugere-se que futuros trabalhos avaliem detalhadamente o problema da adesividade dos agregados de argila calcinada visto que, até o presente momento, esta foi a característica considerada inadequada à utilização deste tipo mistura em obras de pavimentação. Também a alternativa de uso de CAP mais viscoso, por exemplo CAP-40 poderia melhorar o aspecto de absorção do ligante, deixando uma película mais grossa para recobrir o agregado de argila calcinada ajudando a melhorar a perda de RT.

CAPÍTULO 7

7 UTILIZAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS E AGREGADOS DE ARGILA CALCINADA EM PAVIMENTAÇÃO ALTERNATIVA.

7.1 Considerações sobre a escolha de solos finos tropicais para a confecção de bases de pavimentos

Através do sistema de classificação MCT pode-se selecionar materiais passantes na peneira nº10 (2mm), antes considerados inadequados pelos critérios tradicionais, para serem utilizados em bases e sub-bases. Os solos selecionados como adequados por esta classificação podem ser empregados mesmo sendo muito argilosos, para volumes tráfego variando de baixo a médio, ou em misturas de solo-agregado para tráfego pesado.

Para classificar os solos quanto ao comportamento laterítico, utiliza-se o gráfico da Figura 7.1. A linha tracejada é o limite que separa a classe laterítica (em geral de bom comportamento em camadas de pavimentos) da não laterítica.

O grupo dos solos de comportamento laterítico são subdivididos em três sub-grupos e apresentam as seguintes peculiaridades (Nogami & Villibor, 1995; Villibor et al, 2000):

- i. LA (areia laterítica quartzosa) – Devido à predominância dos grãos de quartzo, normalmente são solos relativamente permeáveis, de pequena coesão e contração. Possuem como qualidades desejáveis para o uso em bases de

pavimento elevados módulos de resiliência e boa capacidade de suporte.

- ii. LA' (solo arenoso laterítico) - quando os solos são compactados nas condições ótimas de energia e umidade, ocorre um considerável aumento da capacidade de suporte, do módulo de resiliência e diminuição da permeabilidade. Quando imersos em água, apresentam baixa expansibilidade e razoável coesão.
- iii. LG' (solo argiloso laterítico) – Geralmente possuem melhor resistência à erosão hidráulica e propriedades mecânicas inferiores ao grupo LA'. Dependendo do percentual de areia podem ser mais ou menos plásticos e ainda apresentar comportamento similar ao LA' quando possui elevada quantidade de quartzo.

O grupo dos solos de comportamento não laterítico, ou solos saprolíticos, segundo a classificação MCT, são subdivididos nos seguintes sub-grupos e apresentam as seguintes peculiaridades segundo os estudos de (Nogami & Villibor, 1995; Villibor et al, 2000):

- i. NA (areias, siltes ou misturas de areia e silte não laterítico com predominância de grãos de quartzo e/ou mica) – Dependendo da constituição dos grãos podem ser pouco expansivos (areias e siltes quatzosos) ou muito expansivos quando compostos por variedades micáceas. Possuem geralmente baixa resistência a erosão hidráulica e quando compactados possuem capacidade de suporte de pequena a média.
- ii. NA' (solo arenoso não laterítico originado de rochas ricas em quartzo) – Podem ser favoráveis para o uso em base quando o solo for bem graduado, a natureza dos finos obedecerem às condições estipuladas tradicionalmente e a mesma for isenta na fração areia e/ou silte de mica e/ou macrocristais de caulinita e/ou haloisita. Recomenda-se que se determine a capacidade de suporte e as suas características expansivas, mesmos de maneira expedita na ocasião de sua classificação.
- iii. NS' (solo siltoso não laterítico) - quando esses solos são compactados nas condições ótimas de umidade e massa específica máxima da energia normal, apresentam baixa capacidade de suporte quando imersos em água, baixo

módulo de resiliência, alta expansibilidade e erodibilidade.

- iv. NG' (solos saprolíticos argilosos) - quando esses solos são compactados na condição ótima de umidade e massa específica máxima da energia normal, apresentam características das argilas tradicionais muito plásticas e expansivas. Quanto à resiliência, quando compactadas, apresentam características bilineares em função da tensão desvio sendo pouco dependentes da tensão confinante.

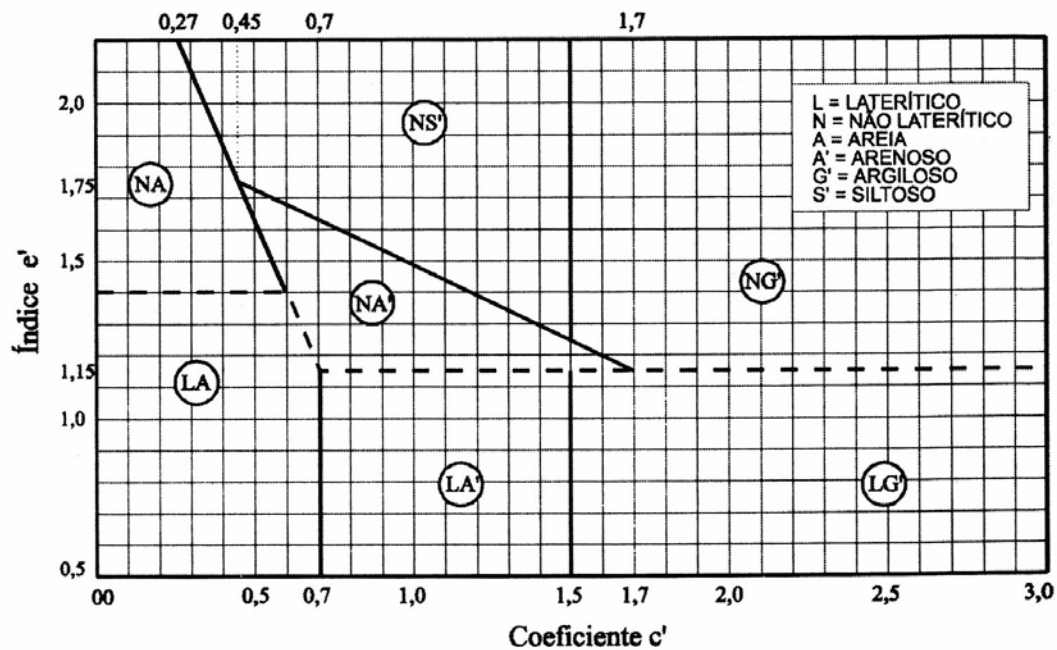


Figura 7.1 Gráfico da classificação MCT (Villibor et al, 2000)

Os ensaios de laboratório que determinam a classe MCT dos solos são os ensaios de Mini-MCV e perda de massa por imersão.

O primeiro é uma adaptação do ensaio MCV (Moisture Condition Value), concebido por Parsons (engenheiro inglês do TRRL) em 1976, cuja finalidade original era fazer uma avaliação rápida e segura das condições de umidade do solo para fins de terraplenagem.

O ensaio Mini-MCV é realizado em corpos-de-prova moldados em cilindros de 50mm de diâmetro interno e compactados com soquetes de seção plena com energias crescentes. Ao final do ensaio obtém-se uma família de curvas de deformação, donde

podem ser obtidos os parâmetros do comportamento mecânico do solo, indicados no gráfico de classificação MCT (c' e e').

O coeficiente c' (coeficiente de deformabilidade) é o coeficiente angular obtido da parte retilínea da curva de deformabilidade do valor Mini-MCV igual a 10. Segundo Villibor et al (2000) este coeficiente indica a argilosidade do solo, ou seja, um c' elevado (acima de 1,5) caracteriza as argilas e solos argilosos, enquanto que valores baixos (abaixo de 1,0) caracterizam as areias e os siltes não plásticos ou pouco coesivos. No intervalo entre 1,0 e 1,5 se situam diversos tipos de solos, tais como: areias siltosas, areias argilosas, argilas arenosas e argilas siltosas.

O coeficiente e' , do gráfico MCT, visa distinguir os solos de comportamento laterítico dos não laterítico. Este coeficiente é calculado a partir do coeficiente d' (inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação, correspondente a 12 golpes do ensaio de Mini-MCV) e da perda de massa por imersão P_i de acordo com a expressão (Villibor et al, 2000):

$$e' = \sqrt[3]{\left(\frac{20}{d'}\right) + \left(\frac{P_i}{100}\right)} \quad (7.1)$$

No ensaio de perda de massa por imersão o corpo-de-prova compactado no ensaio de Mini-MCV é extraído parcialmente do cilindro de maneira a criar uma saliência de aproximadamente 10mm e em seguida é submerso em água por cerca de 20 horas, conforme indicado na Figura 7.2. A partir disso recolhe-se a massa possivelmente desprendida, leva-se o material desprendido para estufa e determina-se a massa seca desprendida. A perda de massa por imersão " P_i " é o percentual de massa seca em relação à parte primitivamente saliente.

Atualmente são empregados os seguintes tipos de base com o uso solos finos lateríticos no Brasil:

- i. SAFL (Base de solo arenoso fino laterítico);
- ii. ALA (Base de solo argiloso laterítico e areia);

- iii. SLAD (Base de solo laterítico e agregado de granulometria descontínua) e
- iv. Base de Argila laterítica.



Figura 7.2 Exemplo de arranjo do ensaio de perda de massa por imersão, do solo de comportamento laterítico deste estudo.

Os pavimentos que utilizam bases de solo fino laterítico têm custos consideravelmente mais baixos e em diversas circunstâncias podem viabilizar economicamente a pavimentação de muitos trechos de rodovias vicinais, rurais e ruas residenciais, pátios industriais, estacionamentos e aeródromos para aviões de pequeno porte, que sem essa solução, teriam que permanecer apenas com revestimento primário, ou mesmo em terra, de custo elevado de conservação, além de desconforto considerável e, mesmo, prejuízos elevados pelo aumento do custo de operação dos veículos (Nogami & Villibor 1995; Marangon, 2004).

O sistema de classificação MCT é um importante instrumento na seleção de solos finos para a composição de bases de baixo custo em climas tropicais. Esse sistema vem se consagrando ao longo dos anos, especialmente no estado de São Paulo, onde são relatados inúmeros casos de sucesso de rodovias construídas com bases de SAFL (Solo Arenoso Fino Laterítico) ou solo-agregado considerados inadequados pelos métodos tradicionais.

Villibor et al (2000) relatam o sucesso de alguns trechos executados em Rio Branco – AC, cujo clima é equatorial com volume anual de chuvas superior a 2.000mm. Segundo os autores, nesse caso, o pavimento acha-se confinado por guias e com

revestimento de concreto betuminoso usinado a quente executado sobre uma camada de proteção anti-cravamento de tratamento superficial simples.

Nessa pesquisa é de especial interesse o estudo de bases “in natura” com solos finos de comportamento laterítico e bases do tipo SLAD (Base de solo laterítico e agregado de granulometria descontínua) confeccionadas com agregados de argila calcinada. Este estudo se propôs a avaliar comportamento dinâmico desses tipos materiais prevendo sua utilização em rodovias com volume de tráfego de leve a média intensidade.

7.2 Considerações sobre a dosagem da mistura solo-agregado

Sob o ponto de vista tradicional, os métodos de dosagem de solo-agregado objetivam a máxima densificação da mistura. Portanto as especificações tradicionais (AASHTO, ASTM, TRRL, LCPC-SETRA por exemplo) preconizam que a faixa granulométrica da mistura deva estar limitada por curvas contínuas. Essas curvas guardam semelhança formal com as curvas estabelecidas por Fuller & Thompson em 1907 e Talbot & Richard em 1923 (Nogami & Villibor, 1995). Nesse caso, o teor de finos exerce um papel importante, pois na medida em que se eleva este teor, promove-se o afastamento dos grãos graúdos, diminuindo o número de contatos e conseqüentemente a estabilidade da mistura independente da natureza dos componentes finos da mistura (Nogami & Villibor, 1995).

Contudo a dificuldade de encontrar materiais in natura, ou misturados entre si, que venham a satisfazer essas especificações, não só quanto às exigências granulométricas, mas também quanto aos índices físicos e resistência dos grãos, implicam num considerável aumento dos custos e conseqüentemente inviabiliza a construção de bases de solo-agregado na região de estudo (Acre).

Além disso, a massa específica do agregado artificial é menor que a dos solos em geral e portanto, a adoção de procedimentos baseados nas distribuições dos pesos das frações granulométricas dos materiais constituintes poderia induzir a erro.

As pesquisas de Nogami & Villibor (1995) com pavimentos de baixo custo têm mostrado que, no caso de solo-agregado contendo finos lateríticos, a deficiência granulométrica fica compensada pela melhor qualidade dos finos. Nesse caso a resistência às deformações plásticas e resilientes é garantida pelos agregados e pela coesão dos finos lateríticos.

Segundo Villibor et al (2000) bases de solo-agregado de granulometria descontínua têm sido utilizadas com sucesso em várias partes do país, porém sempre quando:

- i. compactadas na energia modificada;
- ii. apresentam baixa umidade de equilíbrio e
- iii. utilizam solos de comportamento laterítico.

Diante dos problemas de ordem técnica, econômica e regional, que envolvem a adoção dos critérios tradicionais para a dosagem de misturas do tipo solo-agregado, optou-se, nessa pesquisa, em trabalhar com granulometrias descontínuas, cujos critérios de aceitação baseiam-se na classe MCT do solo e no comportamento dinâmico da mistura, obtido através de ensaios triaxiais cíclicos.

O procedimento de dosagem consistiu basicamente em:

- i. determinar a granulometria do solo e do agregado artificial, segundo procedimento tradicional;
- ii. classificar e utilizar apenas solos pertencentes aos grupos LA, LA' ou LG' da classificação MCT ;
- iii. compor uma mistura de granulometria descontínua.

7.3 Caracterização dos materiais utilizados

7.3.1 Seleção dos materiais

O solo selecionado foi um solo argiloso fino de cor avermelhada, com presença insignificante de pequenas concreções lateríticas retidas na peneira 10 (0,2%), denominado de "SFL-01". Foi extraído do quilômetro 35 da BR-364 a aproximadamente 40 km do centro de Rio Branco. No critério de classificação MCT é um solo do grupo LG', como será visto adiante. Optou-se em trabalhar com este material pela facilidade de encontrá-lo na região e pelas excelentes propriedades mecânicas e hídricas.

Evidentemente as propriedades mecânicas numa mistura solo-agregado não são influenciadas tão intensamente, por propriedades dos agregados como porosidade e absorção, como numa mistura asfáltica. Por esse motivo e visando simular a qualidade do agregado calcinado em fornos cerâmicos, o agregado selecionado para a composição da base do tipo SLAD foi resultante da queima da matéria-prima MT-23 a 850°C por 45 minutos. Este agregado foi denominado de AG23-850.

7.3.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica do solo foi realizada obedecendo à norma NBR 7181-84. Até tamanho de partícula de retida na peneira nº 200, o diâmetro dos grãos e seus percentuais relativos foram obtidos por peneiramento e abaixo desta a técnica usada foi o ensaio de sedimentação. A Figura 7.3 mostra a curva de distribuição granulométrica e na Tabela 7.1 encontra-se o resumo granulométrico bem como o valor da massa específica real dos grãos (NBR 6508-84) do solo "SFL-01". Os agregados de argila calcinada, AGC23-850, foram britados e separados em frações granulométricas como mostra a Tabela 7.2.

Tabela 7.1 – Granulometria e massa específica real dos grãos (G) do solo SFL-01

Peneiras Nº	% Que Passa Amostra Total	Areia Fina 0,42 - 0,05 mm	~ 60%
4	100	Silte	~ 5%
10	99,96	0,05 - 0,005 mm	
40	99,67	Argila	~ 35%
100	52,76	Abaixo 0,005mm	
200	40,40	G	2,75 g/cm³

Tabela 7.2 – Granulometria dos agregados de argila calcinada usadas no estudo de solo-agregado.

#		% que passa
Nº	(mm)	AGC23- 850
3/4"	19	100,00
1/2"	12,7	59,42
n.º 4	4,8	28,16
n.º 10	2	15,15
n.º 40	0,42	6,85
n.º 200	0,075	2,86

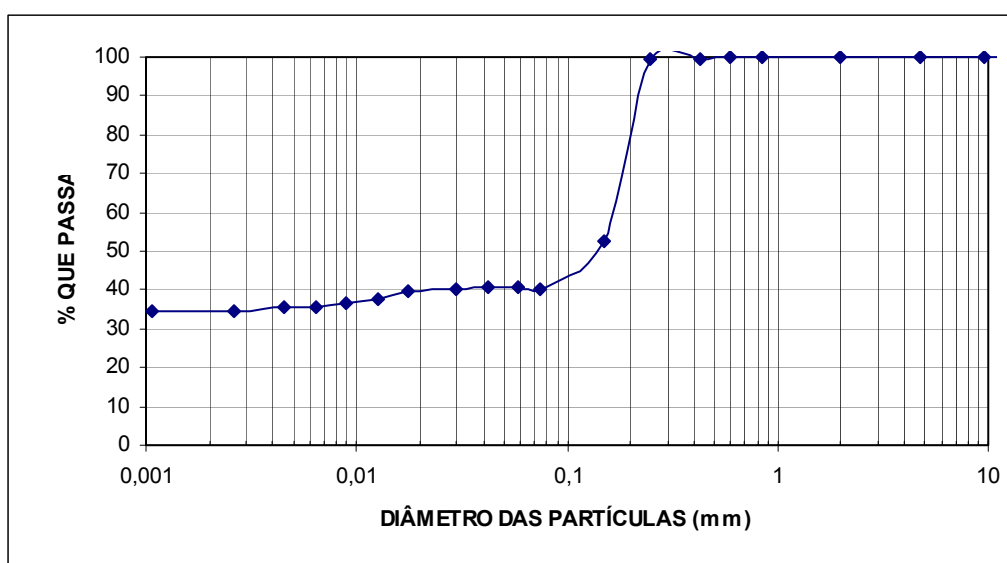


Figura 7.3 – Curva granulométrica do solo SFL-01

7.3.3 Classificação MCT

O solo "SFL-01" foi submetido aos ensaios de Mini-MCV e perda de massa por imersão conforme os procedimentos da norma DNER ME-258/94 e DNER ME-256/94 respectivamente.

A preparação das amostras consistiu de :

- i. preparar 5 porções de 200g de solo destorroado e seco ao ar cada;

- ii. umidecer e homogeneizar cada porção, aumentando o teor de umidade em 2% na porção seguinte;
- iii. colocar o solo homogeneizado e umedecido em sacos plásticos devidamente identificados e levá-los a uma câmara úmida permanecendo nesta por no mínimo 24h;
- iv. preparar os moldes passando vaselina nas paredes internas para minimizar o atrito do solo com o molde no momento da compactação e colocar um plástico no fundo do mesmo;
- v. realizar a compactação de acordo com o método DNER ME-258/94 e registrar os valores obtidos em uma planilha;
- vi. Realizar a extração da saliência (10 mm) em equipamento adequado;
- vii. imergir os corpos-de-prova por cerca de 20 h e verificar o comportamento do solo quanto à perda de massa.

Na Figura 7.4 é mostrada a localização do solo "SFL-01" no gráfico de classificação MCT e na Tabela 7.3 estão apresentados os resultados dos ensaios de Mini-MCV e perda de massa por imersão. A Figura 7.5 mostra o aspecto das curvas de deformabilidade e do parâmetro c' do solo estudado. Na Figura 7.6 é mostrado o aspecto das curvas de compactação e do parâmetro d' para este solo. Por fim, na Figura 7.7 é mostrado o aspecto das curva de perda massa por imersão deste solo.

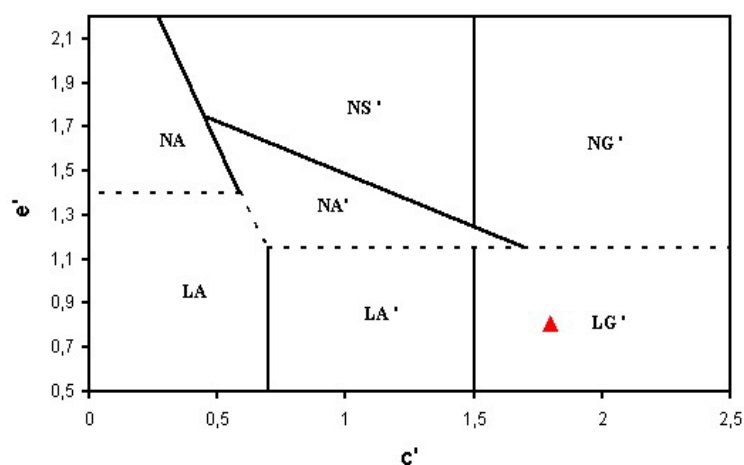


Figura 7.4 Classe MCT do solo "SFL-01"

Tabela 7.3 – Resultados dos ensaios de Mini-MCV e perda de massa por imersão

Solo	c'	d'	Pi	e'	Wot* (%)	Pea _{máx} * (kN/m ³)
"SFL-01"	1,80	86,8	30	0,81	13,7	18,3

*umidade ótima e peso específico aparente seco máximo para a energia correspondente a 10 golpes.

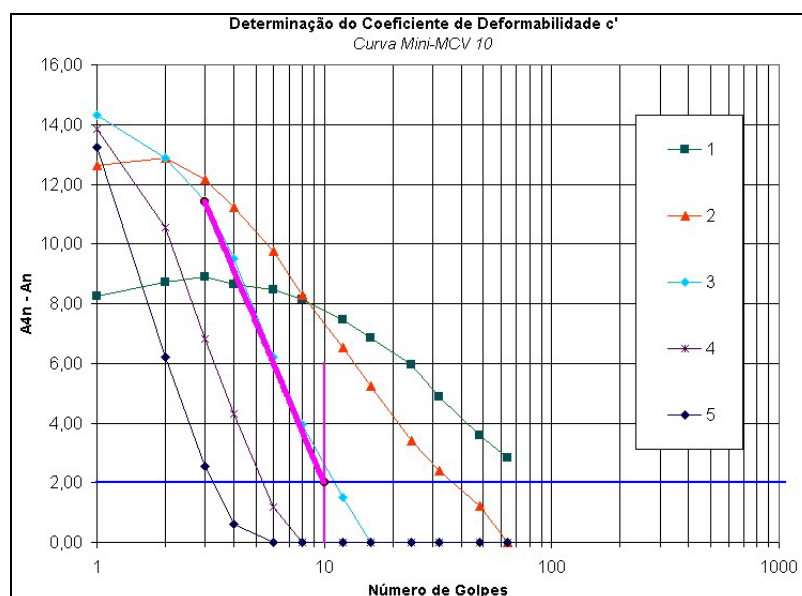


Figura 7.5 Curvas de deformabilidade e a reta de determinação do coeficiente c' do solo "SFL-01"

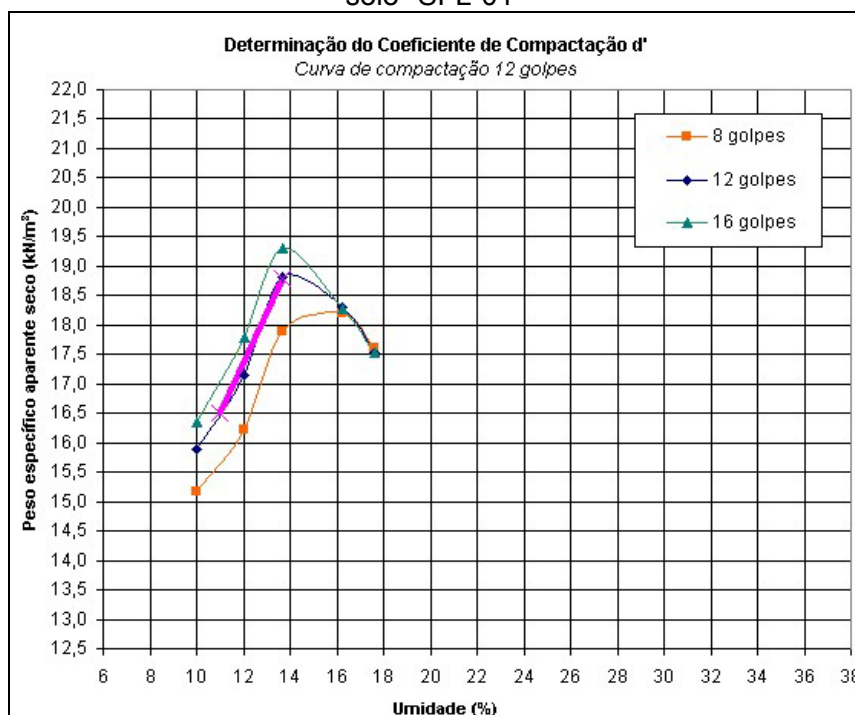


Figura 7.6 Curvas de Compactação para 8, 12 e 16 golpes e a reta de determinação do parâmetro d' do solo "SFL-01".

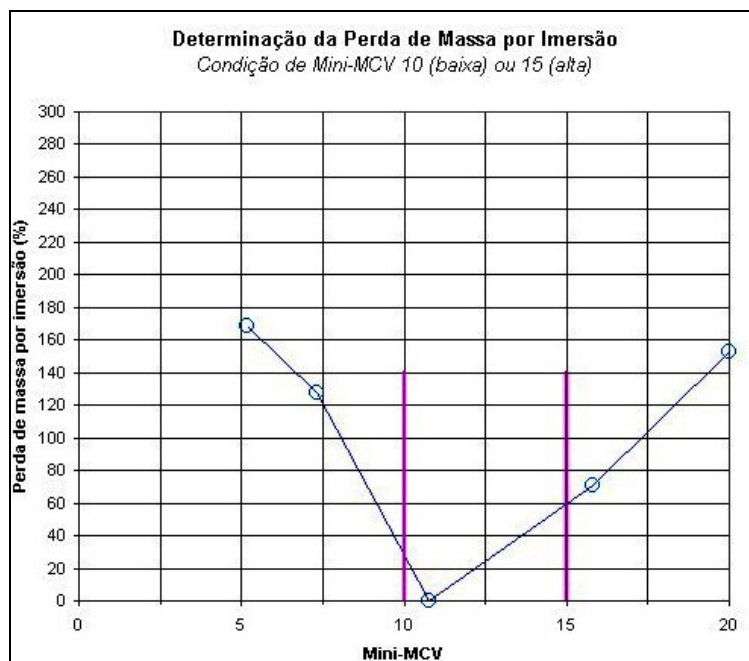


Figura 7.7 - Curva perda de massa por imersão do solo "SFL-01"

Com base nesses resultados, verifica-se que o solo "SFL-01" tem comportamento laterítico sendo classificado como LG' (laterítico argiloso) embora apresente no peneiramento (60% de areia e 35% de argila), portanto se mostra adequado, quanto à classe, ao uso in natura e na composição de bases de solo-agregado de granulometria descontinua.

Nogami e Villibor (1995) constataram, a partir da experiência com uma grande quantidade de obras, que alguns solos SAFL (Solo Arenoso Fino Laterítico) apresentavam uma série de problemas construtivos enquanto que outros não e portanto dividiram os solos de comportamento laterítico em quatro grupos distintos para aplicabilidade em bases de pavimentos, conforme ilustrado na Figura 7.8. O solo estudado se situa no grupo I ($c'=1,80$ e $e'=0,81$) o que vem a reafirmar sua adequação ao uso em bases de pavimentos.

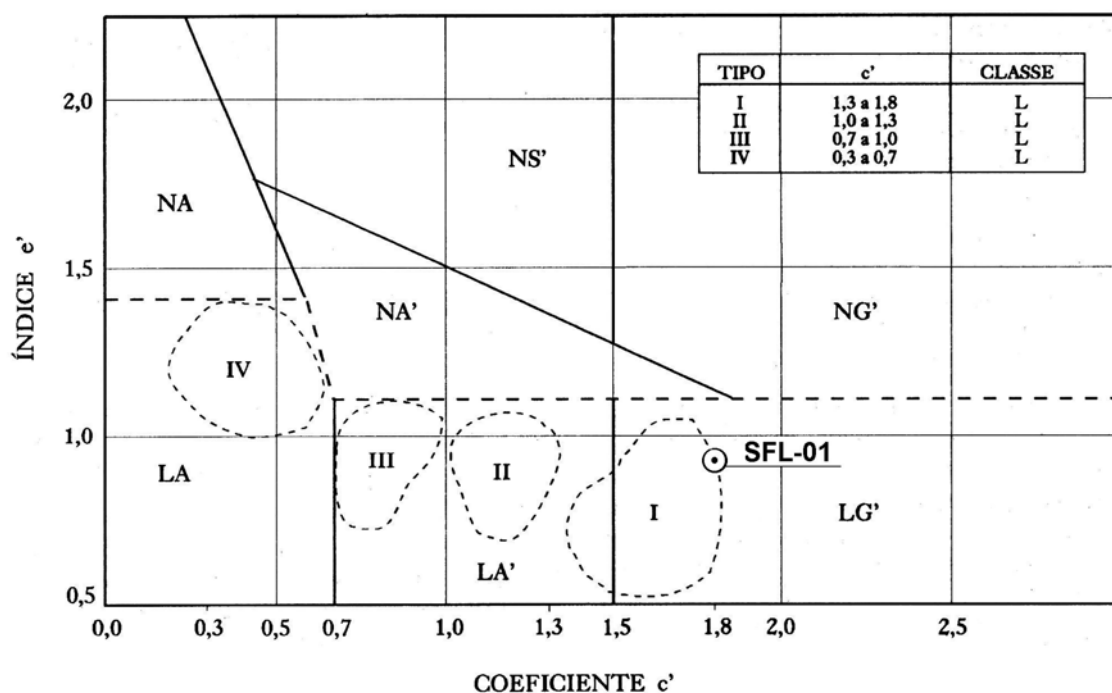


Figura 7.8 - Áreas no gráfico de classificação MCT indicada ao uso em bases SAFL.

7.4 Dosagem da Mistura solo-agregado

Motta (1991) mostrou um estudo de uma mistura de um solo SAFL com uma brita graduada, na proporção de 70% de solo e 30% de brita. Esse estudo comparou o comportamento resiliente e a resistência às deformações plásticas desses materiais quando utilizados puros ou misturados nas proporções citadas. Foi verificado então em termos de resiliência que a brita graduada pura é menos rígida que os outros dois materiais, sendo mais sensível ao estado de tensões, e o solo fino laterítico tem módulos de resiliência maiores. No entanto, quando foram comparados os resultados das deformações permanentes, se observou que a introdução da brita fez diminuir sensivelmente as deformações plásticas, ficando 8,6 vezes menor nos níveis de tensão compatíveis com a base de pavimentos flexíveis.

Diante do exposto nota-se que a adição de materiais granulares britados em solos lateríticos traz um considerável ganho na resistência às deformações plásticas além de melhorias na resistência a contração, principalmente em se tratando de argilas lateríticas.

No presente estudo o que se pretende é prover o solo "SFL-01" de maior resistência à deformação plástica através da adição do agregado de argila calcinada. Por motivos econômicos e pelas excelentes propriedades mecânicas do solo estudado (constatadas durante a execução dos ensaios dinâmicos) optou-se na presente pesquisa em compor uma mistura de solo-agregado na proporção, em massa seca, de 70% de solo e 30% de agregado de argila calcinada conforme mostra a Tabela 7.4. Esses valores podem ser melhor visualizados na Figura 7.9.

Tabela 7.4 – Granulometria da mistura solo-agregado dessa pesquisa.

# (pol.)	AGC 23-850 30%		Solo (SFL-01) 70%		Mistura Solo-Agregado
3/4"	100,00	30,00	100	70,00	100,00
1/2"	59,42	17,82	100	70,00	87,82
n.º 4	28,16	8,45	100	70,00	78,45
n.º 10	15,15	4,55	100	70,00	74,55
n.º 40	6,85	2,06	99,79	69,85	71,91
n.º 200	2,86	0,86	41,76	29,23	30,09

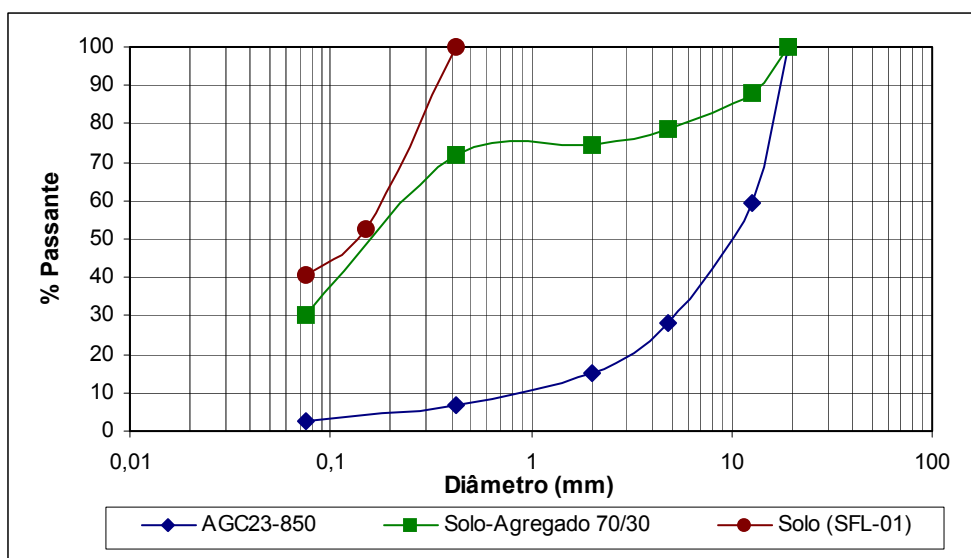


Figura 7.9 – Curvas de distribuição granulométrica dos agregados de argila calcinada, solo laterítico (até a peneira nº 200) e mistura solo-agregado dessa pesquisa.

7.5 Avaliação do comportamento mecânico do solo laterítico e mistura solo-agregado

A avaliação do comportamento mecânico do solo laterítico e mistura solo-agregado foi realizada em laboratório através de ensaios triaxiais cíclicos. Esses ensaios visam

prever o comportamento mecânico dos materiais a serem utilizados na composição das camadas não cimentadas do pavimento quando solicitados pelas tensões provenientes das rodas dos veículos. Para tanto foram moldados corpos-de-prova, na condição de umidade ótima e energia modificada, sendo submetidos a ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente.

7.5.1 Preparação dos corpos-de-prova e determinação da umidade ótima

A preparação das amostras para os ensaios de compactação e ensaios triaxiais consistiu em:

- i. secar o solo ao ar e depois destorroá-lo;
- ii. separar porções de 2.500g para o ensaio de compactação e 4.500g para os ensaios triaxiais e ensacá-las. No caso da mistura solo-agregado essas porções foram montadas adicionando-se o solo e em seguida cada fração dos agregados separadamente como mostra a Tabela 7.5;
- iii. Umidecer e homogeneizar essas porções e guardá-las em câmara úmida por pelo menos 24 horas.

As umidades ótimas do solo in natura e mistura solo-agregado foram determinadas a partir das curvas de compactação da Figura 7.10. Essas curvas foram obtidas através da compactação manual dos materiais em cilindros Próctor, na energia modificada, de acordo com a norma NBR 7182/96. Na Tabela 7.6 são apresentados os valores da umidade ótima e peso específico aparente seco máximo para os materiais estudados.

Tabela 7.5 – Montagem da mistura solo-agregado.

Material	% Granul.	Massa seca (g)	
AGC 3/4-1/2	12,2	304,4	547,9
AGC N° 4 - N° 10	9,4	234,4	422,0
AGC N° 10 - N° 40	3,9	97,6	175,6
AGC N° 40 - N° 80	2,5	62,3	112,1
AGC N° 80 - N° 200	1,2	29,9	53,8
Filer	0,9	21,5	38,7
Solo	70,0	1750,0	3150,0
Total (g)		2500	4500

Tabela 7.6 – Umidade ótima e peso específico aparente seco máximo dos materiais estudados.

Material	Wot* (%)	Pea _{máx} * (kN/m ³)
Solo (SFL-01)	13,7	19,3
Solo-Agregado	14,0	18,8

*Energia modificada

Nota-se que a umidade ótima do solo SFL-01, para a energia modificada é idêntica à obtida no ensaio de Mini-MCV para 12 e 16 golpes. Na Figura 7.6 foi observado que para 16 golpes do ensaio Mini-MCV o peso específico aparente seco máximo é idêntico ao obtido no ensaio de compactação para energia modificada. Vale ressaltar, que 10 golpes do ensaio Mini-MCV corresponde aproximadamente à energia normal, portanto era de se esperar que o peso específico aparente seco máximo para 10 golpes fosse inferior ao obtido para a energia modificada.

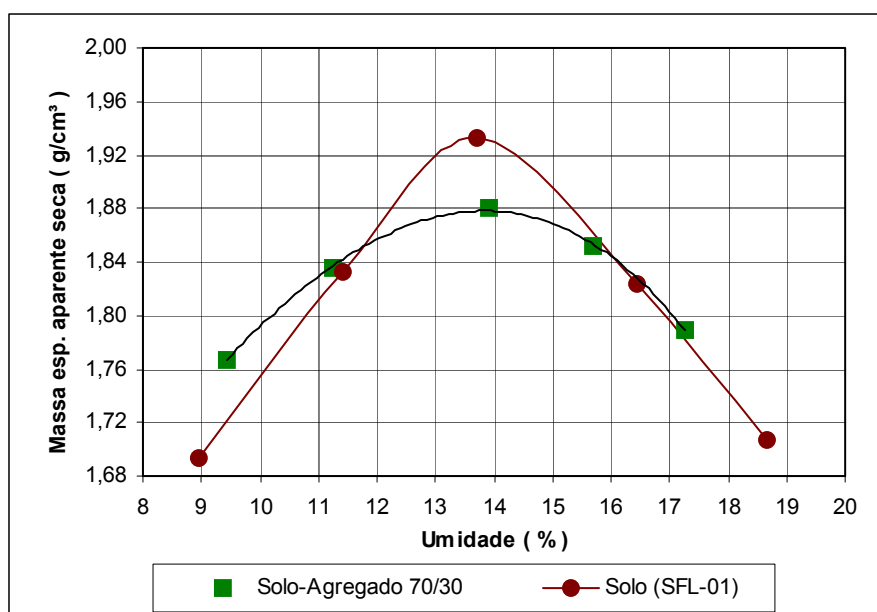


Figura 7.10 – Curva de compactação do solo laterítico e mistura solo-agregado desta pesquisa.

A compactação dos corpos-de-prova para a realização dos ensaios triaxiais cíclicos foi realizada com um compactador automático, em cilindros de 10x20cm em 10 camadas com 27 golpes para as primeiras 5 camadas e 28 golpes nas demais camadas. A Figura 7.11 registra algumas etapas da moldagem dos corpos-de-prova para os ensaios triaxiais.

Verifica-se nas curvas de compactação que a introdução do agregado de argila calcinada induziu a uma massa específica aparente seca máxima menor. Da mesma forma nota-se que a massa específica aparente apresentou menor sensibilidade à variação da umidade quando comparada com o solo in natura. Diferentemente de um solo brita a umidade ótima do solo não diminuiu com a introdução dos agregados calcinados. Provavelmente a diminuição da massa específica aparente seca na mistura solo-agregado deve-se ao fato do agregado de argila ser mais leve que o solo e a não redução da umidade deva-se à elevada absorção de água do agregado calcinado a 850°C. Na tabela 5.1 observa-se que a massa específica aparente os corpos-de-prova calcinados a 850°C com a massa cerâmica MT-23 é igual a 1,88 g/cm³ e a absorção de água é de 15%.



a) Compactador automático da COPPE



b) Aspecto da mistura solo-agregado



c) Aspecto do corpo-de-prova do solo SFL-01



d) Molde usado na compactação

Figura 7.11 – Equipamentos usados na compactação dos corpos-de-prova para ensaios triaxiais desta pesquisa e aspecto do corpo-de-prova do solo SFL-01 (Fotos do autor).

7.5.2 Ensaios de Módulo de resiliência

O ensaio realizado no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, Setor de Ensaios Dinâmicos, consiste basicamente em aplicar, no corpo-de-prova posicionado na câmara triaxial, diferentes pares de tensão confinante e desviadora. Cada carregamento tem a duração de 0,1s e repouso de 0,9s. Antes da realização da aquisição das deformações resilientes os corpos-de-prova são condicionados em 3 ciclos com 500 golpes cada, visando minimizar ao máximo as deformações plásticas. Em seguida são aplicados pares crescentes de tensões confiantes e desviadoras. O valores dos pares de tensões comumente usados nesse ensaio podem ser visualizados na Tabela 7.7.

Para cada par de tensões são determinadas as deformações específicas resilientes e com a tensão desvio correspondente, determina-se o módulo de resiliência em cada par. Os valores dos pares de tensões e o número de repetições de carregamentos usados nessa pesquisa na determinação do módulo de resiliência podem ser observados na Tabela 7.7.

O módulo de resiliência é definido como:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_a} \quad (7.5.1)$$

Onde:

MR = Módulo de resiliência;

σ_d = tensão desviadora;

ϵ_a = deformação axial;

Na determinação do valor da deformação axial, correspondente a cada par de tensões, são realizadas 5 determinações para obtenção de um valor médio sendo que no caso de uma das determinações se afastar em mais de 5% do valor médio são obtidos mais 5 valores de deformação específica para a determinação do módulo de

resiliência.

O equipamento utilizado nesta pesquisa dispõe de um sistema de monitoramento e aquisição de dados, desenvolvido nesta instituição, todo automatizado não havendo necessidade de qualquer intervenção do operador após o acionamento do início do ensaio (Vianna, 2002). Obtidos os vários valores de MR o sistema gera um relatório onde são plotadas envoltórias para a definição de MR em função da tensão desvio ou tensão confinante. O aspecto do equipamento utilizado nessa pesquisa pode ser visualizado na Figura 7.12.

Tabela 7.7 – Pares de tensões e o número de repetições de carregamentos usados na determinação do módulo de resiliência em ensaios triaxiais cíclicos.

Fase	Tensão confinante (MPa)	Tensão desvio	Nº de repetições
Condicionamento	0,07	0,07	500
	0,07	0,21	
	0,105	0,31	
Determinação dos Módulos de Resiliência	0,021	0,021	5 ou 10
		0,041	
		0,062	
	0,034	0,034	
		0,069	
		0,103	
	0,051	0,051	
		0,103	
		0,155	
	0,069	0,069	
		0,137	
		0,206	
	0,103	0,103	
		0,206	
		0,309	
	0,137	0,137	
		0,275	
		0,412	



a) Câmara Triaxial



b) LVDT's presos ao cp



c) Sistema pneumático e sistema de aquisição de dados

Figura 7.12 – Equipamento utilizado nessa pesquisa para execução dos ensaios triaxiais cíclicos – COPPE/UFRJ (Fotos do autor).

Na modelagem do MR dos materiais da presente pesquisa foram utilizados os modelos σ_3 (7.5.1), σ_d (7.5.2) e composto (7.5.3). Os parâmetros K para modelos σ_3 e σ_d foram obtidos diretamente dos relatórios fornecidos pelo sistema de aquisição de dados. A determinação dos parâmetros K para o modelo composto foi realizada transformando os parâmetros K dos modelos σ_3 e σ_d através de uma planilha de regressão desenvolvida por Ferreira (2002).

$$M_R = K_1 \cdot \sigma_3^{K_2} \quad (7.5.1)$$

$$M_R = K_1 \cdot \sigma_d^{K_2} \quad (7.5.2)$$

$$M_R = K_1 \cdot \sigma_3^{K_2} \cdot \sigma_d^{K_3} \quad (7.5.3)$$

A Tabela 7.8 apresenta os modelos usados nessa pesquisa para a determinação do módulo de resiliência, os parâmetros K fornecidos pelo sistema de aquisição de dados e pela planilha de regressão dos casos estudados. A adição do agregado calcinado não trouxe elevou consideravelmente o módulo do solo como pode observado na figura Figura 7.14. Na Tabela 7.9 é apresentado um resumo das condições de moldagem nos corpos-de-prova ensaiados.

Tabela 7.8 – Modelos, parâmetros K e valores de R^2 do solo laterítico e mistura solo-agregado desta pesquisa.

Amostra	$M_R = K_1 \cdot \sigma_3^{K_2}$ (MPa)			$M_R = K_1 \cdot \sigma_d^{K_2}$ (MPa)			$M_R = K_1 \cdot \sigma_3^{K_2} \cdot \sigma_d^{K_3}$ (MPa)			
	K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	K_3	R^2
SFL-01	666,2	-0,133	0,123	532,1	-0,275	0,710	789,4	0,290	-0,468	0,996
Solo-Agregado	478,1	-0,233	0,222	402,2	-0,381	0,793	585,9	0,279	-0,568	0,992

Tabela 7.9 – Condições dos corpos-de-prova ensaiados nesta pesquisa.

Amostra	Condições de ensaio		
	W (%)	Mea (g/cm³)	Energia
SFL-01	13,60	1,93	Modificada
Solo-Agregado	13,90	1,88	Modificada

7.5.3 Ensaios de deformação permanente

O estudo da deformação permanente foi realizado em corpos-de-prova de 10x20cm, moldados nas condições de umidade ótima e energia modificada. Para a realização desses ensaios foi utilizado o mesmo equipamento dos ensaios de módulo de resiliência, no módulo do sistema de aquisição de dados que foi desenvolvido na COPPE/UFRJ especialmente para este ensaio. Neste ensaio não existe a etapa de condicionamento e as deformações são medidas a partir do primeiro ciclo de carregamento. Cada carregamento tem a duração de 0,1s e repouso de 0,9 s.

Para os dois casos estudados, foi empregado o par de tensões desvio e de confinamento, iguais a 3,15 kgf/cm² e 1,05 kgf/cm³ respectivamente, “por serem

estes os níveis de tensões indicados para representar a solicitação média para base em pavimentos flexíveis” (Motta e Pinto, 1994).

Nos ensaios de deformação permanente não há um consenso na fixação do número de ciclos necessários para o fim do ensaio. Usualmente verifica-se durante o ensaio se há tendência ao acomodamento com sucessivos registros. Assim, alguns autores se limitaram a 10.000 ciclos, outros se estenderam a 100.000 ciclos (Guimarães, 2001). No presente estudo adotou-se um número de solicitação superior a 3×10^5 para os dois ensaios realizados.

Na Tabela 7.10 mostra-se as condições de umidade e compactação das amostras ensaiadas e na Figura 7.13 é apresentado o gráfico da deformação plástica específica por número de solicitações dos dois materiais estudados.

Tabela 7.10 – Condições dos corpos-de-prova ensaiados

Amostra	Condições de ensaio		
	W (%)	Mea (g/cm³)	Energia
SFL-01	13,70	1,93	Modificada
Solo-Agregado	13,90	1,88	Modificada

Na Tabela 7.11 estão apresentadas as equações de deformação permanente dos materiais deste estudo e as obtidas por Motta (1991) em uma argila laterítica pura e com a adição de 30% de uma brita granítica proveniente de Nova Iguaçu para o mesmo nível de tensões do adotado nesta pesquisa.

Observa-se que para N igual a 10^4 o solo laterítico SFL-01 apresentou deformação permanente 10,34 vezes menor do que o obtido por Motta (1991) para o solo puro. A introdução do agregado de argila calcinada trouxe uma sensível diminuição dessas deformações para os níveis de tensões adotados. Comparando os resultados obtidos para um N na ordem de 10^4 vê-se que as deformações plásticas específicas da mistura solo-agregado foram 2,8 vezes menores que as obtidas com o solo puro SFL-01. Se comparado com o solo-brita a deformação plástica específica na mistura solo-agregado foi 3,38 vezes menor. Esses resultados confirmam a boa qualidade do solo e da mistura solo-agregado para o uso na construção de bases de pavimentos. Cabe ainda ressaltar que, embora a deformação permanente do solo-agregado seja sensivelmente menor que a do solo fino laterítico do presente estudo, este

apresenta deformações permanentes muito baixas, sendo a deformação plástica ao final do ensaio de 0,74mm após 5×10^5 repetições.

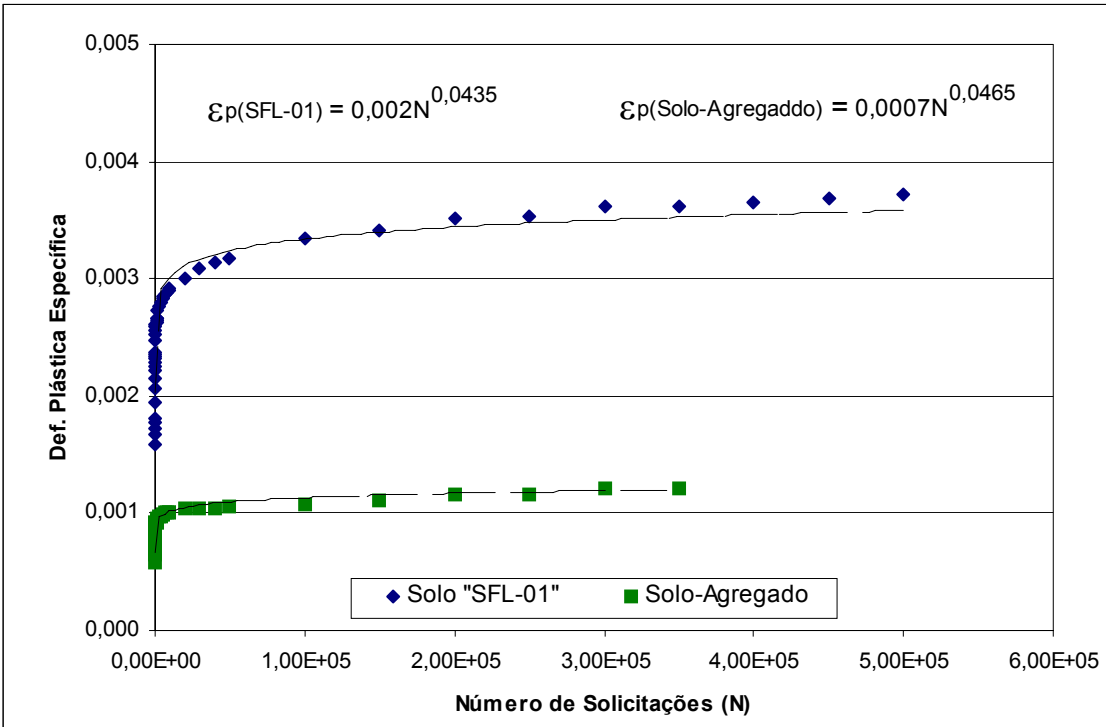


Figura 7.13 – Deformação plástica específica por número de solicitações dos materiais estudados.

Tabela 7.11 – Comparação entre a deformação plástica específica dos materiais estudados nesta pesquisa e os estudados por Motta (1991).

Material	$\varepsilon_p = AN^B$		$\varepsilon_p \text{ p/ } N = 10^4$
	A	B	
SFL-01 (este estudo)	0,0020	0,0435	0,003331
Solo-Agregado (este estudo)	0,0007	0,0465	0,001196
Solo puro (Motta, 1991)	0,0264	0,0230	0,034404
Solo-Brita (Motta, 1991)	0,0009	0,1305	0,004043

7.5.4 Influência dos carregamentos cíclicos no módulo de resiliência dos materiais estudados.

Com o intuito de avaliar a influência da aplicação de um número N de carregamentos no módulo de resiliência dos materiais estudados, procedeu-se, imediatamente após o ensaio de deformação permanente, a realização dos ensaios módulos de resiliência nos mesmos corpos-de-prova fazendo apenas a alteração no sistema de aquisição de

dados.

Assim como Guimarães (2001) e Marangon (2004), a intenção foi aproveitar o condicionamento causado pelo ensaio de deformação permanente e analisar o comportamento resiliente dos materiais estudados após um grande número de solicitações, de forma a poder compará-los com os resultados obtidos no ensaio convencional, que é feito após 1500 ciclos de condicionamento.

A Tabela 7.8 apresenta os modelos obtidos de módulo de resiliência, os parâmetros K permitem uma comparação dos resultados de módulo obtidos anteriormente com os obtidos após o ensaio de deformação permanente. No ensaio de deformação permanente o corpo-de-prova do solo SFL-01 foi submetido a um número de aplicações de carregamento igual a 5×10^5 e o corpo-de-prova da mistura solo-agregado a um número igual a $3,3 \times 10^5$. Esses resultados são melhor visualizados na Figura 7.14.

Tabela 7.12 – Modelos, parâmetros K e valores de R^2 do solo laterítico e mistura solo-agregado obtidos após o ensaio de deformação permanente.

Amostra		$M_R = K_1 \cdot \sigma_3^{K_2}$ (MPa)			$M_R = K_1 \cdot \sigma_d^{K_2}$ (MPa)			$M_R = K_1 \cdot \sigma_3^{K_2} \cdot \sigma_d^{K_3}$ (MPa)			
		K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	K_3	R^2
SFL-01	Antes	666,2	-0,1326	0,123	532,1	-0,2750	0,710	789,4	0,290	-0,468	0,996
	Após	689,3	-0,1341	0,079	493,3	-0,3276	0,634	849,6	0,377	-0,5576	0,996
Solo-Agregado	Antes	478,1	-0,2330	0,222	402,2	-0,3808	0,793	585,9	0,279	-0,568	0,992
	Após	1356,6	-0,3759	0,186	888,7	-0,7813	0,823	2067,5	0,436	-0,885	0,993

Observa-se que após o ensaio de deformação permanente o solo SFL-01 e a mistura solo-agregado apresentaram em relação ao ensaio tradicional módulos de resiliência mais dispersos. A mistura solo-agregado adquiriu considerável ganho de rigidez com a aplicação de um elevado número de repetições de cargas carregamentos apresentando valores médios de módulo de resiliência 4 vezes superiores ao ensaio tradicional.

A adição dos agregados calcinados não deve resultar em redução dos custos com a diminuição das espessuras das camadas, por não gerar, inicialmente, módulos de resiliência muito maiores que solo in natura, entretanto observa-se que sua inclusão é justificável visto que diminuiu em três vezes as deformações plásticas e produzirá bases mais rígidas no final da vida de projeto, portanto pode reduzir custos futuros

de manutenção e reforço do pavimento. Deve-se ressaltar que a inclusão de agregados em solos argilosos ainda reduz problemas de retração dos mesmos conforme relata Nogami e Villibor (1995).

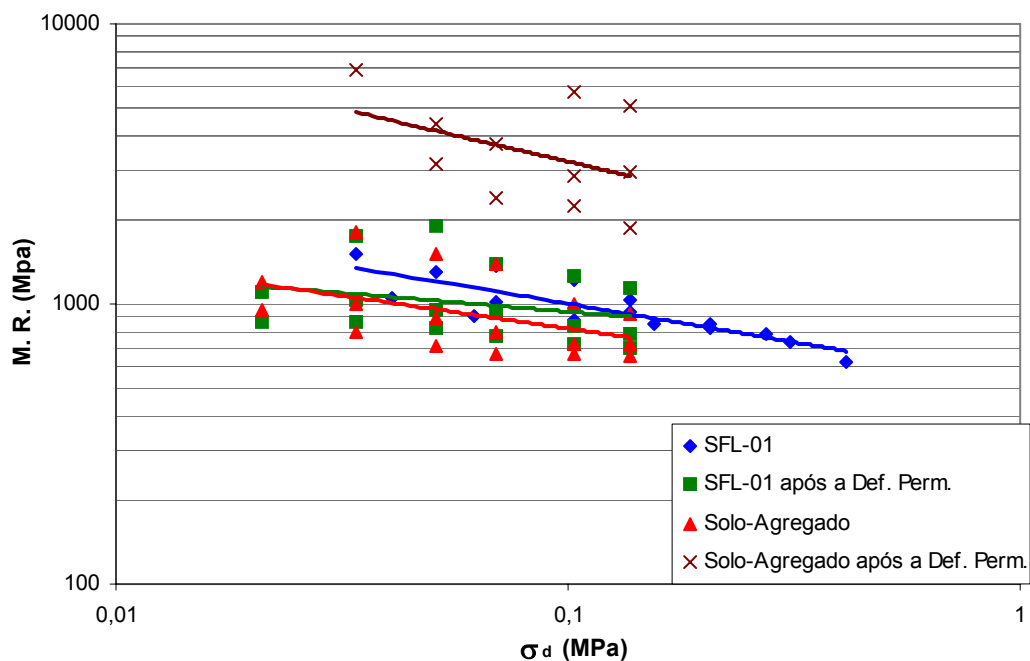


Figura 7.14 – Comparação dos módulos de resiliência para o modelo σ_d . nas duas condições de ensaio.

7.6 Aplicação dos resultados

A análise mecanística teve a finalidade de avaliar o desempenho da mistura asfáltica M1, mistura solo-agregado e o solo SFL-01, para condições de tráfego muito leve ($N=10^4$), leve ($N=10^5$) e médio ($N=10^6$). Optou-se em não estudar esses materiais para tráfego pesado devido à baixa densidade demográfica de volume de veículos que trafegam na região estudada nesta pesquisa. Foi considerado que os materiais estudados seriam aplicados sobre um subleito de baixo módulo de resiliência (tipo III, DNER, 1996).

7.6.1 Critérios de dimensionamento

As análises de tensões e deformações das estruturas propostas foi realizada utilizando o programa computacional FEPAVE2, considerando o modelo elástico linear (módulo de resiliência constante) para camadas de revestimento e subleito e o modelo elástico não-linear (modelo composto) para camada de base.

A partir de alguns dados de entrada, o programa FEPAVE2 forneceu a deflexão máxima admissível na superfície, deformação específica de tração, diferença de tensão no revestimento, tensão vertical no subleito e tensão de tração no revestimento. Estes resultados foram então comparados com os critérios de aceitação estabelecidos pelo autor para a aprovação ou reprovação da estrutura proposta.

Os dados de entrada usados, nesta análise, para o programa FEPAVE2 foram:

- i. Raio da área carregada: 0,108m;
- ii. Pressão na área carregada: 0,56MPa;
- iii. Número de camadas: 3 (revestimento, base e subleito);
- iv. Coeficientes de Poisson: 0.25 para o revestimento, 0.4 para base e 0.45 para o subleito;
- v. Código dos materiais: 1 (para mistura asfáltica - MR constante), 7 (modelo composto para base), 1 (MR constante para o subleito tipo III do DNER). Na Tabela 7.13 são mostrados os valores de módulo considerados neste estudo mecanístico.

Tabela 7.13 – Código dos materiais e valores de módulo de resiliência obtidos nos ensaios dinâmicos desta pesquisa.

Material	Código	K1	K2	K3	Módulo de resiliência (MPa)
Mistura asfáltica M1	1	-	-	-	4373
Solo SFL1	7	789,4	0,290	-0,468	-
Solo-Agregado	7	585,9	0,279	-0,568	-
Subleito Tipo III	3	-	-	-	53

Os critérios de aceitação das estruturas propostas neste estudo foram (Motta, 1991 e Magalhães, 2004):

- i. Deflexão máxima admissível na superfície em centésimo de mm (DNER PRO 269/94): obtida a partir da seguinte equação:

$$\text{Log } D_{\text{adm.}} = 3,148 - 0,188 \text{ Log } N_p \quad (7.6.1)$$

- ii. Diferença de tensões no revestimento em MPa ($\Delta\sigma$): Obtida a partir da equação do ensaio de fadiga para mistura M1 (7.6.2), e considerando um Fator Campo Laboratório (FCL) igual a 10^4 como sugere Pinto (1991):

$$N_p = 2,3 \cdot 10^3 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{2,85} \quad (7.6.2)$$

- iii. Tensão vertical admissível no subleito em MPa ($\sigma_{\text{vadm.}}$): obtida a partir da seguinte equação e considerando o módulo do subleito constante igual a 53 MPa (Tipo III) :

$$\sigma_{\text{vadm.}} = 0,006 \text{ MR}_{\text{médio}} / (1 + 0,7 \text{ Log } N) \quad (7.6.3)$$

Considerando que a tensão vertical admissível no subleito protege o mesmo de deformações excessivas foi considerada apenas a contribuição da deformação permanente na camada de base. Como critério de aceitação foi considerado que a contribuição a deformação permanente pela base que não poderia ser maior do que 1,0cm para as condições de tráfego consideradas neste projeto mecanístico. A deformação permanente da base ($\varepsilon_{\text{base}}$) foi determinada multiplicando-se o valor de deformação plástica específica, obtida nas equações de ensaios triaxiais deste estudo, pela espessura da camada de base.

A partir dos critérios acima mencionados e do número N de projeto adotado foram calculados os valores limites para cada intensidade de tráfego considerada, como mostra a Tabela 7.14.

Tabela 7.14 – Valores máximos admissíveis para as tensões e deformações para as estruturas analisadas.

Tráfego (N)	Critérios			
	D _{adm} (0,01 mm)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\sigma_{vadm-SL}$ (MPa)	ϵ_{base} (mm)
10 ⁴	245	15,12	0,08368	10
10 ⁵	159	6,74	0,07066	
10 ⁶	103	2,59	0,06115	

7.6.2 Alternativas analisadas e resultados

Adotou-se como 15cm a espessura mínima para a confecção da camada de base. Foram analisadas duas espessuras de revestimento (4 e 5cm) e uma espessura de base (15cm) considerando o uso do solo laterítico puro ou mistura solo-agregado totalizando quatro alternativas como mostra a Tabela 7.15

Tabela 7.15 – Estruturas estudadas neste projeto mecanístico.

Alternativa	Espessura das camadas (cm)			
	Revestimento (mistura M1)	Base de Solo SFL 01 puro	Base de Solo-Agregado (70-30)%	Subleito Tipo III (DNER)
I	4	15	-	432
II	4	-	15	
III	5	15	-	
IV	5	-	15	

Utilizando o FEPAVE2 (Versão macro do Excel), as equações da deformação plástica específica, considerando o método de análise determinístico e não considerando as tensões gravitacionais obtiveram-se os resultados mostrados na Tabela 7.16 para as alternativas analisadas.

Para a condição de umidade ótima verifica-se que todas alternativas analisadas atenderam aos critérios de dimensionamento com relativa margem de segurança, mesmo para $N=10^6$. Como foi dito no primeiro capítulo deste trabalho, nos pavimentos brasileiros as estruturas subjacentes ao revestimento normalmente apresentam umidade de equilíbrio próxima da ótima, que é condizente com a condição de umidade adotada neste estudo, entretanto vale ressaltar que devido às peculiaridades climáticas, geológicas e pedológicas da região seria interessante que em futuros trabalhos fosse avaliada a influência das variações sazonais na umidade do subleito

desta região. Devido ao fato dos solos do Acre serem predominantemente argilosos e de comportamento laterítico, conforme relata Villibor et al (2000), sugere-se também que em futuros trabalhos seja avaliada a retração dos solos selecionados pela classificação MCT para o uso em bases de pavimentos.

A análise mecanística mostrou que esses materiais apresentam características técnicas satisfatórias para serem utilizados em pavimentos. Os resultados desta análise comprovam que a classificação MCT aliada mecânica dos pavimentos leva a uma escolha diferente dos materiais para pavimentação pois simulam melhor o comportamento das camadas do pavimento sob a ação do tráfego e variações sazonais que os métodos empíricos comumente usados no Estado do Acre, permitindo o melhor aproveitamento dos materiais locais e conseqüentemente a construção de pavimentos mais econômicos.

Tabela 7.16 – Resultados das análises feitas com utilização do FEPAVE2 e equações de deformação plástica específica dos materiais deste estudo.

Alternativa	Parâmetros Calculados	Resultados obtidos	Critérios de aceitação		
			N=10 ⁴	N=10 ⁵	N=10 ⁶
I	D (0,01mm)	51	245	159	103
	$\sigma_{vadm-SL}$ (MPa)	0,053	0,083	0,070	0,061
	$\Delta\sigma$ (MPa)	0,38	15,12	6,74	2,59
	ϵ_{base} (mm)	0,5* / 0,5** / 0,6***	10	10	10
II	D (0,01mm)	52	245	159	103
	$\sigma_{vadm-SL}$ (MPa)	0,050	0,083	0,070	0,061
	$\Delta\sigma$ (MPa)	0,15	15,12	6,74	2,59
	ϵ_{base} (mm)	0,2* / 0,2** / 0,2***	10	10	10
III	D (0,01mm)	47	245	159	103
	$\sigma_{vadm-SL}$ (MPa)	0,044	0,083	0,070	0,061
	$\Delta\sigma$ (MPa)	0,79	15,12	6,74	2,59
	ϵ_{base} (mm)	0,5* / 0,5** / 0,6***	10	10	10
IV	D (0,01mm)	49	245	159	103
	$\sigma_{vadm-SL}$ (MPa)	0,051	0,083	0,070	0,061
	$\Delta\sigma$ (MPa)	0,35	15,12	6,74	2,59
	ϵ_{base} (mm)	0,2* / 0,2** / 0,2***	10	10	10

* N=10⁴, ** N=10⁵, ***N=10⁶

A base de Solo-Agregado, pela questão custo-benefício, mostrou-se mais adequada para o uso em obras com tráfego pesado, muito pesado e aeródromos visto que o solo laterítico in natura atendeu satisfatoriamente ao critério de deformação permanente para baixo e médio volume de tráfego.

Deve-se ressaltar que a adição de agregados de argila calcinada parece ser promissora principalmente quando o solo laterítico disponível não apresentar características tão nobres quanto o que foi usado neste estudo. Vale lembrar que o estado do Acre é predominantemente constituído por argilas lateríticas, conforme mostrado na Figura 1.2, portanto a adição de agregados calcinados pode ser uma importante alternativa na prevenção de defeitos construtivos. Sugere-se que em futuras pesquisas seja verificado o comportamento mecânico dos solos lateríticos argilosos do Acre sob o aspecto de retração e variação da umidade após a compactação, com e sem adição de agregados artificiais.

CAPÍTULO 8

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O objetivo principal desta pesquisa foi estudar o emprego de agregados artificiais de argila calcinada na composição de mistura asfáltica e base de solo-agregado no Acre. Foi utilizada a classificação MCT e a mecânica dos pavimentos como fator de decisão da aplicabilidade dos materiais estudados em obras rodoviárias deste estado.

Como principais conclusões, apresentam-se:

1. A análise mecanística mostrou que os materiais estudados nesta pesquisa (agregado calcinado AGC23 e solo laterítico argiloso SFL-01) apresentaram características técnicas satisfatórias para serem utilizados em pavimentos rodoviários e urbanos, sendo possível dimensionar com eles estruturas esbeltas para condições de tráfego médio, mesmo para condição de baixa qualidade de subleito (tipo III, DNER, 1996), o que confirma que a classificação MCT aliada à mecânica dos pavimentos leva a uma melhor escolha dos materiais para pavimentação e simulam melhor o comportamento das camadas do pavimento sob a ação do tráfego que os métodos empíricos comumente usados no Estado do Acre;
2. Os parâmetros volumétricos VV e RBV, utilizados na obtenção do teor ótimo de misturas asfálticas convencionais, não se aplicam para mistura asfáltica com agregado calcinado. Portanto a metodologia de dosagem teve que ser adaptada, consistindo na verificação do comportamento físico e mecânico de três teores de ligante (7,5; 8,5 e 9,5%). Os resultados dessa verificação mostraram que a mistura asfáltica confeccionada com 79%

de argila calcinada a 1050°C, 21% de areia e com teor de 7,5% de ligante apresentou comportamento mecânico satisfatório.

3. A mistura asfáltica com agregados calcinados e teor de 7,5% de ligante quando compactada apresentou elevado percentual de vazios (11,79%), mesmo assim apresentou coeficiente de permeabilidade da mesma ordem de grandeza de uma mistura convencional e bem abaixo do que recomenda a NCHRP (TRB, 2004) que é de $1,25 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$. Os resultados do ensaio de permeabilidade e a literatura pesquisada, mostraram que esta grandeza é muito mais influenciada pela granulometria da mistura e espessura da camada do que pelo percentual de vazios.
4. O condicionamento de curto prazo aplicado no estudo de misturas asfálticas desta pesquisa (2h na temperatura de compactação) deu indícios de que o teor de asfalto absorvido na mistura é em parte função do tempo de condicionamento térmico. Observou-se um aumento significativo do número de agregados calcinados não envolvidos por asfalto após esta etapa. Analogamente é de se esperar que ocorra neste tipo de mistura um comportamento semelhante durante a usinagem e transporte numa situação de campo.
5. Com relação a adesividade dos agregados, o uso de 0,5% DOPE apresentou resultados satisfatórios para o método empírico do DNER-ME 078/94. Já no método AASHTO T-283/89 esta adição não trouxe ganho na resistência a tração retida por umidade induzida.
6. O solo laterítico argiloso estudado nesta pesquisa e compactado na energia modificada e umidade ótima apresentou módulo de resiliência adequado para o uso em bases.
7. A deformação específica permanente do solo laterítico argiloso, para os níveis de tensões atuantes em bases de pavimentos, foi baixa, da ordem de 0,74mm para um nível de 5×10^5 repetições de carga em um corpo-de-prova cilíndrico de 20cm de altura. A adição de 30% em massa seca de agregados calcinados a 850°C neste solo reduziu em cerca de um terço as

deformações permanentes do mesmo.

8. O estudo mecanístico mostrou que a utilização do solo laterítico puro atende perfeitamente aos critérios de projeto para tráfego médio. Por questões de custo a base de solo agregado deve ser empregada em obras com tráfego pesado, muito pesado e aeródromos.
9. Os ensaios preliminares mostraram que propriedades como porosidade, absorção, densidade e resistência mecânica são muito influenciadas pela temperatura de queima e pela matéria-prima (solo argiloso) escolhida para a produção do agregado calcinado. Portanto o uso mais racional dos solos escolhidos bem como da temperatura de queima pode trazer considerável ganho de economia e qualidade na produção de agregados calcinados.
10. Os ensaios preliminares e a identificação das características químicas, físicas e mineralógicas dos solos estudados permitiram a otimização destes na fabricação de um agregado de melhor qualidade, que foi obtido através da mistura de duas das amostras estudadas. Os ensaios de análise térmica diferencial e termogravimétrica permitiram a interpretação do comportamento térmico desta mistura, de forma que se pôde identificar em quais temperaturas ocorriam as transformações energéticas responsáveis pelas modificações de propriedades dos agregados calcinados com esta massa de maneira a poder se prever melhores usos para esta mistura.
11. As instalações industriais visitadas e os sistemas de produção de agregados leves podem ser adequados à produção de agregados calcinados. Entretanto ressalta-se novamente que devido à diferença na temperatura de trabalho dos fornos desses sistemas é de se esperar agregados com propriedades distintas, inclusive em relação à posição relativa dos materiais durante a queima.

Como sugestões para o desenvolvimento de pesquisas futuras, apresentam-se:

1. gerar um banco de dados que correlacione características físicas, químicas e mineralógicas de diversas argilas com propriedades como porosidade, absorção e módulo de ruptura em pelo menos duas temperaturas (800

e 1100°C por exemplo) de maneira a se obter faixas de variações de características (semelhantes às citadas por Santos,1989a) para prever o uso de argilas desconhecidas na produção de agregados calcinados para obras de pavimentação, sendo que sua aplicabilidade poderia ser dividida em agregados para base e para mistura asfáltica.

2. estudar a aplicabilidade de pedologia e da classificação MCT na busca de materiais que levem a agregados calcinados mais adequados para pavimentação com menores custos;
3. estudar o processo produtivo, como por exemplo o efeito do tipo de britador na forma do agregado calcinado;
4. verificar a influência da viscosidade do ligante e heterogeneidade dos agregados calcinados no teor de asfalto efetivo de misturas asfálticas;
5. Apurar a dosagem de misturas asfálticas com agregados calcinados, e o efeito de doses; avaliar o efeito da cal na adesão;
6. avaliar o comportamento mecânico dos solos lateríticos argilosos do Acre sob o aspecto de retração e variação da umidade após a compactação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials, 1989, T 283, "Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage". Washington, D. C.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990, NBR 6220, "Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e massa específica aparente da parte sólida de Materiais Refratários Densos". Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984, NBR 6508, "Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica".
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004, NBR 15087, "Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral".
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984, NBR 7180, "Solo - Determinação do limite de plasticidade".
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984, NBR 6508, "Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica".
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984, NBR 7181, "Solo - Análise granulométrica".
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984, NBR 6459, "Solo - Determinação do limite de liquidez".
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997, NBR 6113, "Materiais Refratários Densos Conformados – Determinação da Resistência à Flexão à Temperatura Ambiente".

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1996, NBR 7182, “Solo - Ensaio de compactação”.

ALEXANDRE, J., 1997, **Caracterização das Argilas do Município de Campos dos Goytacazes para a Utilização em Cerâmicas Vermelhas**. Tese de Mestrado, UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

ALEXANDRE, J., 2004, Comunicação pessoal.

ALEXANDRE, J.; XAVIER, G. C.; FLOR, A. L. M., 2004, “Incorporação da Cal na Massa de Conformação de Cerâmica Vermelha”. In: **Cd Room do 48º Congresso Brasileiro de Cerâmica**. ABCERAM, Curitiba, PR.

ARGEX, 2004, Catálogo de produtos, disponível em <http://www.argex.com.pt/>, capturado em dezembro de 2004.

ASPHALT INSTITUTE, 1962, **Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types**. Série do Manual nº 2 (MS-2), EUA.

ASTM - American Society for Testing and Materials, 2000, D 2041, “Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures”.USA.

ASTM - American Society for Testing and Materials, 2001, C 127, “Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate”. USA.

ASTM - American Society for Testing and Materials, 2001, C 128, “Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate”. USA.

BATISTA, F.G.S., 2004, **Caracterização Física e Mecanística dos Agregados de Argila Calcinada Produzidos com Solos Finos da BR-163/PA**. Tese de Mestrado, IME, Rio de Janeiro, RJ.

- BÓ, M. D.; NEVES, W.; AMARAL, S., 2002, "Substituição do Mercúrio por Água na Determinação da Densidade Aparente do Suporte Cerâmico Cru". **Cerâmica Industrial**. Disponível em <http://www.ceramicaindustrial.org.br/>, capturado em junho de 2004.
- CABRAL, G.L.L, 2005, **Metodologia de Produção e Emprego de Agregados de Argila Calcinada para Pavimentação**, Tese de Mestrado, IME, Rio de Janeiro, RJ.
- CABRAL, G.L.L.; SOARES, AL.C.P; BATISTA, F.G.S., 1998, **Estudo de Viabilidade Técnica do Uso do Agregado de argila Calcinada na Região de Urucu (AM)**. Projeto de Fim de Curso, IME, Rio de Janeiro, RJ.
- CASTELO BRANCO, V. T. F., 2004, **Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado**. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- CINEXPAN, 2004, Disponível, www.cinexpan.com.br, capturado em julho de 2004.
- COSTA, F.W.A; SILVA, M.A.V; MELLO, M.A., 2000, **Agregado de Argila Calcinada da Amazônia: Análise dos Parâmetros de Fadiga e Resiliência em Misturas Asfálticas**. Projeto de Fim de Curso, IME, Rio de Janeiro, RJ.
- DNC - Departamento Nacional de Combustíveis, 1993, "Portaria DNC 5 de 18 de fevereiro". Regulamento Técnico de Especificação de Cimento Asfáltico de Petróleo.
- DIAS, F. J.; AGOPYAN, V.; BERNUCCI, L. L. B; SILVA, T. J., 2004, "Procedimento Alternativo Para Otimizar Misturas de Solo-Agregado". In: **Cd Room da 35º RAPv**. ABPv. Rio de Janeiro, RJ.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1996, **Manual de Pavimentação**. 2ª Ed., Rio de Janeiro, RJ.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1998, ME 081/98 "Agregados: determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo", Rio de Janeiro, RJ.

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1994, 133/94 “Misturas Betuminosas: Determinação do Módulo de Resiliência”, Rio de Janeiro, RJ.

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1998, ME 035/98 “Agregados: determinação da abrasão Los Angeles”, Rio de Janeiro, RJ.

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1994, ME 078/94 “Agregado Graúdo: adesividade ao ligante betuminoso”, Rio de Janeiro, RJ.

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1989, ES 227/89, “Agregados sintéticos graúdos de argila calcinada: emprego em obras rodoviárias”, Rio de Janeiro, RJ.

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1994, ME 258/94, “Solos compactados em equipamento miniaitura Mini-MCV”, Rio de Janeiro, RJ.

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1994, PRO 269/94, “Projeto de restauração de pavimento Flexíveis”, Rio de Janeiro, RJ.

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1994, ES 256/94, “Solos compactados em equipamento miniaitura: determinação da perda de massa por imersão”, Rio de Janeiro, RJ.

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1994, ES 225/94, “Agregados sintéticos graúdos de argila calcinada: determinação da perda de massa após fervura”, Rio de Janeiro, RJ.

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1994, EM 230/94 “Agregados sintéticos graúdos de argila calcinada”, Rio de Janeiro, RJ.

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1998, ME 035/98 “Agregados: determinação da abrasão Los Angeles”, Rio de Janeiro, RJ.

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1989, ME 222/89 “Agregados sintéticos graúdos de argila calcinada: desgaste por abrasão”, Rio de Janeiro, RJ.

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1981, **Pesquisa de Viabilidade de Implantação da Fábrica de Argila Expandida na Região Amazônica**. Relatório Final, IPR/Divisão de Pesquisas, Rio de Janeiro, RJ.

DNIT- Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre, 2004, mapa rodoviário do Acre, disponível em www.dnit.gov.br, capturado, 05/2004.

DWEK, J., 2004, Relatório do ensaio de DTA e DTG. Escola de Química da UFRJ.

FERREIRA, J. G. H. M., 2002, **Elaboração e Análise da Base de Dados de Ensaio Triaxiais Dinâmicos da COPPE/UFRJ**. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

FRITZEN, M. A., 2004, Mistura asfáltica caracterizada por este autor. Tese de Mestrado em Andamento, COPPE/UFRJ.

FUNTAC - Fundação de Tecnologia do Estado do Acre; IEL - Instituto Evaldo Lodi/ Núcleo Regional, 1990, “Diagnóstico das Indústrias Cerâmicas de Rio Branco”. Relatório Técnico. Rio Branco, AC.

FUNTAC - Fundação de Tecnologia do Estado do Acre, 1999, “Setor Cerâmico do Vale do Acre”. Relatório Técnico. Rio Branco, AC.

FURLAN, A. P.; GOUVÊA, L. T.; FABBRI, J. L.; FERNANDES, Jr., 2004, “Influência de Características dos Agregados na Suscetibilidade a Dano por Umidade de Misturas Asfálticas”. In: **17º Encontro de Asfalto**. IBP, Rio de Janeiro, RJ.

FRANCO, F. A. C. P., 2000, **Um Sistema para Análise Mecanística de Pavimentos Asfálticos**. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

GUIMARÃES, A. C., 2001, **Estudo da Deformação Permanente de Solos e a Teoria do Shakedown Aplicada a Pavimentos Flexíveis**. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

GUIMARÃES, A. C., MOTTA, L. M. G., 2000, “Execução de Revestimento Asfáltico com Agregado de Laterita Lavada no Acre”. In: **15º Encontro de Asfalto**. IBP, Rio de Janeiro, RJ.

GONÇALVES, W. **Curso de Tecnologia em Cerâmica Vermelha**. SENAI, Piauí.

HAIDYTE, 2004, Disponível em www.hpbhaydite.com/haydite_properties.htm, capturado, 08/2004.

I.A. – Instituto de Asfalto, 2001, **Tradução do Manual de Asfalto**. Série do Manual nº 4 (MS-04), Edição de 1989, Rio de Janeiro, RJ.

IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias e ECL – Engenharia, Consultoria e Economica, 1986, “Desenvolvimento da usina protótipo Móvel para Fabricação de Agregados de Argila” In: **21º RAPv, Vol. II**. ABPv. Rio de Janeiro, RJ.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, 1996, “Recuperação de gases Quentes em Fornos Intermitentes. Aplicação na Indústria da Cerâmica Estrutural” **Cerâmica Industrial: Volume 1, Número 5 - Maio/Junho**. Disponível em <http://www.ceramicaindustrial.org.br/>, capturado em junho de 2004.

LAYTAG, 2004, Disponível, www.lytag.co.uk/pages/Lytag.asp, capturado em janeiro de 2005.

LDH - Louisiana Departament of Highways, 1969, “Highway Research : Expanded Clay Hot Mix Study”. Final Report – Part I, Louisiana, EUA.

LEHMKUHL, W. Jahn, T.; Kawaguti, W. M.; Dadan, A.; De Lorenzi, R.; Fonseca, L., 2004, “Instrumentação e Medição de Temperaturas de uma Carga de Tijolos no Interior de um Forno Contínuo tipo Túnel”. In: **Cd Room do 48º Congresso Brasileiro de Cerâmica**. ABCERAM, Curitiba-PR.

MAGALHÃES, S. T., 2004, **Misturas Asfálticas de módulo Elevado para Pavimentos de Alto Desempenho**. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

MAQTHERM. Catálogo de produtos, 2004.

MARANGON, M., 2004, **Proposição de Estruturas Típicas de Pavimentos para Região de Minas Gerais Utilização Solos Laterítico Locais a Partir da Pedologia, Classificação MCT e Resiliência**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

MARQUES, G. L. O., 2001, **Procedimentos de Avaliação e caracterização de Agregados Minerais Usados na Pavimentação Asfáltica**. 1º Seminário de Qualificação ao Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

MARQUES, G. L. O; MOTTA, L. M. G. ; CASTELO BRANCO, V. T. F., 2004, “Análise Comparativa de Procedimentos Distintos Para a Determinação da Massa Específica de Misturas Asfálticas”. In: **Cd Room da 35º RAPv**. ABPv. Rio de Janeiro, RJ.

MEDINA, J., 1997, **Mecânica dos Pavimentos**. 1ª Ed., Rio de Janeiro, Editora UFRJ.

MELLO, R. M.; OLIVEIRA, A. A., 2004, “A Influência do Sistema de Vácuo nas propriedades físicas dos Produtos de Cerâmica Vermelha”. In: **Cd Room do 48º Congresso Brasileiro de Cerâmica**. ABCERAM, Curitiba-PR.

MENDES, C. J., 2004, Relatório do Ensaio de Florescência de Raios-X. Instituto de Geologia da UFRJ.

MOURÃO, F. A. L., 2003, **Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Tipo SMA**. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

MOTTA, L. M. G., 1991, **Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

MOTTA, L. M. G.; PINTO, S., 1994, “Três Estudos de Ensaio Dinâmico Usados como Fator de Decisão na Escolha de Materiais em Pavimentação”. In: **28º RAPv**. ABPv, Belo Horizonte, MG.

- MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A. ; CABRAL, M. J., 2001, "As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos". **Cerâmica Industrial: Volume 6, Número 2 - Março/Abril**. Disponível em <http://www.ceramicaindustrial.org.br/>, capturado em junho de 2004.
- NCHRP - NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. TRB, 2004, "Relationship of air Voids, Lift Thickness, and Permability in Hot Mix Asphalt Paviments ". Repot 531.
- NOGAMI, J.S.;VILLIBOR, D.F., 1995, **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. 1ª Ed., São Paulo, SP, Ed. Villibor.
- PINTO, S., 1991, **Estudo do Comportamento a Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ.
- PINTO, S., 1996, **Materiais Pétreos e Concreto asfáltico: Conceituação e Dosagem**. IME. Rio de Janeiro, RJ.
- PRACIDELLI, S.; MELCHIADES G. F., 1997, "Importância da Composição Granulométrica de Massas para a Cerâmica Vermelha". **Cerâmica Industrial: Volume 2, Número 1/2 - Janeiro/Abril**. Disponível em <http://www.ceramicaindustrial.org.br/>, capturado em junho de 2004.
- RIELLA, H.G.; FRANJNDLICH, E.U. de C.; DURAZZO; M., 2002, "Caracterização e Utilização de Fundentes em Massas Cerâmicas". **Cerâmica Industrial: Volume 7, Número 3 - Maio/Junho**. Disponível em <http://www.ceramicaindustrial.org.br/>, capturado em dezembro de 2004.
- SÁ, M. F. P., 2003, **Contribuição ao Estudo da Influência do Tráfego na Infra-Estrutura Viária com Misturas Asfáltica para Corredores de Ônibus**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- SANTOS, P. S., 1989a, **Ciência e Tecnologia das argilas de Argilas**. 2ª Ed., Vol. 02, São Paulo, Edgard Blucher Ltda.

- SANTOS, P. S., 1989b, **Ciência e Tecnologia das argilas de Argilas**. 2ª Ed., Vol. 01, São Paulo, Edgard Blucher Ltda.
- SEIXAS, S., 1997, **Comportamento Dinâmico dos Materiais Componentes do Pavimento da Pista de Pouso do Novo Aeroporto de Rio Branco**. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- SOUZA, A. M.; RAMOS, C. R.; GUARÇONI, D. S., MOTTA, L. M. G.; LAO, A. L. E. S., 1995, **Curso de Técnicas de Laboratório em Ligantes e Misturas Asfálticas**. IBP, Rio de Janeiro, RJ.
- VIANNA, A. A. D., 2002, **Contribuição para o estabelecimento de um Material Padrão e de Metodologia para a Calibração de Equipamentos de Ensaio Dinâmicos**. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- VIEIRA, A., 2000, **Agregados de Argila Calcinada: Produção e Utilização em Pavimentação Rodoviária na Amazônia**. 1º Seminário de Qualificação ao Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. ; DUAİLBI, J. F, 2001, "Formulação de massa de Revestimento Cerâmico com Argilas Plásticas de Campos de Goytacazes (RJ) e Taguá (SP)". **Cerâmica Industrial: Volume 6, Número 6 - Novembro/Dezembro**. Disponível em <http://www.ceramicaindustrial.org.br/>, capturado em dezembro de 2004.
- VIEIRA, C. M. F.; HOLANDA, J. N. F. E; PINATTI, D. G., 2004, "Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes – RJ". In: **Cd Room do 48º Congresso Brasileiro de Cerâmica**. ABCERAM, Curitiba-PR.
- VILLIBOR D. F.; NOGAMI, J. S.; BELIGNI, M. e CINCERRE, J. R., 2000, **Pavimentos com Solos Lateríticos e Gestão e Manutenção de Vias Urbana**. ABPV/UFU. São Paulo, SP.

ZEE – Zoneamento Ecológico e Econômico no Estado do Acre, 1999. Disponível em <http://www.ac.gov.br/>, capturado em janeiro de 2005.

ZUCCO, 2004, Equipamentos Cerâmicos. Catálogo de produtos. Brusque, SC.

ANEXO A

**MAPA POLÍTICO DO ACRE E OCORRÊNCIAS
ROCHOSAS NESTE ESTADO.**

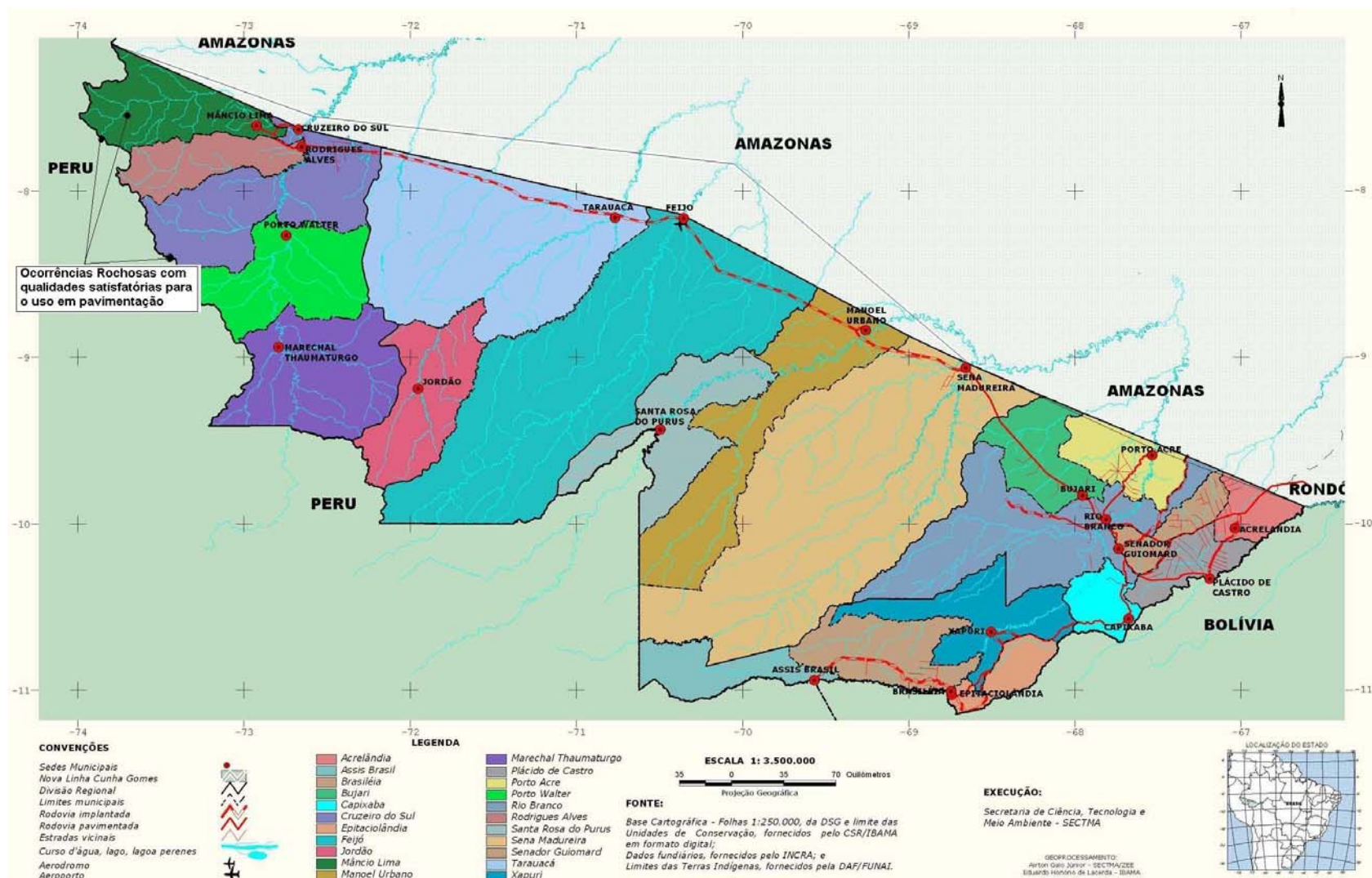
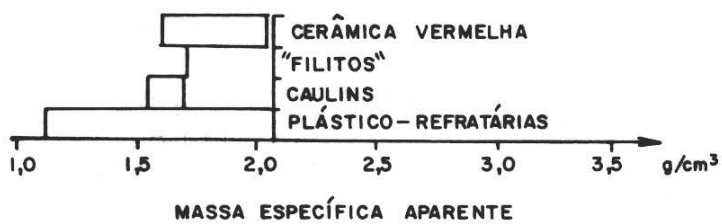
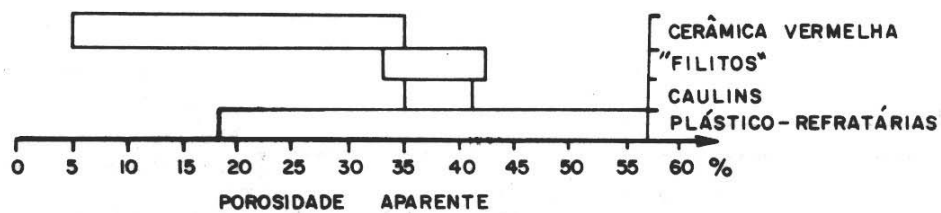
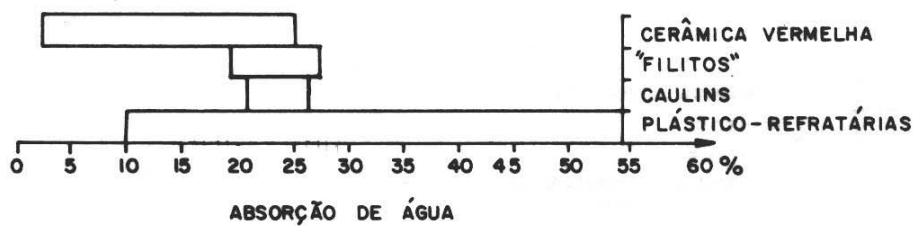
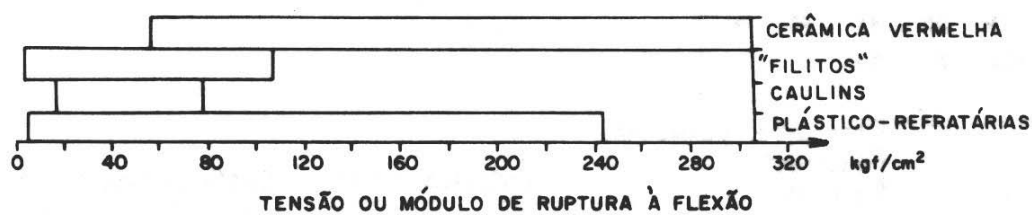


Figura - A.1 Mapa político do Acre e ocorrências rochosas neste estado (ZEE, 1999 modificado).

ANEXO B

**FAIXAS DE VARIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS
CERÂMICAS DE ARGILAS-PADRÃO BRASILEIRAS
APÓS QUEIMA A 950°C**



Faixas de variação das características cerâmicas de argilas-padrão brasileiras após queima a 950°C (Santos, 1989a)

ANEXO C

**DIFRATOGRAMAS DE RAIOS-X DOS SOLOS
ESTUDADOS**

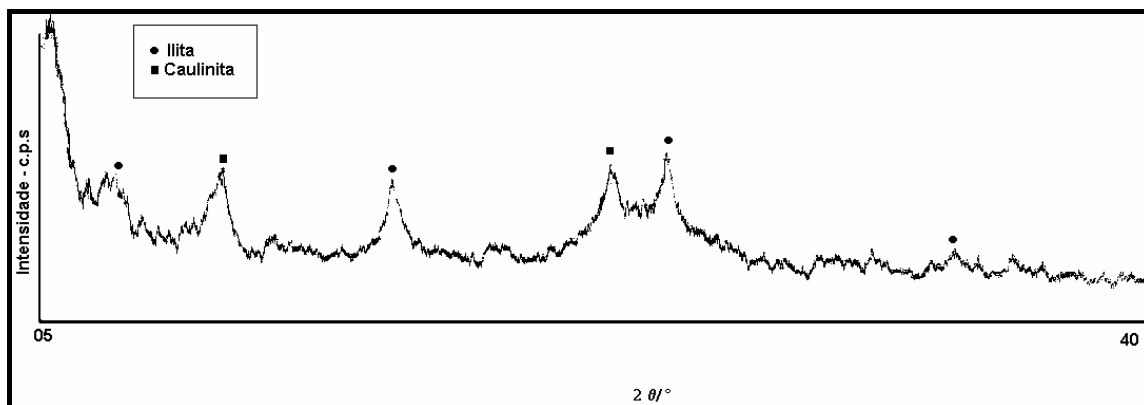


Figura A.2 – Difratoograma de raios-X da “amostra 01”

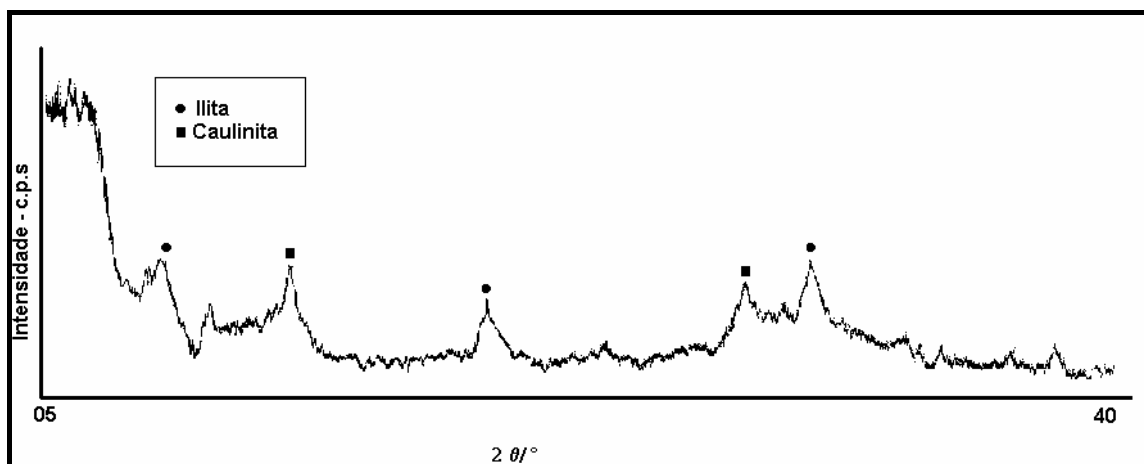


Figura A.3 – Difratoograma de raios-X da “amostra 02”

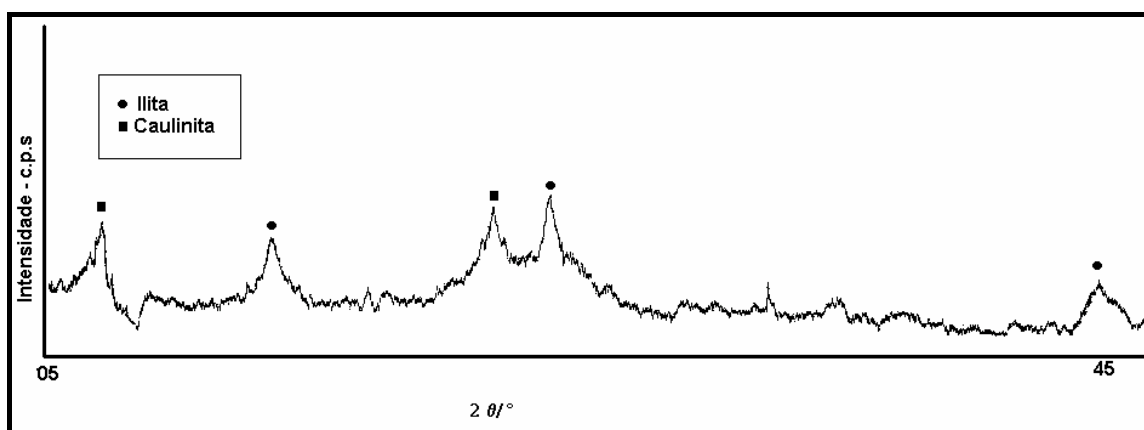


Figura A.4 – Difratoograma de raios-X da “amostra 03”