

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
CIVIL**

**O EFEITO DA TEMPERATURA DE QUEIMA NO AGREGADO
SINTÉTICO DE ARGILA CALCINADA, APLICADO EM
CONCRETO ASFÁLTICO**

ARLENE MARIA LAMÊGO DA SILVA CAMPOS

**MANAUS
2008**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
CIVIL**

ARLENE MARIA LAMÊGO DA SILVA CAMPOS

**O EFEITO DA TEMPERATURA DE QUEIMA NO AGREGADO
SINTÉTICO DE ARGILA CALCINADA, APLICADO EM CONCRETO
ASFÁLTICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós – Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração em materiais.

Orientador: Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo

MANAUS
2008

ARLENE MARIA LAMÊGO DA SILVA CAMPOS

**O EFEITO DA TEMPERATURA DE QUEIMA NO AGREGADO
SINTÉTICO DE ARGILA CALCINADA, APLICADO EM CONCRETO
ASFÁLTICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós – Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração em materiais.

Aprovada em, 19/08/2008.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Wilson Conciani
CEFET/MT

Prof. Dr. Raimundo Kennedy Vieira
Universidade Federal do Amazonas

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me fazer crer nos ideais e conquistas;

Aos meus pais, pelos valores e educação ofertados;

À minha família, por compreenderem minha ausência ao longo desse trabalho;

A todos os meus familiares pelas palavras de incentivo;

Aos meus mestres, em especial meu orientador, professor Dr. Nilton Campelo, pela contribuição valiosa para elaboração deste trabalho;

Aos amigos do IPR, em especial ao Engenheiro Jorge Augusto, Heloísa e Tânia, pela ajuda bibliográfica;

Ao amigo do extinto DNER, Engenheiro Rivaldo Cafagni, pela ajuda bibliográfica;

Ao professor Dr. Rogério Coelho Lopes, pelo exemplo de profissionalismo;

Ao professor da ULBRA, Dr. Benedito Carneiro, pela indicação no programa de mestrado;

Ao professor e amigo Edson Andrade, incentivador constante de todas as horas;

Ao Geólogo Gato, do Serviço Geológico do Brasil, pela ajuda bibliográfica;

Ao professor da CEFET, Mauro Barreto, pela disponibilidade dos equipamentos do laboratório de Mecânica dos Solos;

Aos amigos que fiz durante o curso de mestrado dessa instituição, em especial ao Francisco Aleixo, Edisley Cabral, Samantha Pinheiro, Otávio Paiva e Alberto Taveira, pela colaboração grandiosa;

Aos colegas do DNIT, pelas palavras otimistas;

À Superintendência Regional do DNIT/AM/RR, pela concessão do horário especial de trabalho, indispensável para conclusão desse projeto de mestrado;

Aos professores da UFAM, Dr. Edinaldo e Dra. Adriana Horbe, pela contribuição e ajuda na realização dos ensaios de difração de raios-x;

Às professoras da UFAM, Ellen e Annunziata, pela disponibilidade do laboratório de Hidráulica e Saneamento;

Ao Instituto Nokia de Tecnologia (INDT), em especial aos profissionais Eng. Idécio, Eng. Daniele Rolim e Eng. Francis Darsie, pela realização dos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectrometria por Energia Dispersiva (EDS);

Aos amigos Antônio Reynaldo e Francisco Santos (carinhosamente conhecido como Zeca), técnicos do laboratório de pavimentação da UFAM, pelo apoio na realização dos ensaios;

A todos, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse sonho, meu muito obrigado.

Enquanto o preconceito divide e gera ódio, a compaixão aproxima e traz vida. Amar a Deus, de fato, não é outra coisa que ter compaixão e fazer-se próximo de todos, sobretudo dos mais necessitados.

Pe. Paulo Bazaglia, ssp

RESUMO

A Região Amazônica apresenta altos custos nos serviços de pavimentação, principalmente pela carência de material pétreo, cujas ocorrências são pedra britada ou seixo rolado, distantes dos locais de consumo. O agregado graúdo frequentemente usado nessa região é o seixo rolado, extraído do leito dos rios, distante não menos que 450 km dos grandes centros de consumo, fazendo com que os custos com transporte respondam por cerca de 50% do preço final do produto. Na busca de um material alternativo e não convencional que pudesse substituir o seixo ou a pedra britada, estudou-se a argila, considerada um recurso mineral abundante, sobretudo na Região Amazônica. A argila utilizada neste estudo provém de área de várzea, localizada no município de Manacapuru, estado do Amazonas. Buscou-se reproduzir, em laboratório, o processo produtivo adotado pela indústria cerâmica, evidentemente que de forma manual e bastante artesanal. Para tanto, utilizou-se um moinho, composto de três boquilhas quadradas e móveis, de dimensões de 12,7 mm, 9,5 mm e 4,8 mm. Parte do agregado produzido na fração de 4,8 mm foi triturado para obtenção da fração correspondente a 2,0 mm. Os agregados produzidos foram calcinados a 780 °C, 850 °C, 950 °C, 1.050 °C e 1150 °C e caracterizados segundo perda de massa após fervura, absorção, massa específica, desgaste por abrasão Los Angeles, adesividade a ligante betuminoso, análise química, mineralógica e microscopia eletrônica de varredura. Os agregados calcinados a 850 °C, 950 °C, 1.050 °C e 1150 °C foram aplicados em concreto asfáltico e enquadrados na faixa C do DNIT. Foi feita uma análise comparativa entre o CBUQ convencional (com seixo) e com agregado sintético, cujos parâmetros analisados foram estabilidade, fluência, resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência. Os resultados mostraram que o agregado resultante da calcinação a 780 °C apresentou-se mais absorcivo que os demais. O CBUQ confeccionado com o agregado calcinado a 850 °C necessitou de mais ligante que os CBUQs confeccionados com seixo ou agregados sintéticos em outras temperaturas. Foi observado que o incremento de temperatura provocou redução nas massas específicas reais dos agregados, em razão da existência de elementos expansivos na matéria-prima analisada. Os resultados mostraram, também, que todas as misturas confeccionadas com agregado sintético apresentaram maiores estabilidades, comparadas à mistura convencional, tornando tecnicamente viável para essa região, a construção de revestimentos asfálticos com tais agregados.

Palavras chave: Agregado sintético; argila calcinada; concreto asfáltico; temperatura de queima.

ABSTRACT

The Amazon Region presents high costs concerning pavement services, mainly because of its petro-material lack, that occurs with pebbles or river gravel which are distant from the consumption location. The frequently used coarse aggregate in this region is the river gravel, taken from the river bed, with an at least 450 km distance from the great consumption centers, resulting in a high transportation fee approaching 50% of its final product cost. Searching for an alternative and non-conventional material which could replace the river gravel or the pebble, the clay was studied due to its mineral abundance in the Amazon region. The utilized clay in this study is from floodplain areas located in the city of Manacapuru, in the State of Amazonas. The productive process adopted by the ceramic industry was reproduced in laboratory tests, in a manually and crafty, evidently. In order to accomplish the tests, a mill composed by 3 mobile-square mouthpieces with dimensions of 12,7 mm, 9,5 mm and 4,8 mm was utilized. Part of the 4,8 mm fraction produced aggregate was triturated in order to obtain a 2,0 mm fraction. The produced aggregate were calcinated at 780°, 850°C, 950°C, 1050°C and 1150°C, and characterized according to the post-boiling loss of mass, absorption, specific mass, detritions by Los Angeles abrasion, bituminous alloy adhesiveness, chemical analysis, and mineralogical electronic microscopic sweeping. The calcinated aggregate at 850°C, 950°C, 1050°C and 1150°C were applied in asphaltic concrete, enframed in the C zone of DNIT. A comparative analysis between the conventional CBUQ (river gravel CBUQ) and the synthetic aggregate was made, which the analyzed parameters were stability, fluency, traction resistance by diametric compression and resilient modulus. The results portrayed that the resultant aggregate from the 780°C calcinations showed itself more absorptive than the others. The confectioned CBUQ with the 850°C calcinated aggregate, needed more alloy than the confectioned CBUQ's with river gravel or other synthetic aggregates in different temperatures. Also, it was observed that the temperature increasing resulted in a real specific mass reduction of the aggregate, due to the existence of expansive elements in the specimen analyzed. The results also showed that all the mixtures confectioned with synthetic aggregate presented more stability compared to the conventional mixture, becoming technically viable for this region, the construction of asphaltic revetments with these aggregates.

KEY WORDS: Synthetic aggregate; calcinated clay; asphaltic concrete; burning temperature.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Composição química média das argilas do pólo cerâmico Manacapuru - Iranduba

FIGURA 2 – Composição química das argilas, oriundas de depósitos residuais

FIGURA 3 - Composição química das argilas, oriundas de depósitos aluvionares

FIGURA 4 - Diagrama de Riley

FIGURA 5 – Área de localização do pólo cerâmico Manacapuru - Iranduba

FIGURA 6 - Argila usada para a produção do agregado sintético calcinado

FIGURA 7 – Moinho para moldagem do agregado de argila

FIGURA 8 – Processo produtivo do agregado de argila

FIGURA 9 – Etapas do ensaio de perda de massa após fervura

FIGURA 10 – Ensaio de absorção de água

FIGURA 11– Envolvimento dos agregados calcinados ao ligante

FIGURA 12 – Microscópio eletrônico de varredura, JEOL JSM-6460LV

FIGURA 13 – Seixo de rio

FIGURA 14– Curvas de projeto das misturas

FIGURA 15– Etapas do ensaio Marshall

FIGURA 16– Ensaio de Estabilidade e Fluência

FIGURA 17– Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral

FIGURA 18– Ensaio de Módulo de resiliência do CBUQ

FIGURA 19- Curva de distribuição granulométrica do solo

FIGURA 20- Difratoograma da amostra de argila

FIGURA 21- Curva de distribuição granulométrica da areia

FIGURA 22- Curva de distribuição granulométrica do seixo

FIGURA 23- Evolução da absorção dos agregados sintéticos

FIGURA 24- Evolução da massa específica dos agregados sintéticos

FIGURA 25 – Difractogramas dos agregados sintéticos

FIGURA 26 – Imagens microscópicas das superfícies dos agregados sintéticos

FIGURA 27 – Imagens microscópicas do interior dos agregados sintéticos

FIGURA 28 - Desgaste por abrasão Los Angeles dos agregados sintéticos

FIGURA 29 – Temperatura x Viscosidade do CAP 50/70

FIGURA 30 – Comparativo entre as misturas 1 e 2

FIGURA 31 – Características físicas das misturas

FIGURA 32 – Características mecânicas das misturas

FIGURA 33 - Consumo de energia para queimar 1 kg de minério.

FIGURA 34 - Emissões padrões em atividades energéticas, por tipo de combustível e por uso.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Sistema de classificação de agregados sintéticos (*Texas Highway Department*)

TABELA 2 – Características tecnológicas do agregado sintético de argila calcinada

TABELA 3 – Limites das faixas granulométricas do concreto asfáltico – DNIT ES 031/2006

TABELA 4 – Funções dos componentes fundamentais dos corpos cerâmicos

TABELA 5 – Composição granulométrica do *filler*, segundo DNER-EM 367/97

TABELA 6 – Características granulométricas do solo

TABELA 7 – Resultados da caracterização da argila

TABELA 8 – Principais elementos encontrados na amostra de argila

TABELA 9 – Resultados da caracterização da areia

TABELA 10 – Resultados da caracterização do seixo

TABELA 11 – Resultados da caracterização do *filler*

TABELA 12 – Resultados da caracterização do CAP-50/70

TABELA 13 – Composição das misturas e distribuição granulométrica dos AGCs

TABELA 14 – Absorção e massa específica dos agregados sintéticos de argila calcinada

TABELA 15 – Principais elementos encontrados nos agregados de argila calcinada

TABELA 16 – Minerais presentes nos agregados sintéticos

TABELA 17 – Projeto da mistura 1

TABELA 18 – Projeto da mistura 2

TABELA 19 – Projeto da mistura convencional

TABELA 20 – Temperaturas de trabalho das misturas

TABELA 21 – Teor de ligante dos projetos das misturas

TABELA 22 – Características físicas das misturas

TABELA 23 – Características mecânicas das misturas

TABELA 24 – Relação MR/RT das misturas pesquisadas

TABELA 25 – Valores, em reais, da instalação da usina fixa, no município de Iranduba

TABELA 26 – Bens de capital necessários à produção de agregado sintético

TABELA 27 – Volume bruto da produção de agregado sintético e faturamento anual

TABELA 28 – Custos totais de produção do agregado sintético

TABELA 29 – Demonstrativo do rédito financeiro (ano base 2005)

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Reservas oficiais de argila no estado do Amazonas

QUADRO 2 – Procedência dos materiais constituintes do CBUQ

QUADRO 3 – Ensaio preliminares de caracterização do solo

QUADRO 4 – Ensaio de caracterização do agregado sintético

QUADRO 5 – Ensaio de caracterização do seixo

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAUQ – Areia-asfalto usinado a quente

AASHTO – *American Association Standard Highway and Transport Office*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AGC-780 – Agregado sintético de argila calcinada a 780 °C

AGC-850 – Agregado sintético de argila calcinada a 850 °C

AGC-950 – Agregado sintético de argila calcinada a 950 °C

AGC-1050 – Agregado sintético de argila calcinada a 1050 °C

AGC-1150 – Agregado sintético de argila calcinada a 1150 °C

ASTM – *American Society of Testing and Materials*

CAP – Cimento asfáltico de petróleo

CBUQ – Concreto betuminoso usinado a quente

CIPEA – Comitê Internacional *pour l'Étude des Argiles*

DMT – Densidade máxima teórica

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

EDS – Espectrometria de energia dispersiva

EPO – *European Patent Office*

INPI - Instituto Nacional de Propriedade Industrial

IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

LDH – Departamento de Estradas da Lousiana

LVDT – *Linear variable differential transducer*

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

MR – Módulo de resiliência

RBV – Relação betume vazios

RT – Resistência à tração por compressão diametral

RTFO – *Rolling thin film oven*

OLADE – SIEE - Sistema de Informação Econômica Energética da América Latina e do Caribe

SHRP – *Strategic Highway Research Program*

SUPERPAVE – *Superior Performance Asphalt Pavements*

SUMÁRIO

	página
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	18
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 RECURSOS MINERAIS DO ESTADO DO AMAZONAS.....	21
2.1.1 ARGILA.....	21
2.1.2 AREIA.....	26
2.1.3 BRITA E SEIXO.....	27
2.1.4 GÁS NATURAL.....	28
2.2 ARGILAS PARA FABRICAÇÃO DE AGREGADOS LEVES.....	30
2.2.1 HISTÓRICO.....	30
2.2.2 FABRICAÇÃO DE AGREGADOS LEVES.....	32
2.3 AGREGADO SINTÉTICO DE ARGILA CALCINADA.....	37
2.3.1 HISTÓRICO.....	37
2.3.2 DESEMPENHO DO AGREGADO DE ARGILA CALCINADA.....	42
2.4 MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE.....	48
2.4.1 CONCEITUAÇÃO E DOSAGEM.....	48
2.4.2 GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS DA MISTURA.....	51
2.4.3 ENVELHECIMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS.....	53
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	54
3.1 PROCEDÊNCIA DOS MATERIAIS (ARGILA, AREIA, SEIXO, CIMENTO E CAP).....	54
3.2 PROCESSO PRODUTIVO DO AGREGADO SINTÉTICO DE ARGILA CALCINADA.....	58
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	66

3.4 MÉTODO DE DOSAGEM DA MISTURA.....	88
3.5 CONFECCÃO DO CONCRETO ASFÁLTICO.....	92
3.6 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO ASFÁLTICO.....	95
 CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	 105
 CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....	 146
 CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	 148
 REFERÊNCIAS.....	 150
 ANEXO – PROJETO DE IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA FIXA DE AGREGADO CALCINADO.....	 155

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

A região Amazônica apresenta altos custos nos serviços de pavimentação, principalmente pela carência de material pétreo natural, cujas ocorrências são pedra britada ou seixo rolado, distantes dos locais de consumo dos principais municípios da região, como rodovias e vias públicas. Sua formação geológica é constituída por camadas de sedimentos quaternários e terciários não consolidados, cuja superfície é composta por materiais finos, como areia, silte e argila, formando uma extensa cobertura de solo, resultante do intemperismo laterítico ao longo dos anos.

O consumo de agregados graúdos nos serviços de pavimentação é caracterizado por grandes volumes, correspondendo a aproximadamente 60 % do volume total do concreto asfáltico. O agregado graúdo freqüentemente usado nessa região é o seixo rolado, extraído do leito dos rios, distante não menos que 450 km dos locais de consumo, fazendo com que os custos com transporte respondam por cerca de 50 % do preço final do produto, elevando com isso os custos de pavimentação. Por essa razão, grande parte dos revestimentos asfálticos é do tipo areia-asfalto a quente (AAUQ), mais susceptíveis a desenvolver deformações permanentes, com curto tempo de vida útil.

Na busca de um material alternativo e não convencional que pudesse oferecer preço competitivo em relação ao agregado ora em uso, estudou-se a argila, considerada um recurso mineral abundante na região Amazônica, por sua própria formação geológica, haja vista o enorme sistema de drenagem natural formado pela Bacia Amazônica.

Estudos revelam que a argila, depois de umedecida, quando moldada em forma de pelotas ou outra conformação qualquer e queimada a temperaturas acima de 760 °C pode produzir um agregado sintético, em substituição ao seixo.

Esse agregado regional e não convencional, poderá ser utilizado em misturas asfálticas, do tipo concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), tornando-se uma alternativa técnica e econômica, satisfatória para a administração pública e gestores rodoviários, uma vez que a matéria-prima para produção desse agregado existe em abundância e sempre próxima do mercado consumidor.

1.2 OBJETIVO GERAL DA PESQUISA

Nesse contexto, pretende-se avaliar o efeito da temperatura de queima no agregado sintético de argila calcinada, aplicado em concreto asfáltico.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A produção desse agregado, em escala industrial, visa substituir o seixo rolado e a pedra britada. Contudo, ao tempo em que esse objetivo for alcançado, pretende-se auxiliar na redução dos impactos ambientais causados pela exploração de pedreiras; contribuir para redução dos custos dos serviços de construção, restauração e manutenção de rodovias, fazendo uso do agregado sintético de argila calcinada na pavimentação rodoviária; intentar os estudos de viabilidade técnica e econômica do uso desse agregado calcinado nos serviços de pavimentação; analisar o comportamento do concreto asfáltico confeccionado com agregado de argila calcinada, considerando os parâmetros físicos e mecânicos da mistura e comparar com o concreto asfáltico convencional, confeccionado com seixo rolado.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para tanto, este trabalho foi dividido em seis capítulos, o primeiro faz abordagem da problematização amazônica, propõe o uso de agregado sintético de argila calcinada em obras de pavimentação, traça objetivos e apresenta as justificativas técnicas e econômicas.

O segundo capítulo descreve os recursos minerais do estado, de interesse desse trabalho, discorre experiências adquiridas com o uso do agregado sintético de argila calcinada, apresenta um histórico de agregados leves e calcinados e aborda a conceituação e dosagem de misturas asfálticas.

O terceiro capítulo relata a procedência e caracterização dos materiais usados nesta pesquisa, o processo produtivo do agregado calcinado, desde a coleta da matéria-prima até a caracterização física, química, mineralógica e tecnológica do agregado produzido. Destaca-se nesta etapa, a aplicação do agregado calcinado em concreto asfáltico, descreve o método de dosagem da mistura e os ensaios físicos e mecânicos.

O quarto capítulo apresenta e discute os resultados encontrados.

O quinto capítulo relata as conclusões da pesquisa e o sexto e último capítulo apresenta sugestões para projetos futuros.

CAPÍTULO 2

2.1 RECURSOS MINERAIS DO ESTADO DO AMAZONAS DE INTERESSE DO PROJETO

2.1.1 ARGILA

A argila é um material natural, terroso, de granulação fina, que geralmente adquire plasticidade quando umedecida com água. Do ponto de vista químico, as argilas são formadas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio. Folhelho argiloso são argilas laminadas ou estratificadas naturalmente. Estruturalmente, as argilas são constituídas por partículas cristalinas extremamente pequenas, que formam os argilominerais. Também são constituídas de outros materiais e minerais como matéria orgânica, sais solúveis e partículas de quartzo, pirita, mica, calcita, dolomita, além de minerais não-cristalinos, também chamados de amorfos (SOUZA SANTOS, 1992).

São inúmeros os produtos industriais nos quais se utiliza a argila como matéria-prima, dentre eles destacam-se a cerâmica artística, agentes ligantes, tijolos, telhas, cimentos, materiais cerâmicos para a indústria química, louça branca, agregados para concreto, cosméticos, materiais isolantes térmicos, pisos e revestimentos, fluidos ou lamas para perfuração, dentre outros.

No Brasil, as indústrias que utilizam argila como matéria-prima em seus processos produtivos são: indústria de cerâmica vermelha (tijolos, telhas, ladrilhos, etc.), indústria de cerâmica branca (louça doméstica, material sanitário, azulejos, etc.), indústria de material refratário, indústrias de borrachas e plásticos, indústria de papel, indústria metalúrgica, indústrias de inseticidas e pesticidas, indústrias de derivados de petróleo, dentre outras.

As argilas resultam do intemperismo, da ação hidrotérmica ou de depósitos de sedimentos fluviais, marinhos, lacustres ou eólicos. Suas partículas possuem dimensões inferiores a 2 μm , onde estão presentes os argilominerais ou minerais de argila. É possível conhecer a fração argila de uma amostra de solo após sedimentação por 48 horas, isto é, por dispersão de argila em água, e fazendo uso de um defloculante como silicato de sódio, pirofosfato de sódio ou hidróxido de sódio ou amônio, (SOUZA SANTOS, 1992).

Segundo Souza Santos e Souza Santos (1966) para se utilizar uma argila para fins tecnológicos é necessário conhecer algumas propriedades como textura, composição química, mineralógica, íons trocáveis, granulometria, área específica, forma das partículas, porosidade, sistema argila-água, propriedades físico-mecânicas em função da temperatura e as propriedades tecnológicas. A argila se funde ou se derrete ao longo de uma faixa de temperaturas que varia em função de sua composição.

As argilas são constituídas essencialmente por alumina e sílica com estrutura cristalina relativamente complexa; contudo, uma estrutura característica desse mineral é em forma de camadas, que lhe confere plasticidade, em razão das partículas se moverem umas sobre as outras quando intercaladas por moléculas de água. Há também a presença de elementos fundentes como potássio, sódio e cálcio que formam os feldspatos. As características da peça cerâmica acabada dependem das proporções de argila, quartzo e fundente.

O Comitê International *pour l'Étude des Argiles* (CIPEA, Mackenzie, 1959) classifica os argilominerais em silicatos cristalinos com estrutura em camadas ou lamelar e os silicatos cristalinos com estrutura fibrosa. Quanto à origem geológica, Ries (1927) classifica as argilas como residuais, transportadas e depósitos químicos.

Os minerais argilosos mais usados no estado do Amazonas são em número de três e conhecidos como argilas muito plásticas, encontradas em aluviões recentes e planícies de inundação, que são empregadas na indústria da cerâmica vermelha; argilas pouco plásticas, oriundas de depósitos residuais formados de alteração de rochas da Formação Alter do Chão; e argilas levemente arenosas, oriundas de latossolos, utilizadas na construção de aterros, preparo de argamassas e produção de cimento *Portland* (CPRM, 2004).

Os municípios de Manacapuru e Iranduba constituem o maior pólo cerâmico vermelho do Amazonas, tendo a capital, Manaus, como principal mercado consumidor. Oficialmente, estão registrados no Amazonas dois tipos de jazimentos para fins industriais, conforme demonstrado no quadro 1.

Substância	Empresa	Município	Reservas (t)
Argila (cerâmica)	CERAMA	Iranduba	35.877.399
	LITIARA	Itacoatiara	3.593.700
Argila (cimento)	CBE	Manaus	3.546.766

Quadro 1 – Reservas oficiais de argila no estado do Amazonas

Fonte: DNPM-8º Distrito (2004)

Estudos realizados pelo Serviço Geológico do Brasil (D’Antona *et al.*, 2006) demonstraram 4,315 bilhões de metros cúbicos de reservas de argila com grande potencial para uso na indústria da cerâmica vermelha, no pólo cerâmico Manacapuru – Iranduba. A maior parte constitui depósitos residuais, resultantes da Formação Alter do Chão, formados por quartzo, caulinita, illita/muscovita, esmectita, feldspato e rutilo. A figura 1 apresenta a composição química média de depósitos argilosos no estado do Amazonas, ao passo que as figuras 2 e 3 ilustram as composições químicas das argilas, de acordo com sua origem.

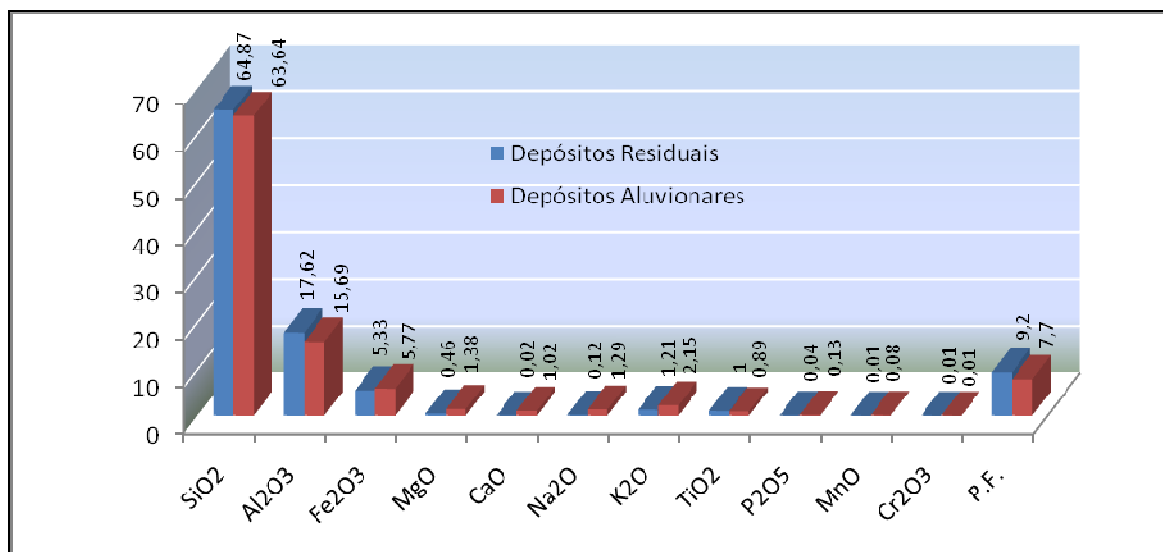


Figura 1- Composição química de depósitos argilosos no pólo cerâmico Manacapuru – Iranduba
Fonte: Serviço Geológico do Brasil (2006)

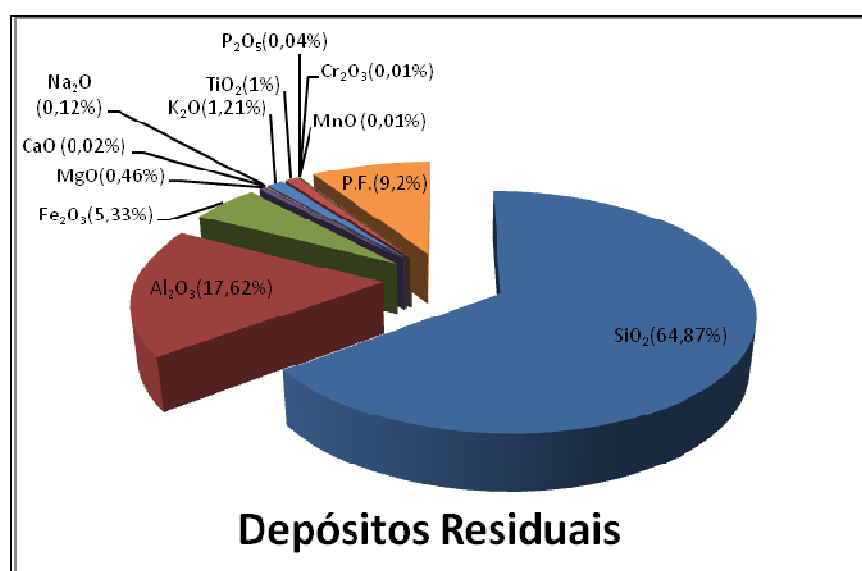


Figura 2 – Composição química das argilas, oriundas de depósitos residuais
Fonte: Serviço Geológico do Brasil (2006)

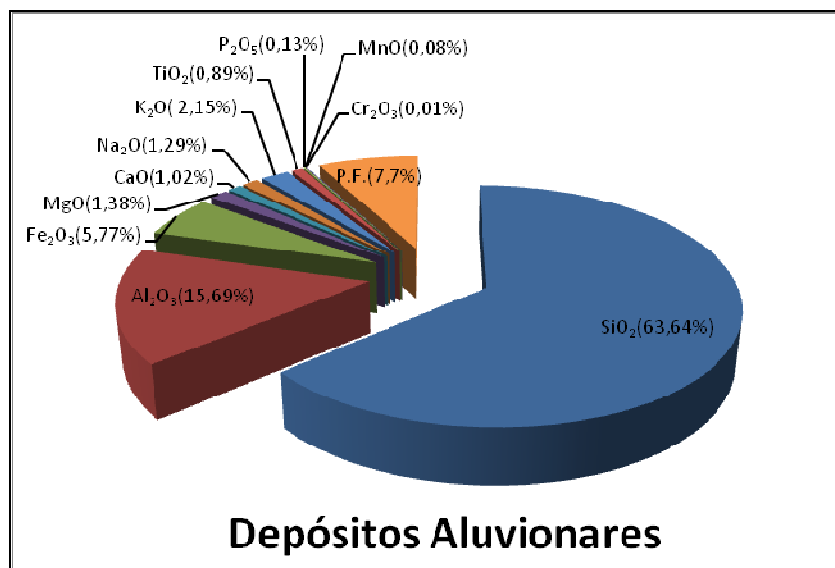


Figura 3 – Composição química das argilas, oriundas de depósitos aluvionares
Fonte: Serviço Geológico do Brasil (2006)

O município de Manacapuru/AM compõe o pólo oleiro do estado do Amazonas e está situado em uma planície de dissecação, onde prevalecem as rochas sedimentares da Formação Alter do Chão, representando importante fonte de argilominerais usados no fabrico da cerâmica vermelha. O pólo cerâmico Manacapuru/Iranduba utiliza 226.000 m³ de argila para produzir anualmente 102.000 milheiros de tijolos e 16.000 milheiros de telhas (RODRIGUES, 2000).

A grande produção ceramista, aliada à falta de planejamento e pesquisas para exploração das lavras tem provocado grande modificação na topografia da região. Com a abertura das cavas ocorre muitas vezes a aproximação da superfície atmosférica com o nível do lençol freático, provocando riscos de contaminação aos mananciais subterrâneos. Esse solo exposto pode sofrer erosão com a formação de voçorocas em áreas de relevo inclinado.

Esses impactos ao meio ambiente poderão ser minimizados considerando a potencialidade natural dessas áreas, aplicadas nas principais atividades socioeconômicas regionais. Com efeito, a produção de peixes, quelônios, exploração da avicultura, produção de hortaliças pelo processo de

hidroponia, atividades aquáticas e pesca esportiva, serviriam como alternativa para redução dos impactos ambientais e recuperação das áreas degradadas decorrentes da extração de argila.

Ainda segundo Rodrigues (2000), os órgãos ambientais necessitariam mudar a prática de outorga e fiscalização. A renovação das licenças de operação poderia estar condicionada a compensações ao meio ambiente, como por exemplo, recuperação das áreas degradadas fazendo uso da camada extraída de solo orgânico para cobertura e reposição em área já lavrada.

2.1.2 AREIA

A areia é o agregado miúdo frequentemente usado nos concretos asfálticos. Segundo a ABNT, areia é todo material granular de dimensões entre 4,8 mm e 0,075 mm, composto essencialmente por grãos de quartzo (SiO_2). Sua demanda é maior nas sedes municipais, onde é extraída em seus arredores.

Devido ao seu baixo valor agregado, a maior parte dos areais da região Amazônica está localizado próximo às rodovias BR-174/AM e AM-010. A exploração desse recurso mineral é feita a céu aberto, após retirada do pequeno horizonte superficial argiloso. A espessura das camadas de areia se encontra entre 1,8 m e 4,5 m acima do lençol freático. Apresentam massa específica entre 1,54 g/cm³ e 1,64 g/cm³, para o material seco, e de 2,64 g/cm³ para as partículas sólidas (GOUVÊA, 2001).

No estado do Amazonas, esse bem mineral provém de planícies aluvionares e aluviões recentes dos rios, com concentração nos municípios de Japurá, Japurá-Maraã, Tefé, Coari, Codajás, Anori, Anamã, Novo Airão, Nhamundá, São Sebastião do Uatumã, Itapiranga, Humaitá e Manicoré. A areia de São Gabriel da Cachoeira provém da degradação intempérica de rochas do embasamento cristalino.

Em 2005, a CPRM identificou 150 depósitos formados por processos de podzolização de rochas, desenvolvidos sobre arenitos, abrangendo uma área de 4000 ha de areia. Como boa parte da extração se dá de maneira clandestina, estima-se que só na capital, Manaus, o consumo desse insumo para várias atividades da construção civil, seja de aproximadamente 1,5 milhões de metros cúbicos.

2.1.3 BRITA E SEIXO

Os agregados graúdos freqüentemente usados na região Amazônica são a brita e o seixo. A brita amazônica provém de quatro tipos de rochas que são: arenitos silicificados da Formação Alter do Chão, localizados no entorno da capital, Manaus; riolito e riodacito do Grupo Iricoumé, localizados na região da BR-174/AM, município de Presidente Figueiredo; rochas graníticas da suíte Mapuera e corpo Abonari, também localizadas na BR-174/AM, em Presidente Figueiredo; gnaisses e metagranitos do Complexo Jauaperi, localizadas em Moura, município de Barcelos.

A extração da brita se dá por meio de explosivos e marruagem, passando por britadores para serem classificadas segundo sua granulometria. O abastecimento à Manaus, principal mercado consumidor, é feito usando transporte fluvial, quando proveniente da localidade de Moura, em Barcelos, ou transporte rodoviário, quando proveniente de Presidente Figueiredo, distante não menos que 160 km.

O seixo utilizado no estado do Amazonas é oriundo do leito dos rios e extraído por meio de dragas. As atuais frentes de lavra estão localizadas nos rios Japurá, Solimões, Negro, Nhamundá, Uatumã (atende a capital Manaus) e rio Aripuanã (principal fornecedor do estado). Seu transporte se dá por balsas com capacidade de 1000 t a 2000 toneladas.

O transporte até Manaus é realizado por meio de balsas, com distâncias de transporte em torno de 700 km, quando proveniente do rio Aripuanã, e 450 km, quando proveniente do rio Uatumã. Com a construção da hidrelétrica de Balbina houve represamento do rio Uatumã, provocando uma tendência de esgotamento do seixo no leito desse rio, em razão de não haver reposição natural desse material.

Em 2004, Manaus consumiu cerca de 1.104.617 m³ de seixo e brita para as diversas atividades da engenharia, correspondendo a 27,44 % do valor da produção mineral bruta do estado (CPRM, 2005).

2.1.4 GÁS NATURAL

O gás natural apresenta-se como alternativa energética para produção do agregado sintético de argila calcinada, proposto neste projeto de pesquisa. Por definição, o gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos leves, de origem fóssil, que sob temperatura ambiente e pressão atmosférica, permanece em estado gasoso. É inodoro, incolor, atóxico e mais leve que o ar, sendo essa última característica um importante fator de segurança, pois em caso de vazamentos o gás se dissipa rapidamente pela atmosfera. Considerado uma fonte de energia menos poluente que os demais, pode ser usado em substituição a combustíveis mais poluentes, como óleos combustíveis, lenha e carvão (AMBIENTE BRASIL, 2007).

É encontrado no interior da terra, em rochas porosas no subsolo, resultante da decomposição de matéria orgânica fóssil. Composto principalmente por gás metano, etano, propano, butano e outros gases em menores proporções, o gás natural durante o processo de combustão, libera dióxido de carbono e vapor d'água, substâncias não tóxicas, que conferem a esse produto mineral características de energia ecológica e não poluente.

O transporte do gás até os mercados consumidores é feito por meio de gasodutos, que são tubulações de diâmetros consideráveis, operacionalizadas sob alta pressão, que conduzem o gás até as redes distribuidoras.

Na década de 50, a Petrobrás iniciou as atividades exploratórias na Bacia do Solimões, encontrando gás natural na região do rio Juruá, em 1978. Posteriormente, em 1986, descobriu óleo e gás na área de Urucu, incluindo o rio Urucu, porções Leste e Sudoeste de Urucu e Igarapé Marta, em uma área superior a 100 km² localizada no município de Coari/AM.

A rocha geradora desse recurso mineral pertence à Formação Jandiatuba, complementados com arenitos da Formação Juruá e evaporitos da Formação Caruari (EIRAS *apud* REIS, 2006). As reservas na Província Juruá – Urucu totalizam 89 bilhões de metros cúbicos de gás, onde cerca de 63 bilhões de metros cúbicos somente do pólo Urucu.

Para aproveitamento desse gás natural, está em fase de construção o gasoduto Coari – Manaus, que atravessará a selva por 400 km ao longo do rio Solimões, passando pelos municípios de Coari, Codajás, Anori, Anamá, Caapiranga, Manacapuru e Iranduba, em que esses dois últimos constituem o pólo oleiro do estado do Amazonas. Sua capacidade diária de transporte será de 10,5 milhões de metros cúbicos de gás.

Do ponto de vista ambiental e econômico, o uso do gás natural como matriz energética constitui um importante atrativo para a produção de agregados sintéticos de argila calcinada, na região onde está situado o maior pólo oleiro do estado.

2.2 ARGILAS PARA FABRICAÇÃO DE AGREGADOS LEVES

2.2.1 HISTÓRICO

Woods (1948) definiu agregado leve como um agregado de areia, ou cascalho, ou pedra britada ou escória de outro material de composição inorgânica ou mineral, usado em combinação com um meio aglomerante para formar concreto betuminoso ou concreto de cimento *Portland*, macadame, mastique, argamassa, estuque ou isolante como lastro para estradas de ferro, camadas de filtração ou processos industriais para diversos usos específicos, como por exemplo, fundentes. A *American Society of Testing and Materials* (ASTM) define esse tipo de agregado como sendo aquele que apresenta baixa massa específica, resistência à compressão e elevado isolamento térmico.

O criador da indústria de produção de argila expandida, considerada agregado leve, foi o americano fabricante de tijolos *Stephen J. Hayde*, da cidade de Kansas, que em 1918 observou que alguns folhelhos argilosos, usados na fabricação de tijolos, sofriam um inchamento anormal quando queimados. Tentando resolver esse problema, se consagrou pelo processo produtivo patenteado em seu nome, abrindo caminhos para a evolução de novas pesquisas.

Com efeito, estudos sobre a aplicação de agregados leves datam de 1935, quando a *European Patent Office* (EPO) publicou o primeiro documento de patente GB 429015, de autoria do americano *William F. Macglashan*, intitulado “Aperfeiçoamentos relacionados aos agregados para concretos ou outras misturas com cimento”. Posteriormente, outros trabalhos foram patenteados, como o GB 465318, publicado pela EPO, em 1937, intitulado “Concreto com partículas de argila queimada como agregado”, sob titularidade do alemão *Hugo Schwartzkopff*, o GB 786500, publicado em 1957, patenteado pela *Southern Lightweight Aggregate Corporation*, no qual descreve “Um método e aparato para a produção de agregados leves” e o GB 862723, sob

patente de *William Kinniburgh*, intitulado como “ Aperfeiçoamentos em relação à produção de argila expandida” (CABRAL, 2005).

Os Estados Unidos têm uma participação imperiosa nos estudos desses agregados, servindo de base para as pesquisas iniciadas pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER).

Segundo *Whitaker* (1942), *Davis e Kelly* (1948) *apud* Souza Santos (1992), os agregados leves se classificam em quatro tipos, a saber:

- a) agregados leves naturais, que são de origem vulcânica, conhecidos como pedra-pomes (*pumice*) e lavas (*scoria*), apresentam variedades na cor, na composição química e mineralógica, cuja fase sólida é geralmente um vidro;
- b) subprodutos industriais, como cinzas industriais, clínquer, escórias de alto-fornos e escórias expandidas;
- c) agregados leves manufaturados, que se dividem em dois grupos; primeiro argilas e folhelhos argilosos (*shales*) expandidos ou inchados (*bloated*) pela expansão de gases produzidos quando há fusão incipiente; o segundo grupo são materiais sinterizados em forma porosa;
- d) agregados muito leves, constituídos por perlita e vermiculita, este último é considerado um mineral que se expande em forma vermicular pelo aquecimento a 1000 °C, produzindo estrutura porosa.

Alguns autores identificam como principais características dos agregados leves a baixa massa específica, elevada resistência mecânica, ausência de pontas e arestas agudas, adequada distribuição granulométrica, inércia química e preço competitivo.

2.2.2 FABRICAÇÃO DE AGREGADOS LEVES

Os agregados leves são produzidos segundo dois grupos de processamento. O primeiro grupo refere-se a agregados produzidos a partir de certas argilas, folhelhos argilosos (*shales*) e ardósias (*slates*) que incham ou borbulham quando aquecidos à temperatura de fusão incipiente. No segundo grupo estão os agregados de baixa massa específica aparente, que adquirem essa característica pela sinterização de um material granular, ou seja, os vazios intersticiais são preservados como poros abertos ou fechados, formando uma estrutura sólida celular. A queima é feita em fornos rotativos ou em fornos de sinterização de grelha móvel. Segundo Souza Santos (1992), os agregados do primeiro grupo são comercializados nos Estados Unidos sob as seguintes denominações:

- a) *Haydite*, produzido a partir do aquecimento de fragmentos de argilas ou folhelhos em forno rotativo, entre 1000 °C e 1150 °C, até que o grau de formação de vesículas seja obtido;
- b) *Rocklite* é um agregado leve produzido por processo semelhante, aquecido a 1200 °C, cujos fragmentos irregulares amolecem e incham, sob essa temperatura, adquirindo forma de pelotas ou esferas, com uma casta ou película superficial de cerca de 1 mm de espessura;
- c) *Gravelite* é obtido pela queima de cilindros extrudados de argila úmida com óleo combustível, em fornos rotativos. Esse agregado foi usado na construção da ponte San Francisco, na Baía de *Oakland*;
- d) *Cel-Seal* é produzido a partir de misturas de óxidos de ferro e materiais combustíveis, ricos em carbono, com a argila bruta, queimado em forno rotativo, após extrudado e coberto com argila refratária;

- e) *Nodulite* é produzido com terra fuller da Flórida, pelletizado e coberto com sílica moída, aquecido a 1100 °C em forno rotativo.

As reações que ocorrem quando uma argila é aquecida em forno rotativo para formar um agregado leve são (BAUER, 1948):

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

Ainda segundo aquele autor, para que um agregado leve seja considerado de alta qualidade é necessário que a matéria-prima, argila ou folhelho, produza uma estrutura celular, a partir da expansão pirolástica. Para que isso ocorra é preciso que essa matéria-prima apresente algumas características, como:

- a) capacidade de formação suficiente de vidro para tapar os poros e reter os gases formados, durante a expansão pirolástica;
- b) conter quantidade adequada de substâncias produtoras de gases para gerar o grau de inchamento suficiente para produzir a massa específica aparente desejada;

- c) as substâncias produtoras de gás devem liberar uma quantidade adequada dos componentes voláteis, em uma determinada velocidade e temperatura, a fim de que esse fenômeno coincida com as condições pirolásticas ótimas do material;
- d) nessas condições ótimas de temperatura-tempo-formação de vidro, o vidro deve possuir uma viscosidade adequada que permita a formação de um grande número de bolhas ou vesículas para dar uma baixa massa específica aparente à partícula do agregado leve e dar uma espessura de paredes das vesículas que leve à máxima resistência ao esmagamento da partícula do agregado produzido;
- e) o material deve inchar em uma estrutura celular na temperatura mais baixa possível, por razões econômicas;
- f) a faixa ou intervalo de temperatura em que ocorre o início do inchamento e a fusão total deve ser superior a 20 °C, para evitar que os fragmentos do agregado leve se grudem e provoquem o entupimento do forno (ZETTERSTRON e COLE, 1956).

Caso não haja teor de fundentes adequados para formar uma fase vítrea ou se uma fase vítrea de baixa viscosidade é formada desde o início do aquecimento, os gases podem escapar sem que haja o inchamento das partículas de argila. Esses defeitos podem ser corrigidos com a adição de fundentes, com o deslocamento do período de liberação de gás para uma temperatura mais alta, com o aquecimento mais rápido de forma a diminuir a introdução de ar ou com a adição de substâncias que elevam a viscosidade da fase vítrea.

Riley (1951) e Wilson (1928, 1961) na busca da matéria-prima adequada para produzir um agregado leve, estabeleceram uma correlação entre a composição química da argila ou folhelho argiloso com a capacidade de inchar ou não, entre temperaturas de 1100 °C e 1350 °C. Riley apresentou um diagrama com os limites aproximados de composição para formar uma fase

vítrea. Nesse diagrama, representado na figura 4, vê-se que as ilitas são os argilominerais que mais se aproximam dos limites estabelecidos por Riley.

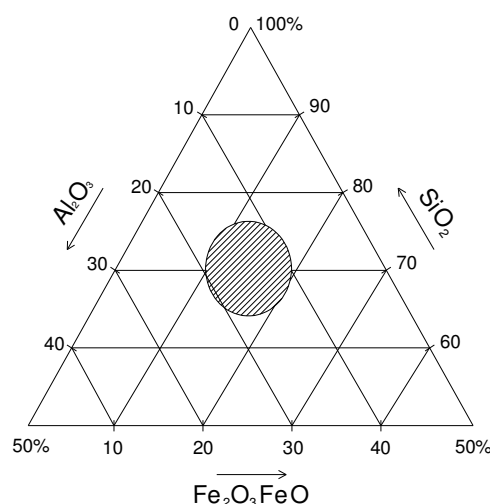


Figura 4 – Diagrama de Riley

Alguns colaboradores juntamente com Conley (1948) descobriram que as argilas e folhelhos que inchavam possuíam menos de 25 % de Al_2O_3 , pH superior a 5,0, cerca de 7 % a 8 % de Fe_2O_3 e cerca de 1 % de carbonatos ou sulfatos alcalino-terrosos. Com efeito, as argilas e os folhelhos argilosos mais eficazes na fabricação de agregados leves são aqueles ricos em ilita, em ilita-montmorilonita, vermiculitas, cloritas, paligorsquitas e sepiolitas.

Os estudos sobre a utilização de agregados leves se espalharam mundo afora, despertando interesse da indústria brasileira, mais precisamente da CINASA, hoje CINASITA, localizada em Jundiaí/SP, que em parceria com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e a empresa norte-americana Fuller, pesquisaram trezentas argilas do estado de São Paulo, cuja composição química e mineralógica apresentava possibilidade de inchamento pirolástico. Após vários ensaios laboratoriais, a escolha foi feita segundo condições econômicas. Em 1968, a CINASA produzia mensalmente cerca de 7.500 m³ de agregados. A produção em escala piloto foi feita em

forno rotativo baseado no projeto do *U.S. Bureau of Mines*, cujo processo passa pelas seguintes etapas: extração da matéria-prima, desagregação, umidificação, conformação por extrusão em maromba, corte de 1 cm, rolamento e secagem superficial, queima no forno rotativo, resfriamento, separação e estocagem (SOUZA SANTOS, 1992). Atualmente, a CINASITA tem planos e estudos para ampliação de sua capacidade de produção, aguardando apenas um aumento na demanda para sua concretização.

O DNER, através do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) em parceria com a empresa ECL, estudou a viabilidade de implantação de uma fábrica de argila expandida na região Amazônica. Desses estudos resultou um anteprojeto de uma usina móvel de pequeno porte, com capacidade de produção diária de 50 m³ de agregados, utilizando como combustível o carvão vegetal. O protótipo foi fabricado e montado sobre duas carretas, sendo uma responsável pelo processamento da argila e a outra pela unidade de queima. O fluxograma do processo de produção passa pelas seguintes etapas: a argila é transportada por uma pá carregadeira e descarregada em caixão alimentador, passando por um destorroador, onde é encaminhada por intermédio de uma esteira até um misturador helicoidal; o misturador é alimentado por carvão vegetal pulverizado, obtido no moinho de martelos e em seguida transportado pela correia ao alimentador rotativo; a água é incorporada através do tanque para que seja iniciada a extrusão pela maromba, formando pelotas que seguem para o forno de queima, onde é aquecida numa temperatura especificada pelos ensaios por um período de 10 a 15 minutos (ECL, 1989).

A usina móvel do DNER foi desativada por questões econômicas em 1989 e doada ao Núcleo de Tecnologia de Materiais (NUTEMA) da Universidade Federal do Amazonas, em 2000, a fim de subsidiar os estudos de argila calcinada dessa instituição.

2.3 AGREGADO SINTÉTICO DE ARGILA CALCINADA

2.3.1 HISTÓRICO

Como já citado anteriormente, o DNER foi o pioneiro no Brasil nas pesquisas sobre agregados sintéticos de argila calcinada para uso rodoviário, quando, em 1979, enviou um engenheiro aos estados americanos do *Texas* e *Lousiana*, na busca de conhecimentos sobre a fabricação e aplicação desses agregados. O Departamento de Estradas de Rodagem do Texas publicou em 1969 um relatório intitulado *A Recommended Synthetic Coarse Aggregate Classification System*, que estabelece um sistema de classificação de agregados de argila, conforme demonstrado na tabela 1 (IPR, 1981).

Os agregados segundo esse sistema estão divididos em duas classes, cada uma com três grupos A, B e C, organizados em ordem decrescente de qualidade. Nota-se que a classe I corresponde aos agregados de argila expandida, enquanto que a classe II corresponde aos agregados de argila não expandida.

CLASSE	GRUPO	Massa Específica Aparente (t/m³)		Saturação em 100 minutos	Congelamento e Degelo	Desgaste após fervura	Abrasão Los Angeles
		Máx.	Mín.	% máx.	Perda % máx.	% máx.	% máx.
I Argila Expandida	A	0,88	0,56	15	7	6	35
	B	0,88	0,56	20	15	6	40
	C	0,88	0,56	-	-	10	45
II Argila Não Expandida	A	-	0,88	-	7	6	35
	B	-	0,88	-	15	6	40
	C	-	0,88	-	-	10	45

Tabela 1 – Sistema de classificação de agregados sintéticos (*Texas Highway Department*)

Com base nas experiências americanas, o DNER adotou um sistema de classificação de agregados preconizado pela norma DNER-EM 230/94, com o intuito de disciplinar o emprego, o controle de qualidade e aceitação dos agregados de argila.

Os agregados de argila calcinada se diferem daqueles de argila expandida pela matéria-prima utilizada e o processo produtivo. A temperatura de queima para produção do agregado calcinado é, em geral, inferior a do agregado de argila expandida e a matéria-prima para produção do primeiro não precisa ter características expansivas. Pode-se dizer que qualquer argila com plasticidade elevada, que quando moldada em forma de pelotas ou outra qualquer e seca ao ar apresente boa resistência à compressão manual, pode estar apta à fabricação destes agregados.

Com a finalidade de mostrar a possibilidade do emprego de argila queimada em bases de pavimentos flexíveis, o estado do Texas realizou estudos de laboratório com amostras de argila moldada em umidades próximas ao limite de plasticidade, na forma de cilindros, com 125 mm de diâmetro e 380 mm de comprimento, que permitiu chegar às seguintes conclusões (IPR, 1981):

- a) os minerais argilosos do tipo montmorilonita, illita e caulinita não se reidratam mais, nas condições normais, uma vez que tenham sido completamente desidratados por um processo térmico, numa temperatura de 760 °C por um período de 15 minutos;
- b) uma desidratação incompleta dos corpos de prova foi verificada por testes de laboratório bastante simples. Esses testes, denominados nos Estados Unidos por *Pressure Slaking Test*, que corresponde ao ensaio de “desgaste após fervura”, 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;
- c) quase todos os solos argilosos que possuam uma resistência à compressão manual relativamente grande quando secos ao ar, depois de umedecidos e moldados em forma de pelotas, podem servir como matéria-prima para a fabricação de agregados de argila para uso em base de pavimentos flexíveis.

Os estudos tiveram prosseguimento através de um programa de avaliação envolvendo não só agregados fabricados em uma instalação industrial experimental pertencente a *TTI – Texas Transportation Institute*, da Universidade do Texas, como também agregados fabricados em instalações industriais do estado do Texas.

Na década de 60, 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 base constituída de 70 % de agregados de argila calcinada, fabricados nas instalações da TTI, mais 30 % de areia siltosa. Utilizou-se também, para alguns trechos, agregados de argila fabricados comercialmente. A areia siltosa, pelas especificações adotadas, deveria ter limite de liquidez menor que 35 % e índice de plasticidade menor que 10 %. Cinco anos após, constatou-se que todos os trechos experimentais apresentaram um bom desempenho para as condições ambientais do Texas. Os testes de desgaste após fervura mostraram que não houve degradação significativa durante o tempo de serviço. Atualmente, grande parte das camadas de rolamento das rodovias americanas, em especial aquelas situadas nos estados americanos do Texas e Lousiana, são constituídas de revestimentos que utilizaram estes agregados.

Estudos realizados pela Divisão de Engenharia Mecânica do IPT/SP *apud* Funtac & IEL (1990) apontaram os principais fenômenos que podem ocorrer durante a queima de um corpo cerâmico:

- a) até aproximadamente 200 °C ocorre a eliminação da água livre (mesmo a que fica intercalada entre os argilominerais) e a eliminação da água proveniente da matéria orgânica;
- b) entre 350 °C e 650 °C ocorre a combustão de substâncias orgânicas contidas na argila e a dissociação de compostos sulfurosos;

- c) entre 450 °C e 650 °C ocorre a decomposição das argilas, com a liberação da água de constituição, sob a forma de vapor (quimicamente combinada ao argilomineral);
- d) em torno de 570 °C ocorre a rápida transformação do quartzo, de sua forma cristalina alfa para beta, onde ocorre uma violenta expansão durante o aquecimento e de beta para alfa durante o resfriamento, acompanhado de fortes contrações;
- e) acima de 700 °C começam a se desenvolver reações químicas da sílica e da alumina com elementos fundentes, formando sílico-aluminatos complexos que conferem à massa cerâmica dureza, estabilidade e resistência mecânica. Neste momento, ocorre o início da sinterização;
- f) entre 800 °C e 900 °C os carbonatos se decompõem, liberando CO₂;
- g) acima de 1000 °C, os sílico-aluminatos que estão na forma vítrea começam a amolecer, dando ao corpo cerâmico maior dureza, compacidade e impermeabilidade.

Monteiro e Dualibi (2001) acreditam que um bom material calcinado deve resultar de uma matéria-prima que apresente um elevado percentual de óxidos alcalinos (Na₂O + K₂O), baixo teor de alcalinos terrosos (CaO + MgO) e baixa perda ao fogo. Acreditam, também, que os óxidos alcalinos são fundamentais para a produção de elementos de baixa porosidade, pois são eles os responsáveis pela formação da fase líquida.

Para o DNER, hoje DNIT, um agregado de argila calcinada é considerado satisfatório para uso em pavimentação, quando atende às especificações técnicas relacionadas na tabela 2.

NORMA	TÍTULO	PARÂMETROS DE ACEITAÇÃO
DNER – ME 223/94	Argilas para fabricação de agregado sintético de argila calcinada – seleção expedita pelo processo da fervura	
DNER – ME 225/94	Agregado sintético de argila calcinada – determinação da perda de massa após fervura	Menor que 6 %
DNER – ME 222/94	Agregado sintético fabricado com argila – desgaste por abrasão	Menor que 50 %
DNER – ME 197/97	Agregados – determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos	Menor que 40 %
DNER – ME 081/98	Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo	Menor que 18 %
DNER – ME 096/98	Agregado graúdo – avaliação da resistência mecânica pelo método dos 10 % de finos	Maior que 60 kN
DNER – ME 399/99	Agregados – determinação da perda ao choque no aparelho Treton	Menor que 60 %

Tabela 2 – Características tecnológicas do agregado sintético de argila calcinada
Fonte: DNIT (2006)

O processo produtivo do agregado calcinado se assemelha àquele usado pela indústria cerâmica, pois os produtos cerâmicos apresentam elevada porosidade, com pouca fase vítrea, decorrentes da baixa temperatura de queima, em torno de 900 °C. A massa específica aparente é considerada uma propriedade muito importante 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 piropelástica e resistência mecânica. As variáveis de queima, da contração linear e da capacidade de absorção de água, diminuem à medida que aumenta a massa específica da peça, sendo esta uma relação linear. Assim, a velocidade de secagem e de oxidação da peça durante o processo de queima diminui, 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 produzir fissuras, provocando perda na resistência mecânica (BÓ, 2002).

2.3.2 DESEMPENHO DO AGREGADO DE ARGILA CALCINADA

Como já citado anteriormente, o processo produtivo do agregado de argila calcinada, bem como a matéria-prima usada em sua produção, são fatores determinantes na qualidade do agregado produzido. Contudo, por todas as pesquisas já realizadas, é unânime afirmar que a maior preocupação na utilização desse agregado é o alto índice de absorção de água que ele possui. Nesse contexto, observa-se que a temperatura e o tempo de calcinação são variáveis que devem ser determinadas na fase preliminar de produção. A temperatura exerce influência direta nas características físicas e mecânicas, mostrando-se uma variável diretamente proporcional à qualidade do produto acabado. Com relação ao tempo de calcinação, é importante determinar o ponto ótimo, ou seja, tempo ótimo, pois o agregado sob efeito da temperatura, sofre constantemente reações físico-químicas que requerem um determinado tempo para que estas reações se completem, conferindo ao agregado as qualidades esperadas.

O Instituto Militar de Engenharia (IME) criou e patenteou um agregado artificial denominado argila calcinada, que substitui a pedra britada nas pavimentações e construções. O produto, registrado pelo IME no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), foi objeto de estudo de uma equipe de 12 pessoas, formada por engenheiros e alunos. Os pesquisadores analisaram a viabilidade técnica e econômica da produção do produto e os resultados dos testes, realizados em escala industrial, comprovaram que a produção do material é vantajosa.

Para melhor compreensão do desempenho do agregado de argila calcinada aplicado em misturas asfálticas, apresenta-se abaixo a evolução das pesquisas já concluídas:

- a) Soares *et al.* (1998) estudaram o agregado sintético de argila calcinada, usando como matéria-prima uma amostra de solo de Urucu/AM. Essa amostra foi caracterizada geotecnicamente, passando por ensaios de análise química e moldada manualmente em forma de pelotas, para calcinação em temperaturas variando de 900 °C a 1300 °C. Definiu-se a temperatura de 900 °C como a ideal, cujos agregados produzidos compuseram uma mistura asfáltica, dosada pelo método Marshall, composta de agregados calcinados em forma de pelotas + areia + cimento (*filler*) + CAP-20 (cimento asfáltico de petróleo). Devido a problemas relacionados à curva granulométrica e teores de ligante escolhidos, o volume de vazios da mistura foi da ordem de 20 %, apresentando valores de estabilidade insatisfatórios;
- b) Costa *et al.* (2000) estudaram uma amostra de solo argiloso proveniente do estado do Acre, para obtenção de agregado calcinado aplicado em mistura asfáltica. A matéria-prima foi conformada em barras prismáticas, em forma de madeira previamente fabricada. As barras foram secadas em estufa e calcinadas a 900 °C por 30 minutos. Na sequência, foram quebradas para enquadramento em uma granulometria selecionada. A mistura asfáltica foi composta de agregados de argila + areia + cimento + CAP-20, dosada pelo método Marshall. O teor ótimo de ligante encontrado foi de 8,8 %, apresentando os seguintes resultados: volume de vazios igual a 12 %, estabilidade em torno de 900 kgf, resistência à tração (25° C) de 0,33 MPa, módulo resiliente (25° C) de 1200 MPa e estimativa de vida de fadiga de 20 % da obtida com agregado natural;

c) Batista (2004) caracterizou 32 amostras de solo do subleito da rodovia BR-163/PA e duas amostras de solo utilizadas por olarias de Santarém/PA. As matérias-primas foram conformadas em barras prismáticas de seção hexagonal, por meio de uma máquina extrusora adaptada para uso em laboratório. As amostras selecionadas para calcinação foram aquelas que apresentaram índice de plasticidade (IP) maior que 20, resultando três amostras do subleito da BR-163/PA e uma amostra composta da mistura de dois solos utilizados por olarias de Santarém. As amostras conformadas, já cortadas em aproximadamente 2 cm, foram secadas em estufa ou sob calor de lâmpada infravermelha. Quando o forno atingiu a temperatura de calcinação desejada, ou seja, 900 °C, os agregados foram lançados para queima por 30 minutos, posteriormente quebrados e recalcinados por mais 20 minutos. Os resultados reprovaram as três amostras do subleito da BR-163/PA e aprovaram a amostra de olaria, segundo os ensaios de desgaste após fervura e tensão de ruptura por flexão. A mistura asfáltica foi dosada pelo método Marshall e enquadrada na faixa B do DNER, composta de agregado de argila calcinada + areia + cimento + CAP-20. O teor ótimo de ligante encontrado foi de 9,7 % que apresentou um volume de vazios de 4,0 % , estabilidade Marshall de 820 kgf, resistência à tração de 0,65 MPa (a 25° C), 0,33 MPa (a 30° C) e 0,22 MPa (a 35° C), módulo resiliente de 2086 MPa (25° C), 1068 MPa (30° C) e 780 MPa (35° C). Por fim, foram feitas simulações numéricas com o auxílio do programa de dimensionamento FEPAVE 2, usado no projeto de pavimentação da BR-163/PA, a fim de verificar a possibilidade de emprego do agregado de argila calcinada na camada de revestimento, em espessuras de 5 cm, 7,5 cm e 10 cm. O autor conclui que uma espessura mínima de 7,5 cm era necessária, considerando os dados reais de solicitação de tráfego do projeto original;

d) Cabral (2005) estudou duas amostras de solo argiloso provenientes de Santarém/PA, uma escura e outra clara, uma terceira amostra resultante da mistura das duas, para obtenção de agregado calcinado nas temperaturas de 800 °C, 850 °C, 900 °C, 950 °C e 1000 °C, por 35 minutos. Na tentativa de diminuir a absorção do agregado produzido, incorporou alguns materiais na mistura: 2 % de carvão mineral moído, que não alterou os valores da absorção de água calculados anteriormente; 5 % de cal hidratada, que provocou uma fragilidade no agregado produzido; 2 % de óxido de potássio, que aumentou a absorção do agregado; variou o tempo de queima em 35 minutos, 60 minutos e 120 minutos, cujo resultado apresentou uma redução da absorção no tempo de 60 minutos; aumentou a temperatura de queima em 900 °C, 950 °C, 1000 °C, 1050 °C e 1100 °C, concluindo que com o aumento da temperatura a absorção diminuía. O autor produziu industrialmente numa olaria de Santarém cerca de 400 kg de agregados, usando como matéria-prima a argila da jazida da própria olaria. O processo de queima utilizado foi o mesmo da fabricação de tijolos e telhas daquela empresa, ou seja, 900 °C por 36 horas. Na sequência, os agregados foram enquadrados na faixa B do DNER e a mistura asfáltica dosada pelo método Marshall, composta somente de agregados de argila calcinada + 8,7 % de CAP-20 + 1% de DOPE. Os resultados mecânicos apresentaram resistência à tração (25 °C) de 0,76 MPa, resistência à tração (30 °C) de 0,47 MPa e resistência à tração (35 °C) de 0,33 MPa, módulo resiliente de 3225 MPa e estimativa de vida de fadiga superior para menores diferenças de tensões, embora menor, quando comparada ao concreto asfáltico produzido com agregado natural. O autor concluiu que aquela mistura asfáltica planejada, elaborada para contemplar pela primeira vez uma dosagem de concreto asfáltico,

composto exclusivamente por agregados de argila calcinada industrial (inclusive como *filler*), apresentou resultados extremamente satisfatórios;

- e) Nascimento (2005) utilizou como matéria-prima três amostras de solo de Rio Branco/AC, usadas na indústria da cerâmica vermelha. O processo produtivo de fabricação do agregado calcinado foi semelhante aos procedimentos adotados no projeto piloto da CINASITA, através dos equipamentos do laboratório de Engenharia Civil, da Universidade do Norte Fluminense (UENF). Os agregados foram conformados em forma hexagonal e calcinados a 850 °C, 950 °C, 1050 °C e 1200 °C durante 45 minutos. O agregado escolhido resultou da mistura de dois solos, com temperatura de queima de 1050 °C. A mistura asfáltica, do tipo CBUQ, foi composta de agregado calcinado + areia fina de rio + *filler* de agregado calcinado + CAP-20, com o uso de um melhorador de adesividade (DOPE) e enquadrada na faixa granulométrica recomendada pelo Departamento de Estradas da Louisiana (LDH), por permitir um maior percentual de areia de rio em relação às faixas do DNER. Para atender aos parâmetros de volume de vazios e relação betume-vazios do DNER, seriam necessários 9,5 % de ligante para o primeiro ponto de dosagem da mistura, considerado oneroso. Por essa razão, adotou-se não um teor ótimo e sim um teor de ligante que fosse técnica e economicamente viável, ou seja, teores de 7,5 %, 8,5 % e 9,5 %. Os valores encontrados para tensão de ruptura e módulo resiliente foram respectivamente 1,09 MPa e 4373 MPa, para a mistura composta de 7,5 % de ligante, 1,10 MPa e 4401 MPa, para a mistura com 8,5 % de ligante, 1,22 MPa e 4129 MPa, para a mistura com 9,5 % de CAP. O autor não pode comparar a vida de fadiga das três misturas estudadas por não possuir um projeto mecanístico, considerando

uma mesma estrutura do pavimento, a partir de tensões geradas nessa estrutura com os dados de módulo resiliente de cada um dos materiais;

f) Silva (2006) utilizou como matéria-prima solo da cidade de Santarém/PA, cujo agregado foi produzido em uma olaria da cidade, calcinado a 950 °C e posteriormente britado. Foram produzidas duas misturas, a primeira composta apenas de agregado calcinado e a segunda composta de agregado calcinado + areia + cimento. Na busca de uma curva granulométrica de máxima densificação, o autor ajustou as proporções dos agregados na mistura, baseado em orientações do Instituto de Asfalto. Com isso, a curva granulométrica de projeto da mistura se enquadrou na faixa C do DNER e nas especificações SUPERPAVE. Os corpos de prova moldados foram submetidos a condicionamento térmico em estufa por 2 horas + 5 minutos. Os ligantes usados foram *Stylink Tr* e *Ecoflex B*, com teores de 6 % a 9 % de *Stylink Tr* e teores de 7 % a 10 % de *Ecoflex B*. O autor conclui que os ligantes asfálticos do tipo CAP-20 e CAP-40 não são recomendados para misturas com agregados de argila calcinada, por apresentarem baixa viscosidade. As misturas, sem condicionamento, com o ligante *Stylink Tr* apresentaram os melhores resultados. Àquelas dosadas com o ligante *Ecoflex B* apresentaram menor variação dos resultados para a situação “com e sem” condicionamento;

g) Nunes (2006) utilizou como matérias-primas amostras de argila provenientes de Manaus, Urucu, BR-319/AM e AM-354, calcinadas a aproximadamente 900 °C. O estudo foi focado na verificação do potencial de desenvolvimento de deformações permanentes pelas misturas asfálticas confeccionadas com agregados de argila calcinada. O autor apresentou um modelo viscoplástico desenvolvido na *Texas A&M University*, capaz de prever o desenvolvimento de deformações permanentes a altas temperaturas (60 °C). Os agregados

produzidos apresentaram valores de absorção variando de 18,2 % a 22,8 % e as misturas asfálticas compostas de agregado calcinado + areia + cimento + CAP-20 (teor variando de 6,9 % a 7,7 %), foram enquadradas na faixa do SHRP, especificações SUPERPAVE. Foram realizados ensaios triaxiais à compressão que mostraram o domínio do agregado miúdo no comportamento mecânico das misturas, submetidas a altas tensões confinantes, além de determinar os parâmetros do modelo que refletem a fricção dos agregados, a dilatação da estrutura de agregados, a dependência da pressão confinante, a dependência da taxa de deslocamento e o aparecimento de trincas. Os resultados mostraram que as misturas confeccionadas com agregado calcinado produzido a partir de argilas de Manaus e da BR-319/AM possuem superfícies de fluência elevadas, quando comparadas com as demais misturas, por possuírem uma fricção maior entre os agregados, contribuindo no processo de compactação. O modelo mostrou, segundo o autor, que todas as misturas confeccionadas com agregados calcinados possuem menor potencial de desenvolver deformações permanentes quando comparadas com a mistura padrão utilizando seixo, mostrando assim o potencial da utilização deste agregado em pavimentação na região analisada.

2.4 MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE

2.4.1 CONCEITUAÇÃO E DOSAGEM

Segundo Pinto (2003), os revestimentos asfálticos têm as seguintes finalidades:

- a) Suportar as cargas provenientes do tráfego;
- b) Proteger as camadas subjacentes do pavimento;
- c) Ter boa condição de rolamento;

- d) Flexibilidade;
- e) Resistir à ação abrasiva do tráfego;
- f) Resistência ao intemperismo.

Quanto ao modo de execução, os revestimentos podem ser subdivididos em dois grupos:

- a) por penetração, que são revestimentos construídos em camadas sucessivas de agregados e ligante;
- b) por mistura, que são revestimentos construídos com materiais previamente misturados.

Esses materiais, ou agregados, quando aquecidos, a mistura é dita a quente. Caso contrário, a mistura é dita a frio.

São inúmeras as vantagens das misturas asfálticas a quente, pois são mais duráveis, menos sensíveis a ação da água, mais indicadas para o tráfego intenso ou pesado e menos sujeitas ao desgaste.

O Instituto de Asfalto dos EUA define concreto asfáltico como uma mistura a quente de alta qualidade, constituída por cimento asfáltico e agregado bem graduado, executado sob rigoroso controle de dosagem e compactado numa massa densa e uniforme.

O concreto asfáltico é empregado na construção de pavimentos flexíveis, formando camadas de rolamento ou revestimento (capa), camadas de ligação (binder), camadas de nivelamento ou camadas de base.

O concreto betuminoso usinado a quente ou concreto asfáltico é uma mistura constituída por agregado graúdo, miúdo, material de enchimento (*filler*) e ligante asfáltico, misturados a quente, em usina apropriada, devendo ser espalhados e compactados a quente. Considera-se importante conhecer os conceitos de cada constituinte do concreto asfáltico, como definido por Pinto (2003).

- Agregado graúdo é o material retido na peneira nº 10, de 2,0 mm de abertura de malha. Compreendem as britas, cascalhos, seixos, etc.
- Agregado miúdo é o material que passa na peneira nº 10, de 2,0 mm de abertura de malha, e fica retido na peneira nº 200 (0,074 mm de abertura). São eles pó-de-pedra, areia, etc.
- Agregado ou material de enchimento (*filler*) é o material que passa pelo menos 65 % na peneira nº 200 (0,074 mm de malha). Compreendem cal extinta, cimento *Portland*, pó de chaminé, etc.
- Ligante betuminoso é um material derivado de petróleo que serve para colar, revestir e impermeabilizar objetos (INSTITUTO DE ASFALTO, 2001). Contém betume, ou seja, um hidrocarboneto solúvel no bissulfeto de carbono, com propriedades de aglutinação. O cimento asfáltico de petróleo, conhecido como CAP, é um material semi-sólido à temperatura ambiente, necessitando de aquecimento para assumir consistência apropriada ao envolvimento de agregados, para uso em camadas asfálticas de revestimentos. Estão classificados segundo sua viscosidade em CAP-7, CAP-20 e CAP-40. Com relação à penetração, estão classificados em CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200.

Segundo a NBR 9935, agregado é um material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para a produção de argamassa e concreto. A qualidade dos agregados implica na qualidade do concreto asfáltico, uma vez que compete a eles a responsabilidade de receber e transmitir as cargas provenientes do tráfego.

Agregados cúbicos e de textura áspera proporcionam um maior intertravamento que os agregados lisos e redondos, como seixo rolado e argila expandida. Os cúbicos tendem a travarem-se entre si, resultando uma massa de material mais forte. Já os agregados arredondados tendem a deslizar uns sobre os outros (MOTTA *et al*, 1996). Ainda segundo Motta (1996), quando uma

massa de agregados é carregada, pode ocorrer o deslizamento ou cisalhamento de uma camada sobre a outra, resultando em deformação permanente da massa. Nesse momento, a tensão de cisalhamento excede a resistência ao cisalhamento da massa do agregado.

Para assegurar misturas de agregados mais resistentes para uso em CBUQ, têm-se especificado propriedades de agregados que aumentem o atrito interno, isto é, especificando-se certa percentagem mínima de faces fraturadas na porção grossa da mistura de agregados. Nesse contexto, a quantidade de areia na mistura deve ser limitada, por possuir forma arredondada, com atrito interno pequeno.

2.4.2 GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS DA MISTURA

A composição granulométrica de um agregado classifica as suas partículas pelos respectivos tamanhos e as frações percentuais em pesos correspondentes a cada tamanho. A distribuição dos tamanhos das partículas, expressa em percentagem do peso total, é chamada graduação do agregado. Essa graduação é obtida fazendo-se passar o material através de uma série de peneiras empilhadas com aberturas progressivamente menores e pesando-se o material retido em cada peneira (SILVA, 2006).

Para Roberts *et al.* (1996) *apud* Silva (2006), no entanto, expressar a graduação como uma porcentagem do volume total é mais importante, porém a graduação como uma percentagem do peso é mais fácil e já é um padrão tradicional. As graduações pelo volume e peso são aproximadamente iguais. Se existem grandes diferenças nos pesos específicos aparentes dos agregados usados em uma mistura, então a graduação deve ser determinada como uma porcentagem do volume total. A graduação é uma importante propriedade do agregado, pois

exerce influência na rigidez, na estabilidade, na durabilidade, na permeabilidade, na trabalhabilidade, na resistência à fadiga, resistência por atrito e resistência ao dano por umidade.

Roberts *et al.* (1996) consideraram ainda uma mistura betuminosa bem graduada como aquela que possui um arranjo das partículas mais denso. Pois com uma densidade máxima ter-se-á um aumento na estabilidade da mistura, em razão do maior contato entre as partículas do agregado, de forma a reduzir os vazios no agregado mineral. Contudo, são necessários espaços vazios suficientes para permitir que o CAP seja incorporado, de forma a assegurar durabilidade e evitar exsudação e/ou baixa estabilidade.

Certos limites de graduação de agregados são usualmente exigidos em misturas asfálticas. Como é raro a possibilidade de um único material natural ou britado alcançar os limites pré-estabelecidos, dois ou mais agregados de diferentes graduações são geralmente misturados para esse fim. Com efeito, o DNIT por meio da especificação de serviço ES-031/2006, estabelece as composições granulométricas dos agregados para utilização em concreto asfáltico, demonstradas na tabela 3.

Peneiras	Abertura (mm)	Faixa A (%)		Faixa B (%)		Faixa C (%)		Tolerância (%)
		Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	
2 pol	50,8	100	100	100	100	100	100	7
1 ½ pol	38,1	95	100	100	100	100	100	7
1 pol	25,4	75	100	95	100	100	100	7
¾ pol	19,1	60	90	80	100	100	100	7
½ pol	12,7	-	-	-	100	80	100	7
3/8 pol	9,5	35	65	45	80	70	90	7
Nº 4	4,8	25	50	28	60	44	72	5
Nº 10	2,0	20	40	20	45	22	50	5
Nº40	1,2	10	30	10	32	8	26	5
Nº80	0,18	5	20	8	20	4	16	3
Nº200	0,074	1	8	3	8	2	10	2

Tabela 3 – Limites das faixas granulométricas do concreto asfáltico – DNIT-ES 031/2006

2.4.3 ENVELHECIMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

A interação do cimento asfáltico com o meio ambiente provoca o envelhecimento de misturas, isto é, o endurecimento da mistura betuminosa em serviço, contribuindo para a deterioração do pavimento com o aparecimento de trincas, buracos, panelas e desagregação. O processo de envelhecimento acarreta modificações na composição química e na estrutura coloidal do ligante. Na tentativa de simular o envelhecimento em laboratório, pesquisadores desenvolveram várias técnicas de curto e longo prazo, com vistas a avaliar as causas deste processo e seus efeitos em ligantes e misturas betuminosas (LEITE *et al.*, 2005).

Mirza e Witczack (1995) dividiram o processo de envelhecimento do ligante asfáltico em duas fases: envelhecimento de curto prazo, decorrente da usinagem da mistura asfáltica até seu espalhamento na pista e envelhecimento de longo prazo, que ocorre durante a vida útil do pavimento, cujos fatores de contribuição são o teor de vazios da mistura, espessura da película de betume que envolve o agregado, absorção e profundidade da camada asfáltica.

Misturas asfálticas virgens e envelhecidas naturalmente e artificialmente, foram avaliadas por Santanna-Greco *et al.* (2004) e constataram que os valores de módulo de resiliência foram maiores para as misturas envelhecidas sob a ação do clima, seguidas por misturas asfálticas que sofreram algum tipo de envelhecimento acelerado e por misturas não envelhecidas, ou seja, virgens.

Para os agregados com alto poder de absorção, uma grande quantidade de ligante asfáltico é absorvida. Isso provoca uma mudança nas características físicas da mistura asfáltica, como por exemplo, o volume de vazios e a relação betume-vazios. A quantidade de ligante absorvido durante o processo de envelhecimento da mistura deve ser levada em conta e a mistura final envelhecida deve atender às solicitações do tráfego (SILVA, 2006).

CAPÍTULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PROCEDÊNCIA DOS MATERIAIS

A expansão demográfica e econômica da cidade de Manaus e o dinamismo da construção civil ensejado por este crescimento vêm exigindo dos órgãos de pesquisa mineral a geração de informações atualizadas sobre as áreas de ocorrência de bens minerais, que possam constituir fonte de matéria-prima, tais como argila, areia, cascalho, seixo e brita. A necessidade, principalmente, da argila para uso na cerâmica vermelha, tem sido constatada por meio da atividade de um grande número de olarias concentradas em três principais pólos cerâmicos nas proximidades de Manaus, que são Manacapuru, Iranduba e Careiro, compondo o Domínio Baixo Solimões. A matéria-prima usada nesta pesquisa para a produção do agregado sintético calcinado provém dessa região, mais especificamente entre os municípios de Manacapuru e Iranduba, figura 5.

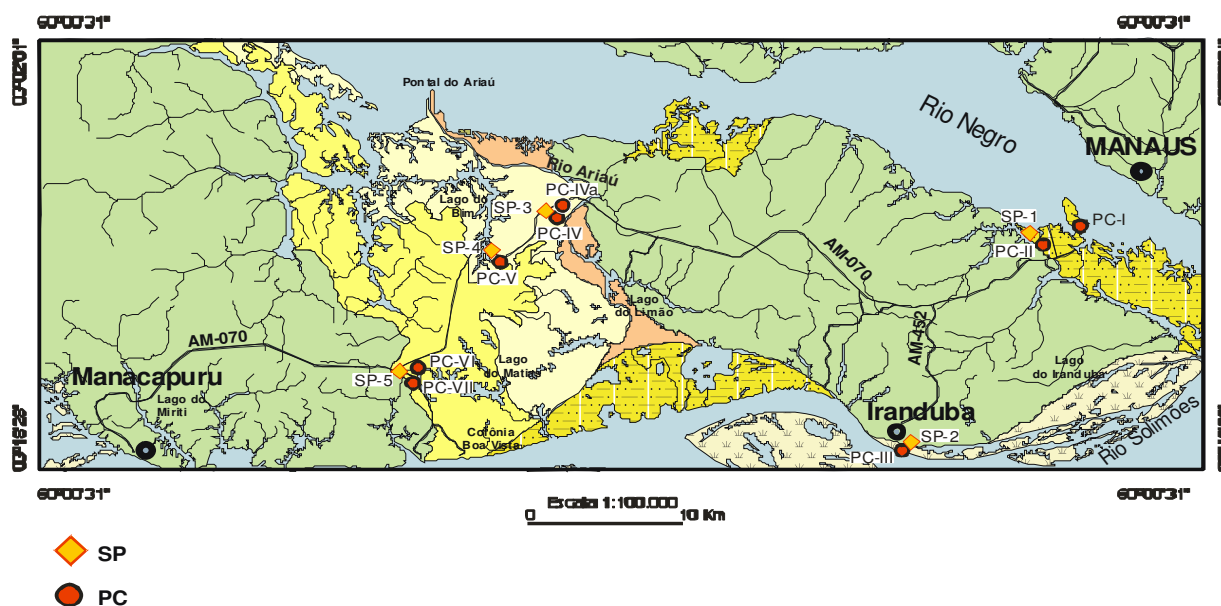


Figura 5 – Área de localização do pólo cerâmico Manacapuru/AM–Iranduba/AM

A ligação desses municípios com Manaus é feita por meio de balsas. Os municípios de Iranduba e Manacapuru estão interligados pela rodovia Manoel Urbano, AM-070, principal via de acesso da região, estendendo-se por 84 km até a sede de Manacapuru. Esta rodovia tem início no porto do Cacau-Pirêra, distrito que acolhe a maior concentração de olarias, estendendo-se por 12 km, ao Sul, com a sede de Iranduba, local de ocorrência do pólo oleiro de telhas.

Os aspectos relacionados às atividades de extração de argila nos municípios de Iranduba e Manacapuru foram bem retratados por *Woeltje et al.* (2002), apontando as causas e efeitos que direta ou indiretamente encontram-se relacionados às atividades de lavra e aos processos produtivos oleiros, no tocante à degradação dos meios físico, químico, e biótico. Os autores sugeriram mecanismos e técnicas adequadas para o desenvolvimento da pesquisa e lavra, assim como propuseram modelos e procedimentos para melhor preservar e recuperar as áreas degradadas pela atividade.

O Baixo Solimões e Baixo Negro constituem a Formação Alter do Chão, cujos solos são compostos por quartzo, arenitos róseos, arenitos arcoseanos pouco consolidados, arenitos caulíníticos e caulins. Processos de laterização vieram formar argilas mosqueadas, com depósitos de areias sobre uma fácies arenosa. Cinco unidades sedimentares foram identificadas para o Domínio Baixo Solimões, três holocênicas, uma tércio-quaternário e outra cretácea (REIS & FIGUEIREDO, 1983). Na região compreendida entre os municípios de Iranduba e Manacapuru, foram encontrados arenitos com aspecto de “borra de café”, sobreposto por um nível centimétrico de caulim, que lateralmente evidencia geometria lenticular, recoberto por 20 cm de novo nível de arenito “borra de café”, sobreposto por caulim lenticular, arenito amarronzado a amarelados, cujo topo aparece um arenito siltico a caulínítico e onde a fração argilosa é variável. (D’ANTONA *et al.*, 2007).

Nas proximidades dos afloramentos areníticos esbranquiçados ou horizontes saprolíticos arenosos é comum a presença de depósitos de areias, principalmente na rodovia AM-352, rica em quartzo e feldspato da Formação Alter do Chão. D'Antona (2007) classificou os depósitos minerais industriais localizados na região do Baixo Solimões em depósitos residuais, aluviais e formacionais. Constituem depósitos formacionais os níveis de caulim (não explorados), de arenitos, siltitos e argilitos silicificados (Arenito Manaus), da Formação Alter do Chão, que são explorados para brita e pedra em bloco. Os depósitos residuais resultam da ação do intemperismo e lixiviação sobre rochas sedimentares da formação Alter do Chão, formando perfis lateríticos, piçarra, argila, argila caulínica, caulim, areia residual e arenito alterado. A Formação Alter do Chão situa-se predominantemente em terrenos topograficamente mais elevados, constituindo as terras firmes. Já os depósitos aluviais resultam da acumulação de sedimentos ao longo da calha e das margens dos cursos d'água. Constituem as áreas de várzeas, sujeitas às inundações periódicas.

As argilas usadas para a cerâmica vermelha, como também para a fabricação de agregado sintético calcinado, podem ser geneticamente classificadas em residuais e transportadas. As residuais ou primárias resultam da ação do intemperismo sobre as rochas da Formação Alter do Chão, permanecendo no local onde se formaram e são usadas pelos ceramistas para produção de tijolos. Este material argiloso tem coloração avermelhada mais para o topo, a esbranquiçada mais para a base. As manchas avermelhadas representam produto de alteração de argila (illita e caulinita) sob forma de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. A porção saprolítica é mais plástica e esbranquiçada, constituída de esmectita. As argilas transportadas são aquelas formadas por processos eminentemente deposicionais e encontram-se nas aluviões dos rios, ricas em

matéria orgânica. São geralmente empregadas na fabricação de telhas e na cerâmica artística (D'ANTONA *et al.*, 2007).

Ainda, segundo aqueles autores, as areias encontram-se em três tipos de depósitos: residual pedogenético (areia de terra firme), residual intempérico (arenitos parcialmente alterados) e depósito aluvionar. As mais abundantes e exploradas são do tipo residual, de cor esbranquiçada, com granulometria de fina a grossa, essencialmente quartzosa (com feldspato). Nos estudos realizados nos areais de Manaus, Horbe *et al.* (2003) relacionaram sua gênese a processos intempéricos, com lixiviação de caulinita e corrosão do quartzo, no horizonte saprolítico.

Outro recurso mineral de grande interesse do projeto é o seixo, que tem substituído o arenito sob forma de brita, por restrições ambientais e em razão das distâncias de transporte das áreas de pedreiras até o centro consumidor.

Como dito anteriormente, o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) é uma mistura constituída por agregado graúdo, miúdo, material de enchimento (*filler*) e ligante asfáltico. Os materiais empregados nesta pesquisa estão relacionados no quadro 2 .

MATERIAL	PROCEDÊNCIA
Argila	Jazida da Cerâmica Manaus (km 38 da rodovia AM-070, de coordenadas geográficas 3° 08' 0.35" S e 60° 22' 6.02" W)
Areia de jazida	Comércio de Manaus
Seixo de rio	Comércio de Manaus
Cimento Portland (<i>filler</i>)	Comércio de Manaus
Cimento asfáltico – CAP 50/70	Refinaria de Manaus
Agregado sintético calcinado	Produzido no laboratório de pavimentação da UFAM

Quadro 2 – Procedência dos materiais constituintes do CBUQ

3.2 PROCESSO PRODUTIVO DO AGREGADO SINTÉTICO DE ARGILA CALCINADA

Estudos realizados pela Universidade Federal do Amazonas demonstraram a viabilidade técnica do uso de argilas provenientes da região de Iranduba e Manacapuru, na produção de agregados sintéticos de argila calcinada (CAMPELO *et al.*, 2005). Várias amostras de solo de matriz argilosa foram coletadas daquela região, dentre elas a argila utilizada nesta pesquisa, apresentada na figura 6.



Figura 6- Argila usada para a produção do agregado sintético calcinado

Buscou-se reproduzir, em laboratório, o processo produtivo que seria adotado pela indústria cerâmica, em nível industrial, de forma manual e bastante artesanal. Para tanto, o laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Amazonas confeccionou um moinho, demonstrado na figura 7, composto de três boquilhas quadradas e móveis, de dimensões de 12,7 mm, 9,5 mm e 4,8 mm. Devido à dificuldade na confecção da boquilha, os agregados sintéticos de dimensão de 2,0 mm foram obtidos por peneiramento, após trituração na máquina Los Angeles dos demais agregados, ou seja, sua conformação geométrica ficou aleatória, ao contrário dos demais agregados de conformação próxima à cúbica. Este processo, embora lento e bastante trabalhoso, forneceu agregados de boa qualidade e aceitável porosidade.



Figura 7 – Moinho para moldagem do agregado de argila

O procedimento adotado para a produção dos agregados atendeu a seguinte seqüência:

- a) Inicialmente a argila foi coletada do pátio da cerâmica Manaus, armazenada em sacos plásticos e transportada para o laboratório de Pavimentação da UFAM. Foi então, quarteada, desagregada, peneirada e seca ao ar. Na seqüência, foi umedecida com umidade próxima ao limite de plasticidade e homogeneizada com as mãos, a fim de quebrar os grumos existentes;
- b) Em seguida, a argila em estado plástico, foi introduzida no moinho, que ao ser acionado manualmente, permitia a passagem das barras de argila, na dimensão correspondente da boquilha instalada previamente;
- c) As barras foram cortadas manualmente, formando agregados de comprimento médio de 10 mm;
- d) Os agregados já cortados foram expostos para secagem ao ar por aproximadamente 24 horas, em tempo seco e 48 horas, em tempo chuvoso; o processo de secagem permite a perda de parte da água livre, que confere à peça cerâmica maior resistência mecânica. Sabe-se que uma peça queimada com teor excessivo de água pode resultar no aparecimento de trincas, em razão da explosão de bolhas ou contrações internas. 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 ao trincamento;

- e) Após secos, os agregados foram calcinados em forno elétrico, tipo mufla, marca FANEM, modelo 412, de dimensões internas 20 cm x 30 cm x 14 cm e velocidade de aquecimento de 7 °C/minuto, pertencente ao laboratório de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Amazonas. Os agregados foram calcinados nas temperaturas de 780 °C, 850 °C, 950 °C, 1050 °C e 1150 °C por um período de uma hora, depois de atingida a temperatura desejada; após este período, o forno foi desligado e permaneceu fechado até atingir a temperatura ambiente.

Todo o procedimento de produção do agregado de argila está demonstrado na figura 8.



Figura 8 – Processo produtivo do agregado de argila: a) homogeneização; b) moinho para moldagem dos agregados;



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 8 – Processo produtivo do agregado de argila: c) porções de argila umedecida; d) extrusão; e) corte; f) secagem ao ar; g) calcinação; h) agregado calcinado.

O processo de queima exerce forte influência na qualidade da massa cerâmica, pois com o incremento da temperatura ocorrem as seguintes transformações (MÁS, apostila 4):

- a) saída da umidade residual: existem dois tipos de água, a água da umidade, que sai por volta de 100 °C e a água interna do cristal da argila crua, que sai entre 550 °C e 600 °C. Durante a saída da água de umidade, o forno funciona como um secador. Nesse momento, é importante controlar a umidade, pois se esta estiver acima de 3 %, perder-se-á resistência mecânica enquanto verde e ainda correrá o risco da peça cerâmica estourar, sob efeito das tensões internas produzidas;
- b) decomposição das argilas (passagem de cru a queimado inicial): a 500 °C ainda existem moléculas de água dentro do cristal de argila. A argila estará crua enquanto possuir moléculas de água cristalina. No momento em que perde esta água de constituição, as propriedades argilosas serão perdidas de modo irreversível. Entre 550 °C e 650 °C, acontece a passagem de cru para queimado;
- c) variação brusca de tamanho na temperatura do choque térmico: este efeito gera as trincas de queima. Algumas são trincas abertas de pré-aquecimento; outras são trincas invisíveis de resfriamento;
- d) decomposição dos carbonatos, liberando cal viva que fica sem reagir: entre 850 °C e 1000 °C ocorre a decomposição dos carbonatos. O carbonato de cálcio se decompõe à temperatura mais alta que a dolomita (carbonato de cálcio e magnésio);
- e) sinterização das partículas cristalinas soltas: pode ser considerada como uma espécie de “solda interna” entre as partículas cristalinas. Na fase crua, as partículas estavam ligadas pela plasticidade. Acima de 900 °C, os fundentes (óxidos de potássio, sódio e ferro, entre outros) formam líquidos de alta temperatura, ou seja, vidros. No resfriamento, os vidros

internos formam uma espécie de “pontos de solda” entre as partículas cristalinas. A isso chama-se sinterização;

- f) volatilização dos sais e incorporação: às vezes existem sais nos materiais cerâmicos em forma de eflorescências brancas. Nas temperaturas baixas de queima, os sais não se incorporam nos silicatos. Acima de 950 °C, parte dos sais se volatiliza, parte reage com os silicatos. Assim, os sais solúveis acabam sendo eliminados com o aumento da temperatura;
- g) reorganização das estruturas cristalinas: a partir de 1000 °C, os cristais se reorganizam em novas estruturas cristalinas, provocando aumento na resistência mecânica e queda na absorção de água;
- h) sinterização avançada: processo que ocorre com o grés e a porcelana, cuja absorção chega a 3 % e 0,1 %, respectivamente.

Motta *et al.* (2002) explicaram que as matérias-primas não plásticas atuam na fase do processamento térmico, quando desempenham o papel mais relevante, controlando as transformações e a sinterização. Devido principalmente ao seu papel na fase de queima, os materiais não plásticos são ainda qualificados de inertes, vitrificantes e fundentes.

Menezes *et al.* (2002) elaboraram estado-da-arte sobre a possibilidade de utilização dos resíduos industriais e urbanos como matéria-prima da cerâmica alternativa, enfocando a indústria cerâmica como uma fonte economicamente viável e ecologicamente correta para a reciclagem de resíduos. Também descreveu que os resíduos redutores de plasticidade não necessariamente atuam apenas reduzindo a plasticidade das massas cerâmicas, mas também como agentes formadores da fase vítrea, o que, em muitas aplicações, é um fator de grande influência no sucesso do uso desses resíduos para a produção de tijolos, revestimentos, grés e produtos de baixa

absorção de água (produtos com grande valor agregado), evidenciando-se que a fase vítrea formada pode atuar preenchendo os poros do material, ou como matriz vítrea ligante de grãos cristalinos.

Quanto aos resíduos fundentes, os autores explicaram que sua principal característica é a de produzir diminuição na temperatura de maturação do corpo cerâmico, possibilitando redução do consumo energético, graças à nova característica da massa cerâmica. Esses resíduos provêm da lama de esmaltação das cerâmicas e dos rejeitos da indústria mecânica e metalúrgica, com uma composição sílico-aluminosa, contendo percentagens variáveis de metais pesados, alcalinos e alcalinos terrosos, com presença freqüente de Cr, Co, Ni, Cd, Cu, Zn, Pb e outros. A tabela 4 apresenta os componentes fundamentais e auxiliares que compõem os corpos cerâmicos.

Componentes fundamentais				
Funções	Componente plástico	Componente não-plástico		
	• Dar mobilidade à massa • Atuar como agente de suspensão em meio aquoso; • Dar coesão e solidez à massa verde e crua, responsável pela retração durante a secagem; • Constitui-se na maior parte do corpo cerâmico, transformando-se em novo composto predominantemente cristalino; • Atribuir coloração natural e característica às peças cerâmicas, devido às substâncias corantes contidas.	Componente inerte	Componente vitrificante	Componente fundente
		• Diminuir a plasticidade; • Permanece inalterado durante todo o processo de fabricação do produto cerâmico, quando de natureza refratária. Se é um vitrificante, como o quartzo, e possui granulometria grossa é inerte na queima; • Constitui o esqueleto da massa cerâmica • Aumenta a porosidade aberta.	• É o responsável pela formação da fase vítrea com a contribuição do componente fundente.	• Abaixa a temperatura que forma a fase vítrea, responsável pela fusão do componente plástico; • Na cerâmica gresificada, determina a quantidade de fase vítrea e sua temperatura de formação, a qual diminui a porosidade do produto e acentua a retração de queima; • Na cerâmica não-gresificada, participa da reação na formação de silicato e sílico-aluminato cristalino que assegura a resistência mecânica e coesão do produto; • Na massa crua, atua como desplastificante.
Matéria-prima	• Argilas, caulim e outros filossilicatos	• Chamote, sílica, cinza natural, cinza volante, escória de alto forno	• Sílica (areia quartzosa, quartzo e quartzito)	• Carbonatos e rochas carbonáticas; • Feldspatos e rochas feldspáticas; • Silicatos de metais alcalinos terrosos.
Componentes Auxiliares				
	Fluidificante	Ligante	Defloculante	Plastificante/Lubrificante
Funções	Favorece o escoamento e a dispersão das partículas da massa.	Une as partículas da massa crua, permitindo a queima ou manuseio.	Evita a decantação das partículas em uma suspensão aquosa.	Aumenta a plasticidade da massa.
Matéria-prima	Água, polímeros	• Água; • Ligante inorgânico (caulinita, esmectita); • Ligante orgânico.	Carbonato e silicato de sódio, fosfato e polifosfato de metais alcalinos, ácidos orgânicos, poliacrilatos, celulose.	• Inorgânicos (grafite, talco, argila, mica); • Orgânicos (glicol, ester)

Tabela 4 – Funções dos componentes fundamentais dos corpos cerâmicos

Fonte: Motta *et al.*, 2002.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Sabe-se que a matéria-prima argilosa constitui um dos fatores principais para produzir um bom agregado sintético. Como já dito anteriormente, o agregado graúdo mais usado nesta região é o seixo de rio, conhecido como seixo rolado. Ensaio laboratoriais têm demonstrado que o diâmetro máximo deste agregado corresponde a 12,7 mm. Por esta razão, os agregados sintéticos produzidos nesta pesquisa possuem frações granulométricas correspondentes ao seixo, isto é, de dimensões de 12,7 mm, 9,5 mm, 4,8 mm e 2,0 mm.

Também é sabido que os agregados usados em pavimentação devem possuir boa resistência mecânica e suportar as cargas impostas pelo tráfego. Os naturais, em geral, possuem elevada massa específica, com poucos vazios. Isto é demonstrado facilmente quando se analisa o valor de absorção de água, cerca de 1 % a 2 %. O desafio maior deste trabalho é conseguir produzir um bom agregado, no que diz respeito à resistência mecânica e com menor absorção de água possível, variando a temperatura de queima deste agregado. Com efeito, os agregados sintéticos aqui produzidos foram calcinados a 780 °C, 850 °C, 950 °C, 1050 °C e 1150 °C, para uso em concreto asfáltico.

Os materiais constituintes do concreto asfáltico são agregados graúdos (seixo e argila calcinada), agregado miúdo (areia), *filler* (cimento) e ligante asfáltico (CAP 50/70). A seguir, será caracterizado cada componente constituinte do concreto asfáltico, a fim de que se possa reproduzir os resultados alcançados.

3.3.1 ARGILA

A argila é a matéria-prima usada para produzir o agregado graúdo sintético do concreto asfáltico. As amostras de argila, armazenadas em sacos de aproximadamente 50 kg, foram postas

para secar ao ar, em seguida destorroadas e submetidas aos ensaios de caracterização física, química e mineralógica. Estes ensaios compreendem a análise granulométrica, por peneiramento e sedimentação, determinação dos seus limites de consistência - limite de liquidez e limite de plasticidade -, composição química e mineralógica e a massa específica real dos grãos.

Os ensaios preliminares para caracterização do solo foram executados segundo as normas preconizadas pelo DNER, hoje DNIT, como descrito no quadro 3, além daqueles para determinação das composições química e mineralógica presentes nas amostras.

Método de ensaio	Título
DNER-ME 041/94	Preparação de amostras para ensaio de caracterização
DNER-ME 051/94 e ME 080/94	Análise granulométrica por sedimentação e peneiramento
DNER-ME 082/94	Determinação do limite de plasticidade
DNER-ME 122/94	Determinação do limite de liquidez
DNER-ME 093/94	Determinação da densidade real do solo
Espectrometria de energia dispersiva de raios-x (EDS)	Composição química da argila
Difração de raios-x	Composição mineralógica da argila

Quadro 3 – Ensaio preliminares para caracterização do solo

3.3.1.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA ARGILA

A análise granulométrica determina as dimensões das partículas do solo e as proporções relativas às suas designações próprias. Segundo a escala granulométrica da ABNT-NBR 6502 (Associação Brasileira de Normas Técnicas), as frações de solo são classificadas em pedregulho, compreendido entre 76 mm e 2,0 mm; areia, entre 2,0 mm e 0,06 mm; silte, entre 0,06mm e

0,002 mm e argila, frações inferiores a 0,002 mm. A matéria-prima objeto deste estudo é um solo argiloso empregado na fabricação de produtos cerâmicos. Essas frações são representadas, graficamente, na curva granulométrica em um diagrama semilogarítmico. No eixo das ordenadas representa-se a porcentagem que passa na série de peneiras normais e intermediárias e no eixo das abscissas representa-se o diâmetro das partículas. Neste caso, a determinação da granulometria foi feita por peneiramento e sedimentação.

Para o peneiramento, utilizou-se as peneiras de abertura 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm, 4,8 mm, 2,0 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,30 mm, 0,15 mm e 0,075 mm.

A fração mais fina de solo, com granulometria inferior a 0,074 mm, foi tratada de forma diferenciada através do ensaio de sedimentação.

3.3.1.2 LIMITES DE CONSISTÊNCIA DA ARGILA

A argila, por possuir uma fração muito fina de solo, necessita da realização dos ensaios de caracterização de sua plasticidade e liquidez. Quanto menores as partículas, maior a superfície específica (superfície das partículas dividida pelo volume ou peso). O comportamento de partículas com superfícies específicas tão distintas perante a água é muito diferenciado. Por outro lado, as partículas de argila se diferem acentuadamente pela estrutura mineralógica, bem como pelos cátions adsorvidos. Desta mesma forma, para a mesma porcentagem de fração argila, o solo pode ter comportamento muito diferente, dependendo das características dos minerais presentes. A consistência do solo é medida por meio dos limites de liquidez e de plasticidade, nos quais este solo pode se encontrar.

3.3.1.3 MASSA ESPECÍFICA REAL DA ARGILA

Lambe e Whitman (1990) e Taylor (1961) relataram que a massa específica real dos sólidos de um solo é função dos minerais constituintes e da percentagem de ocorrência desses minerais no solo. Os minerais compostos por ferro são os mais densos e, portanto, o solo que contém uma parcela significativa deste elemento tenderá a uma massa específica real superior a 3 g/cm³. O conhecimento da massa específica dos sólidos se faz necessário para caracterizar o solo quanto aos valores dos seus índices físicos em certo momento. Por ser dependente dos minerais constituintes do solo, é um valor que se altera muito pouco com o tempo.

O método de ensaio usado foi o padronizado pelo DNER- ME 093/94, no qual é usado um picnômetro para determinação da massa específica real dos sólidos.

3.3.1.4 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ARGILA

Para que as argilas sejam consideradas adequadas ao uso de agregados leves, pode-se recorrer ao trabalho desenvolvido por Riley (1951), que resultou no diagrama já demonstrado na figura 4, em que a argila é enquadrada num gráfico ternário, com coordenadas x, y e z, correspondentes às percentagens de Fe₂O₃, SiO₂ e Al₂O₃, respectivamente.

A análise química das amostras de argila foi realizada no Instituto Nokia de Tecnologia. A caracterização química foi realizada por espectrometria de energia dispersiva de raios-x (EDS), no equipamento *System Six da Thermo Electron*, acoplado ao microscópio eletrônico de varredura JSM6460LV da JEOL, com quantificação dos respectivos elementos químicos, em forma de óxidos.

O EDS é um equipamento acoplado ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) que permite a composição qualitativa e semi-quantitativa dos elementos químicos constituintes da amostra em análise.

O método consiste na varredura da amostra por um feixe de elétrons que, ao incidir sobre o mineral, provoca excitação dos elétrons e/ou íons mais externo. Os átomos da amostra, ao serem excitados, produzem raios-x nas energias características de seus elementos constituintes. Esse elétron do átomo é promovido de camada e ao retornar ao estado fundamental libera a energia adquirida, a qual é emitida em comprimento de onda no espectro de raios-x. O comprimento de onda característica, com intensidade relativa, depende da concentração do átomo que lhe deu origem na amostra, proporcionando, assim, as bases para a análise qualitativa e semi-quantitativa. O espectro de linhas característico possui uma série de comprimentos de onda próprios do elemento emissor.

3.3.1.5 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DA ARGILA

A difratometria de raios-x corresponde a uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos, encontrando aplicações em diversos campos do conhecimento, mais particularmente na engenharia e ciências de materiais.

Os raios-x, ao atingirem um material, podem ser espalhados elasticamente, sem perda de energia pelos elétrons de um átomo (dispersão ou espalhamento coerente). O fóton de raios-x, após a colisão com o elétron, muda sua trajetória, mantendo, porém, a mesma fase e energia do fóton incidente. Sob o ponto de vista da física ondulatória, pode-se dizer que a onda eletromagnética é instantaneamente absorvida pelo elétron e reemitida; cada elétron atua, portanto, como centro de emissão de raios-x.

Se os átomos que geram este espalhamento estiverem arranjados de maneira sistemática, como em uma estrutura cristalina, apresentando entre eles distâncias próximas ao comprimento de onda da radiação incidente, pode-se verificar que as relações de fase entre os espalhamentos tornam-se periódicas e que os efeitos de difração dos raios-x podem ser observados em vários ângulos. A intensidade difratada, dentre outros fatores, é dependente do número de elétrons no átomo. Adicionalmente, os átomos são distribuídos no espaço, de tal forma que os vários planos de uma estrutura cristalina possuem diferentes densidades de átomos ou elétrons, fazendo com que as intensidades difratadas sejam, por consequência, distintas para os diversos planos cristalinos. Os dados gerados pelo ensaio são compilados em difratogramas, onde a intensidade dos picos de difração está relacionada com os respectivos ângulos de difração, que variam no decorrer da análise, segundo a Lei de Bragg.

A análise mineralógica foi efetuada no laboratório de Difração de Raios-X, do Departamento de Geociências, do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal do Amazonas. A amostra foi separada em duas frações, constituindo-se inicialmente pela fração de solo passada na peneira de abertura de 2,0 mm e a segunda fração constituída por argila, separada por processo de sedimentação.

3.3.2 AGREGADO SINTÉTICO DE ARGILA CALCINADA

Os agregados sintéticos produzidos a partir de solo argiloso, proveniente da Cerâmica Manaus, localizada no km 38 da rodovia AM-070, foram submetidos aos ensaios de caracterização, segundo as normas preconizadas pelo DNER, hoje DNIT, como descrito no Quadro 4.

Método de ensaio	Título
DNER-ME 225/94	Determinação da perda de massa após fervura
DNER-ME 195/97	Determinação da absorção e massa específica de ag. graúdo
DNER-ME 222/94	Desgaste por abrasão Los Angeles
DNER-ME 078/94	Adesividade a ligante betuminoso
Espectrometria de energia dispersiva de raios-x (EDS)	Composição química
Difração de Raios-x	Composição mineralógica
Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	Micro visualização da superfície, inclusive porosidade

Quadro 4 – Ensaio de caracterização do agregado sintético

3.3.2.1 PERDA DE MASSA APÓS FERVURA, DO AGREGADO SINTÉTICO

Este ensaio objetiva verificar a quantidade de desidratação dos agregados, na qual a norma DNER-EM 230/94 estabelece um nível de desgaste menor que 6 %, para o agregado sintético de argila calcinada, tipo argila não expandida, classe II, grupo A.

O ensaio consiste em encher até a metade um frasco de vidro (*Erlemeyer*) de 500 cm³ com amostra de agregado calcinado. Adiciona-se 200 cm³ de água destilada no frasco e coloca-se o conjunto, amostra mais frasco mais água destilada numa panela de pressão de uso doméstico. Adiciona-se água destilada à panela, até formar uma lâmina d'água de aproximadamente 2 cm. Em seguida, a panela é fechada hermeticamente e levada ao fogo para ferver por 15 minutos, contados do início da pressão. Findo este prazo, deixa-se o frasco com a amostra resfriar até a temperatura aproximada de 27 °C.

Prosseguindo-se, o frasco é arrolhado e vibrado por 30 minutos em um agitador de peneiras. Após este tempo, a amostra é lavada na peneira nº 40, de 0,42 mm de abertura de malha, e secada em estufa, tomando-se o cuidado de não perder nem o material retido, nem o que passou nesta peneira.

Determina-se, então, a percentagem de desgaste do agregado sintético, aplicando-se a expressão:

$$\text{Desgaste} = \frac{\text{massa da amostra passante na peneira nº 40}}{\text{massa total da amostra}} \times 100 \%$$

A figura 9 mostra etapas da execução do ensaio de desgaste após fervura, para agregado sintético de argila calcinada.



Figura 9 – Etapas do ensaio de desgaste após fervura: a) fervura; b) agitação

3.3.2.2 ABSORÇÃO E MASSA ESPECÍFICA DO AGREGADO SINTÉTICO

Este ensaio permite avaliar a variação da absorção de água em função da temperatura de queima do agregado sintético, fazendo uma analogia para o consumo de ligante asfáltico. A quantidade de água, ou líquido qualquer, capaz de preencher os poros, define uma propriedade

importante dos agregados, sobretudo àqueles produzidos sinteticamente, como é o caso específico deste trabalho.

O método de ensaio utilizado neste trabalho foi DNER-ME 195/97, o qual consiste em lavar cerca de 2,0 kg de amostra sobre a peneira nº 4, de 4,8 mm de abertura de malha, e em seguida secar em estufa até constância de massa, à temperatura de 105 °C a 110 °C. Ao fim deste prazo, o agregado é imerso em água, à temperatura ambiente, por 24 ± 4 horas, como ilustrado na figura 10. Na sequência, remove-se toda água do agregado e espalha-o sobre um pano absorvente, enxugando as partículas maiores, a fim de se determinar a massa da amostra na condição saturada, superfície seca. Imediatamente após, pesa-se o agregado, por meio de um recipiente acoplado em uma balança e submerso em água à temperatura de 23 ± 2 °C. Em seguida, seca-se a amostra em estufa até constância de massa e pesa-se a mesma, a fim de se calcular a massa específica e absorção, por meio das expressões:

$$\gamma = \frac{A}{B-C} \quad \text{e} \quad a = \frac{B-A}{A} \times 100$$

Onde:

γ = massa específica do agregado, na condição seca, em g/cm³;

A = massa do agregado seco, em g;

B = massa do agregado na condição saturada, superfície seca, em g;

C = leitura correspondente ao agregado imerso em água;

a = absorção do agregado, em porcentagem.



Figura 10 - Ensaio de absorção de água

3.3.2.3 DESGASTE POR ABRASÃO LOS ANGELES, DO AGREGADO SINTÉTICO.

O método DNER-ME 222/94 fixa as condições necessárias para a determinação do desgaste por abrasão, do agregado sintético de argila calcinada, realizado na máquina Los Angeles. O agregado sintético produzido nesta pesquisa está classificado, segundo a norma DNER-EM 230/94, como argila não expandida, classe II, grupo A, a qual estabelece como limite máximo para o desgaste por abrasão o valor de 35 %. É determinada a composição granulométrica da amostra, cujo resultado permite enquadrá-la em uma das quatro graduações especificadas, isto é, graduação A, B, C ou D. Cada graduação possui quantidades de amostras parciais que devem ser tomadas por peneiras e que contemplem, para qualquer das quatro graduações, cerca de 5000 g de amostra total.

O material deste estudo foi enquadrado na graduação C, ou seja, 2500 g da amostra retida na peneira de 9,5 mm, mais 2500 g da amostra retida na peneira de 4,8 mm de abertura. Anotou-se a soma das massas das frações das amostras de AGC, que foram colocadas na máquina Los Angeles, juntamente com a carga abrasiva, composta por oito esferas de aço, perfazendo uma carga total de 3330 ± 20 g. A máquina foi fechada e submetida a um ciclo de 500 revoluções do tambor, em uma velocidade de 30 r.p.m. a 33 r.p.m.

Transcorrido este tempo, a amostra foi retirada do tambor, separando-a da carga abrasiva e lavando-a na peneira de 1,7 mm de abertura. O material retido foi secado em estufa até constância de massa.

O desgaste por abrasão foi calculado mediante expressão:

$$A_n = \frac{\text{massa total da amostra seca} - \text{massa seca da amostra retida na peneira de 1,7 mm}}{\text{massa total da amostra seca}}$$

Adota-se como “n” a graduação da amostra enquadrada, ou seja, graduação C.

3.3.2.4 ADESIVIDADE DO AGREGADO SINTÉTICO AO LIGANTE BETUMINOSO

A adesividade em misturas asfálticas pode ser considerada como a propriedade que garante a união entre o cimento asfáltico e o agregado, sob a ação do tráfego e da água. A resistência que opõe o ligante a ser afastado do sólido, isto é, do agregado, foi definida por Pinilla (1965) como aderência. Neves Filho *et al.* (2007) consideraram que os problemas concernentes à falha de adesividade estão sempre relacionados à presença e ação da água. Considerando, ainda, que a água é fator preponderante e decisivo a ser considerado quando se avalia o desempenho de um revestimento betuminoso, no que se refere à adesividade.

O cimento asfáltico de petróleo (CAP) é composto por hidrocarbonetos com alguns grupos funcionais polares, nos quais estão presentes heteroátomos. Os agregados, no entanto, possuem uma superfície heterogênea com uma grande variedade de sítios, muitas vezes dotados de carga elétrica, de diferente composição química e nível de atividade. Nos pontos de contato entre os sítios ativos do agregado e o ligante, os grupos polares se ligam à superfície através de forças eletrostáticas, pontes de hidrogênio e forças de *Van der Waals*. (CURTIS *et al.*, 1993). Os sulfóxidos e os ácidos carboxílicos são os grupos funcionais que possuem a maior afinidade pelos

agregados, mas, em contrapartida, são os mais facilmente removidos em presença de água. Os grupos fenóis e as bases nitrogenadas são os mais efetivos em garantir uma boa adesão (LITTLE e JONES, 2003).

A verificação da adesividade do agregado sintético de argila calcinada ao ligante betuminoso foi conseguida utilizando-se do ensaio DNER-ME 078/94. Pesou-se cerca de 500 g de agregado retido na peneira de 12,7 mm. Este material pesado foi coberto por água destilada, durante 1 minuto e levado à estufa, a 100 °C, por 2 horas. Findo este prazo, foi derramado sobre o agregado 17,5 g de CAP 50/70, já previamente aquecido a 120 °C, e misturado até um completo envolvimento do agregado com o ligante. A mistura foi deixada em repouso até que o ligante esfriasse para em seguida, ser colocada na estufa, a 40 °C, recoberta por água destilada, durante 72 horas. A figura 11 apresenta o envolvimento do agregado ao ligante.



Figura 11– Envolvimento dos agregados calcinados ao ligante

3.3.2.5 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AGREGADO SINTÉTICO E MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) configura-se como uma técnica usada em várias áreas do conhecimento, podendo fornecer informações de detalhes, ampliadas em até 300.000 vezes.

Quando uma pequena região da amostra é atingida por um feixe de elétrons, são originados diferentes sinais, como elétrons secundários e elétrons retroespalhados, dentre outros. Essas respostas podem ser detectadas independentemente e depois de transformadas em sinais elétricos, permitem a aquisição de imagens de superfície, composição de fases e análise composicional. Elétrons secundários são partículas de baixa energia resultantes de uma colisão inelástica de elétrons primários do feixe emitido com elétrons da amostra, com identificação do tamanho, forma e textura superficial (SARKAR *et al*, 2001).

Ao MEV pode ser acoplado o sistema de energia dispersiva, por espectrometria de energia dispersiva (EDS), capaz de determinar a composição qualitativa e semi-quantitativa de amostras, a partir da emissão de raios-x característicos.

As micrografias e análises químicas das amostras de agregados sintéticos de argila calcinada nas temperaturas de 780 °C, 850 °C, 950 °C, 1050 °C e 1150 °C foram realizadas no laboratório do Instituto Nokia de Tecnologia. As amostras de agregados calcinados foram fixadas em *suportes* com fita adesiva e recobertas com filme de carbono para submissão ao MEV. A caracterização química foi realizada por espectrometria de energia dispersiva de raios-x, no equipamento *System Six* da *Thermo Electron*, acoplado ao microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM-6460LV, ilustrado na figura 12. As imagens foram feitas com elétrons secundários e a análise química com *Energy Dispersive Spectrometry* (EDS), com quantificação em óxidos.



Figura 12 – Microscópio eletrônico de varredura, JEOL JSM-6460LV

3.3.2.6 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DO AGREGADO SINTÉTICO

A análise mineralógica foi efetuada no laboratório de Difração de Raios-X do Departamento de Geociências do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal do Amazonas.

As amostras de agregados foram trituradas até textura de pó. O método do pó considera que em um material cristalino pulverizado sempre têm alguns cristais com o ângulo de incidência dos raios-x correto para satisfazer a equação de Bragg. Cada plano interno dos cristais com índices de Miller específicos dá origem a um cone de difração com ângulo de leitura variando de 3° a 60°, padrão de análise de laboratório.

As amostras foram analisadas no difratômetro de raios-x da Shimadzu, modelo XRD6000, equipado com tubo Cu, sendo identificadas as fases cristalinas presentes. A interpretação dos difratogramas foi obtida através do software específico *Shimadzu-Powder Diffraction File*, versão 4.1. Através de filtros ou monocromadores, somente uma linha do espectro discreto do tubo de raios-x, a linha K_{α} , foi selecionada. A radiação difratada foi registrada eletronicamente

por detectores. O difratograma foi obtido através de uma varredura do detector sobre o intervalo do ângulo 2θ desejado.

3.3.3 AGREGADO MIÚDO - AREIA

A areia usada neste trabalho de pesquisa provém de jazida, adquirida no comércio de Manaus, caracterizada por meio da composição granulométrica e sua massa específica real, fazendo-se uso das normas DNER-ME 083/98 e DNER-ME 194/98. A especificação de serviço DNIT-ES 031/2006 preconiza que as partículas individuais deste agregado devem ser resistentes, livres de torrões de argila e de substâncias nocivas.

O peneiramento executado foi o manual, pesando-se o material retido em cada peneira, em seguida calculou-se a porcentagem retida em cada peneira em relação à massa total da amostra seca. A massa específica real foi obtida colocando-se cerca de 500 g de material (areia), seco em estufa, no frasco Chapman, já previamente cheio de água até a marca de 200 cm³ e agitando-se o conjunto a fim de eliminar as bolhas de ar. A massa específica do agregado foi calculada pela expressão:

$$\gamma = \frac{500}{L-200}$$

Onde:

γ = massa específica do agregado miúdo, expressa em g/cm³;

L = leitura no frasco Chapman (volume ocupado pelo conjunto água+areia).

3.3.4 AGREGADO GRAÚDO - SEIXO

Como já mencionado anteriormente, o seixo extraído dos rios, ilustrado na figura 13, mais conhecido como seixo rolado, constitui-se como o agregado graúdo mais usado nesta região, em razão da carência de rochas. Sua forma arredondada e textura superficial lisa contribuem para a

redução da área de atrito deste agregado, implicando em diminuição de sua resistência ao cisalhamento. Este material foi caracterizado por meio dos ensaios constantes do quadro 5.



Figura 13 – Seixo de rio

Método de ensaio	Título
DNER-ME 083/98	Análise granulométrica
DNER-ME 195/97	Determinação da absorção e massa específica de ag. graúdo
DNER-ME 035/98	Determinação da abrasão Los Angeles
DNER-ME 078/94	Adesividade a ligante betuminoso

Quadro 5 – Ensaio de caracterização do seixo

3.3.4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO SEIXO

O método de ensaio propõe duas maneiras para o peneiramento, isto é, manual ou mecânico. A granulometria do seixo foi executada pelo processo mecânico, através de um agitador de peneiras. As peneiras foram dispostas umas sobre as outras, com cerca de 5000 g de material e submetida a uma agitação mecânica. O material retido foi pesado e calculada a porcentagem retida em cada peneira em relação à massa total da amostra.

3.3.4.2 ABSORÇÃO E MASSA ESPECÍFICA DO SEIXO

O método de ensaio utilizado foi DNER-ME 195/97, o qual consiste em lavar cerca de 2,0 kg de amostra sobre a peneira n°4, de 4,8 mm de abertura, e em seguida secá-la em estufa até constância de massa, à temperatura de 105 °C a 110 °C. Ao fim deste prazo, o agregado é imerso em água, à temperatura ambiente, por cerca de 24 ± 4 horas. Os demais procedimentos correspondem àqueles descritos no item 3.3.2.2.

3.3.4.3 DESGASTE DO SEIXO POR ABRASÃO

Este método determina o desgaste sofrido pelo agregado, quando colocado na máquina Los Angeles juntamente com uma carga abrasiva, submetido a um determinado número de revoluções desta máquina.

O material foi enquadrado na graduação C, cujos procedimentos do ensaio correspondem àqueles descritos no item 3.3.2.3.

3.3.4.4 ADESIVIDADE DO SEIXO AO LIGANTE BETUMINOSO

A adesividade em misturas asfálticas pode ser considerada como a propriedade que garante a união entre o cimento asfáltico e o agregado, sob a ação do tráfego e da água. A verificação da adesividade do seixo ao ligante betuminoso foi conseguida utilizando-se o ensaio DNER-ME 078/94, cujos procedimentos já foram relatados no item 3.3.2.4

3.3.5 MATERIAL DE ENCHIMENTO (*FILLER*) - CIMENTO

O material de enchimento aqui usado, ou “*filler*”, foi o cimento *Portland*, adquirido no comércio de Manaus, que foi caracterizado segundo os ensaios de granulometria, norma DNER-

EM 367/97 e massa específica real, cuja norma usada foi a DNER-ME 085/94. Como o próprio nome sugere, a função deste material é reduzir os vazios da mistura, formados pelo entrosamento dos agregados graúdos e miúdos.

Segundo a especificação DNER EM 367/97, o material a ser usado como enchimento deve compor a granulometria estabelecida na tabela 5.

Peneira	Abertura (mm)	% em massa passando
40	0,42	100
80	0,18	95 – 100
200	0,074	65 - 100

Tabela 5 - Composição granulométrica do *filler*, segundo DNER- EM 367/97

3.3.6 CIMENTO ASFÁLTICO – CAP 50/70

O cimento asfáltico usado nesta pesquisa foi o CAP-50/70, usualmente comercializado pela Refinaria de Manaus (REMAN), no estado do Amazonas, caracterizado pelos ensaios e especificações abaixo descritos:

3.3.6.1 PENETRAÇÃO

A consistência de um cimento asfáltico no estado semi-sólido ainda é medida pelo ensaio de penetração, que consiste em determinar a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha padronizada penetra verticalmente, durante 5 segundos, em uma amostra de cimento asfáltico, numa temperatura de 25 °C. A massa total atuante na agulha é de 100,0 g. O grau de

dureza do CAP é tanto maior quanto menor for o valor da penetração da agulha na amostra, ou seja, o CAP 30/45 é mais duro que o CAP 85/100.

O método brasileiro MB-107 descreve detalhadamente o procedimento adotado para a determinação da penetração. Este ensaio isoladamente não caracteriza perfeitamente a qualidade de um cimento asfáltico, contudo, dá a indicação do seu grau de dureza, que permite utilizá-lo em algumas especificações com o parâmetro de classificação e, principalmente, para caracterizar o comportamento do material betuminoso recuperado de um revestimento existente. Valores de penetração abaixo de 15 (0,1 mm) estão associados a betumes envelhecidos e quebradiços (PINTO, 2002).

3.3.6.2 ESPUMA-ÁGUA

O CAP não deve conter água, porque a espuma com o aquecimento pode causar explosões. No aquecimento de um CAP com água, há uma resistência natural à evaporação da água, que quando vencida, pode lançar partículas de asfalto a longas distâncias, causando graves acidentes de trabalho. Esta contaminação pode ocorrer por entrada de água no caminhão de transporte ou nos tambores de depósito dos cimentos asfálticos. O ensaio consiste em aquecer a 175° C uma amostra de CAP pesando cerca de 50,0 g, contida em um recipiente metálico e observar a formação ou não de espuma.

3.3.6.3 DENSIDADE RELATIVA

É a relação entre a massa do CAP a 20°C e a massa de igual volume de água a 4°C. Tem por finalidade a transformação de unidades gravimétricas em volumétricas e é utilizada no

cálculo do volume de vazios de misturas betuminosas. A sistemática do ensaio está padronizada pelo método brasileiro MB-387.

3.3.6.4 SOLUBILIDADE – TEOR DE BETUME

Este ensaio, padronizado pelo método brasileiro MB-166, tem por finalidade determinar o grau de pureza do material, ou seja, a quantidade de betume contida no material betuminoso, expressa em percentagem. A porção insolúvel é constituída por impurezas, enquanto a porção solúvel representa os constituintes ativos aglutinantes. O ensaio consiste em tratar uma determinada massa de ligante betuminoso, aproximadamente 2,0 g, com tricloroetileno ou com CCl_4 e deixar em repouso por 15 minutos. Em seguida, é feita a filtração da solução assim obtida em um cadinho de Gooch forrado em seu fundo com amianto calcinado. A diferença de massa entre a amostra inicial e a parte insolúvel – massa da fração solúvel – é expressa em percentagem da massa inicial da amostra.

3.3.6.5 PONTO DE FULGOR

É a menor temperatura na qual os vapores emanados durante o aquecimento do material betuminoso se inflamam quando sobre ele passa uma chama sob determinadas condições. Tem por finalidade evitar acidentes de trabalho e verificar possível contaminação do cimento asfáltico com asfalto diluído. Alguns estudiosos acham que o CAP com elevado ponto de fulgor têm elevada durabilidade, embora não esteja ainda perfeitamente comprovado. Os CAPs têm ponto de fulgor normalmente superior a 230°C. O ensaio é padronizado pelo método MB-50.

3.3.6.6 DUCTILIDADE

É a distância, em centímetros, que uma amostra de material betuminoso, em condições padronizadas, submetida a uma tração, sob condições especificadas, se rompe. A temperatura do ensaio, padronizado pelo método MB-167, é de 25 °C e a velocidade de deformação de 5 cm/min. Esta propriedade caracteriza uma resistência à tração e a flexibilidade do CAP, que ao ser solicitado suporta grandes deformações sem ruptura. Quanto mais dúctil, maior a flexibilidade do material. O ensaio consiste em moldar um corpo de prova e colocá-lo em um aparelho denominado dutilômetro que submete a amostra a um alongamento horizontal até ser atingida a ruptura. A maioria dos CAPs tem ductilidade superior a 60 cm. Uma ductilidade menor que 10 cm está associada a um ligante oxidado por um aquecimento muito elevado.

3.3.6.7 PONTO DE AMOLECIMENTO

Os asfaltos amolecem pouco a pouco quando submetidos ao aquecimento e não possuem ponto de fusão bem definido. Vários métodos foram desenvolvidos para medir a temperatura na qual o asfalto possui uma determinada consistência, contudo o mais conhecido é o Ponto de Amolecimento Anel e Bola, que determina a temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido em condições padronizadas. Assim, o ponto de amolecimento é a mais baixa temperatura na qual uma esfera metálica padronizada, atravessando um anel também padronizado e cheio com o material betuminoso, percorre uma determinada distância, sob condições especificadas. O ensaio é normalizado pelo método brasileiro MB-164.

3.3.6.8 ÍNDICE DE SUSCETIBILIDADE TÉRMICA

Estudos têm demonstrado que à medida que a temperatura aumenta, o asfalto amolece e conseqüentemente a penetração aumenta. O índice de penetração (IP) é um índice de suscetibilidade térmica que pode variar de (- 1,5) a (+ 1); valores maiores que (+1) indicam asfaltos oxidados, ou seja, pouco sensíveis a elevadas temperaturas, e quebradiços, a baixas temperaturas, isto é, menores que (-1,5). Este índice é utilizado para explicar o comportamento reológico do asfalto na tecnologia rodoviária e permite individualizar rapidamente e de forma simples, os materiais betuminosos mais suscetíveis ao amolecimento pela ação de elevadas temperaturas.

Outro índice que também permite caracterizar a suscetibilidade térmica é o chamado Ponto de Ruptura Fraass (*Fraass Breaking Point*), que consiste em curvar repetidamente uma delgada lâmina de aço pintada com asfalto em uma espessura de 0,5 mm. Cada curvatura da lâmina dura cerca de 11 segundos, em um banho onde a temperatura vai diminuindo. A temperatura na qual surgem pequenas fissuras no asfalto é chamada de ponto de ruptura Fraass. Nesta temperatura a penetração do CAP é próxima de 1,25 e as especificações européias condicionam uma ruptura Fraass menor que (-10 °C), para que o CAP possa ser usado em regiões muito frias.

3.3.6.9 EFEITO DO CALOR E DO AR – PERDA POR AQUECIMENTO

É a variação de massa que o material betuminoso sofre quando submetido ao aquecimento, sob condições padronizadas. Este ensaio dá uma idéia do envelhecimento (endurecimento) do cimento asfáltico por perda de constituintes voláteis durante a estocagem e o transporte. O ensaio consiste em colocar em um recipiente cilíndrico 50 ml de CAP, de modo que

a espessura da película seja de 2 cm, e determinar a perda de massa, em percentagem, após a amostra ser submetida a um aquecimento de 163 °C, durante 5 horas. Este ensaio é conhecido pela denominação *Thin Film Oven Test* – TFOT. Recentemente, tem-se utilizado o ensaio de película delgada rolada, denominado pelo AASHTO (T-240) de *Rolling Thin Film Oven Test* – RTFOT, onde uma amostra de asfalto fica em movimento sobre as paredes de um frasco de vidro que rola em uma estufa por 75 minutos a 163 °C, com ventilação.

3.3.6.10 VISCOSIDADE SAYBOLT FUROL

Corresponde ao tempo, em segundos, que uma determinada quantidade de material betuminoso leva para fluir através de um orifício de dimensões padronizadas, a uma determinada temperatura. O ensaio se destina a medir a consistência dos materiais betuminosos em estado líquido. São utilizadas temperaturas no intervalo de 25 °C a 170 °C, definindo relações entre a viscosidade e a temperatura, com a finalidade de quantificar as temperaturas de trabalho no laboratório e no campo, ou seja, definir consistências apropriadas para as operações de mistura, espalhamento e compactação de massas betuminosas. Quando a temperatura do CBUQ está acima da temperatura ótima, ou seja, temperatura de projeto, ocorre o fenômeno denominado de exsudação (fluimento do asfalto). Ao contrário, quando a temperatura do concreto asfáltico encontra-se abaixo da temperatura ótima, ocorre o envelhecimento prematuro, isto é, fragilidade da mistura. O ensaio é padronizado pelo método MB-517.

3.4 MÉTODO DE DOSAGEM DAS MISTURAS

Após caracterização de todos os componentes do concreto asfáltico e com vistas a atender o contido na especificação de serviço do DNIT-ES 031/2006, os materiais foram enquadrados na

faixa C do DNIT, seguindo o método de dosagem Marshall. A tabela 8, já demonstrada no item 2.4, apresenta as faixas granulométricas de enquadramento dos agregados, com as respectivas tolerâncias.

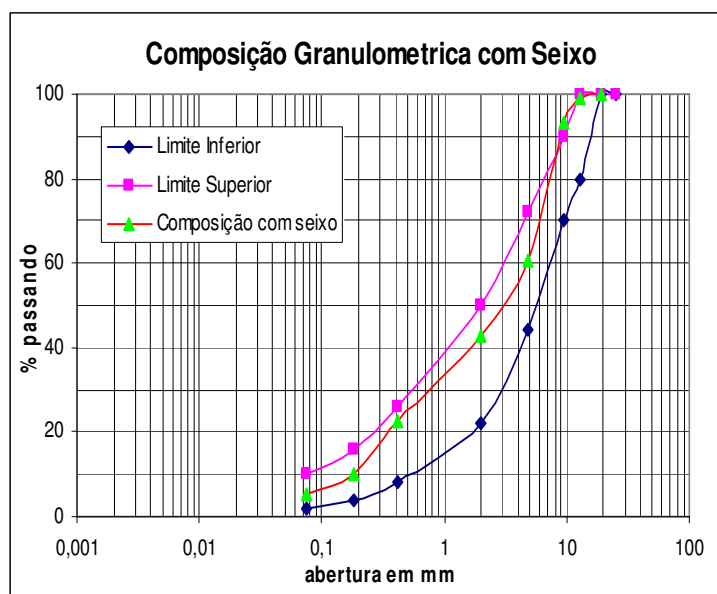
Utilizando-se do método Marshall, pode-se estabelecer uma composição granulométrica de agregados que se enquadre numa faixa especificada. Em seguida, determina-se uma quantidade de cimento asfáltico que, misturado aos agregados, proporcione uma boa mistura, isto é, que satisfaça aos requisitos da especificação adotada. No caso específico desta pesquisa, a norma de referência adotada foi a especificação do serviço CBUQ, traduzida no procedimento do DNIT, intitulada ES 031/2006.

Existe um grande número de métodos para calcular as porcentagens de agregados que devem ser misturados, de maneira a se obter uma mistura que se enquadre nas especificações. Esses métodos, em síntese, permitem obter uma curva granulométrica resultante dentro da faixa especificada. As percentagens de diversos agregados, adequadas para a mistura, representam os primeiros dados a serem levados em conta na calibração das usinas de asfalto. Neste projeto de pesquisa, adotou-se o método das tentativas, abaixo descrito:

- a) traçou-se o gráfico de distribuição granulométrica das duas curvas limites da faixa C do DNIT;
- b) adotou-se, preliminarmente, duas misturas com agregado calcinado, em razão de experiências divulgadas. As percentagens de cada componente das misturas foram, mistura 1: agregado calcinado (60 %), areia (35 %) e cimento (5 %); mistura 2: agregado calcinado (55 %), areia (40 %) e cimento (5 %). Para o caso do CBUQ convencional, ou seja, com seixo, adotou-se 67 % de seixo, 28 % de areia e 5 % de cimento;

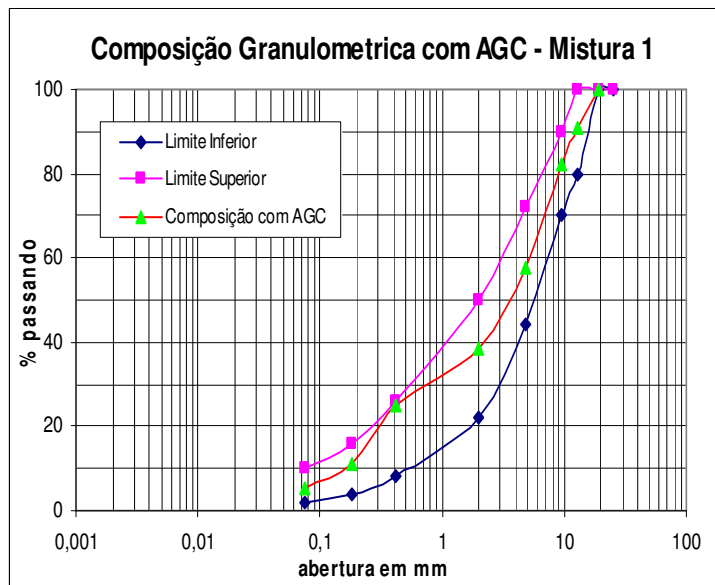
- c) distribuiu-se as percentagens acima adotadas sobre as percentagens que passaram em cada peneira, de cada agregado;
- d) calculou-se, para cada peneira, as percentagens que passaram, a partir dos valores acima adotados, de todos os materiais da mistura;
- e) traçou-se, no gráfico de distribuição granulométrica, as curvas representativas das misturas calculadas.

As curvas obtidas encontravam-se na zona definida pelas duas curvas limites da faixa C do DNIT, logo foram adotadas como curva de projeto da mistura convencional e curvas de projeto das misturas com agregados sintéticos de argila calcinada, ilustradas na figura 14.

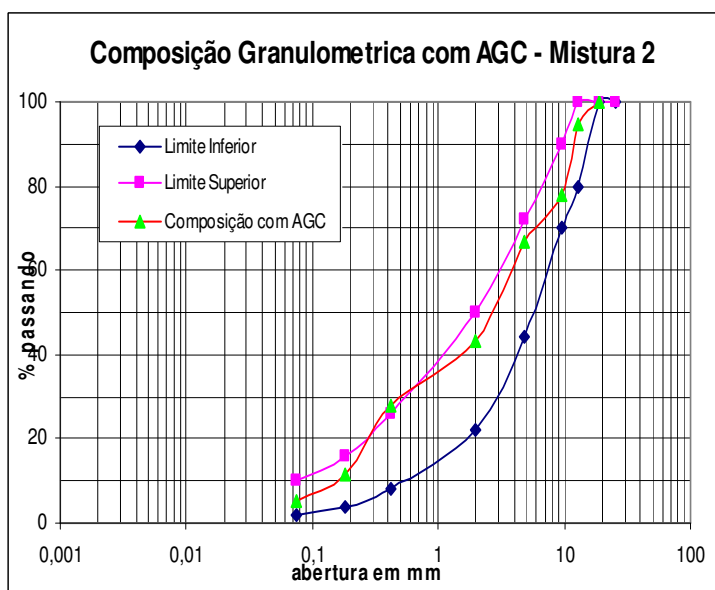


(a)

Figura 14—Curvas de projeto das misturas: a) mistura com seixo



(b)



(c)

Figura 14 – Curvas de projeto das misturas: b) mistura 1, com AGC; c) mistura 2, com AGC

Na sequência, acrescentou-se o CAP nas misturas, adotando-se os teores de 4,5 %, 5 %, e 5,5 % para o concreto asfáltico convencional, com seixo, e os teores de 6 %, 7 %, 8 % e 9 % para o concreto asfáltico confeccionado com agregado sintético de argila calcinada (AGC). Ressalta-

se que, para cada teor de CAP, foram moldados dois corpos de prova, com vistas a se encontrar o teor ótimo, ou teor de ligante do projeto das misturas. Fazendo-se uso do método Marshall, o qual será descrito detalhadamente no item 3.5, determinou-se os parâmetros físicos e mecânicos das misturas, isto é, densidade, volume de vazios, vazios do agregado mineral, vazios cheios de betume, relação betume-vazios, estabilidade Marshall e fluência. Os resultados dos ensaios foram anotados para elaboração dos gráficos das variações das grandezas, em função da variação dos teores de CAP.

Foram traçados os gráficos estabilidade x teor de CAP, densidade aparente x teor de CAP, volume de vazios x teor de CAP, relação betume-vazios x teor de CAP e fluência x teor de CAP, gráficos estes conhecidos como curvas características do ensaio Marshall. Os teores ótimos de betume adotados foram aqueles que apresentaram um volume de vazios entre 3 % e 5 % e a relação betume-vazios de 75 % a 82 %. Procedeu-se uma comparação de desempenho entre as duas misturas estudadas, confeccionadas com agregados de argila calcinada. A mistura escolhida para prosseguimento dos ensaios mecânicos foi aquela que se mostrou mais densa para um determinado teor de CAP. Por este critério, adotou-se a mistura 2 como definitiva, para conclusão das análises físicas e mecânicas.

3.5 CONFEÇÃO DO CONCRETO ASFÁLTICO

Foram moldados cinco corpos-de-prova no teor ótimo de betume encontrado para cada mistura produzida, convencional e com agregados calcinados nas temperaturas de 850 °C, 950 °C, 1050 °C e 1150 °C, para determinação da estabilidade, fluência, resistência à tração por compressão diametral e módulo resiliente. Foi encontrado um teor ótimo de betume para cada mistura com agregado calcinado nas temperaturas supracitadas, além da mistura convencional.

Contudo, o CBUQ produzido com o agregado calcinado a 780 °C exigiu muito ligante, tornando sua aplicação antieconômica, razão pela qual abandonou-se sua confecção.

Com base no ensaio viscosidade Saybolt-Furol, já explicado anteriormente, encontrou-se as temperaturas de trabalho do CAP, dos agregados e da mistura CAP + agregados, tomando-se o cuidado de se observar os limites estabelecidos na especificação, a qual admite como temperatura de aquecimento do ligante aquela correspondente a uma viscosidade Saybolt-Furol de 85 ± 10 segundos e como temperatura de compactação da mistura, aquela na qual o ligante apresenta uma viscosidade Saybolt-Furol de 140 ± 15 segundos.

Os agregados foram pesados individualmente para cada corpo-de-prova, misturados e aquecidos em um tacho à temperatura de 170 °C. Na seqüência, adicionou-se o ligante (CAP 50/70), também pesado de acordo com a quantidade de projeto encontrada, na temperatura de 157 °C. Procedeu-se à mistura dos componentes, agregados + CAP, aquecidos à temperatura de 146 °C, por cerca de 2 minutos, até completa cobertura dos agregados pelo ligante. Esta mistura foi então disposta no molde de compactação e compactada mecanicamente com 75 golpes em cada face do corpo-de-prova. A seguir, os corpos-de-prova foram deixados em repouso, em uma superfície plana e lisa, por 24 horas à temperatura ambiente. As etapas do processo de execução do CBUQ estão ilustradas na figura 15.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 15 - Etapas do ensaio Marshall: a) aquecimento dos agregados; b) agregados + ligante; c) aquecimento dos agregados + ligante; d) controle da temperatura; e) compactação Marshall; f) desmoldagem dos corpos-de-prova.



(g)



(h)



(i)



(j)

Figura 15 - Etapas do ensaio Marshall: g) corpos-de-prova de CBUQ; h) massa imersa do corpo-de-prova; i) e j) prensa Marshall.

3.6 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DO CBUQ

3.6.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS MISTURAS

3.6.1.1 DENSIDADES DAS MISTURAS

O procedimento para obtenção da densidade de misturas asfálticas merece cuidados especiais, uma vez que exerce influência direta nos parâmetros volumétricos da mistura, em especial no volume de vazios. Sua determinação, em geral, é realizada mediante ponderação das densidades reais dos componentes da mistura, chamada densidade máxima teórica (DMT).

Segundo *Leahy e McGennis* (1999), o primeiro manual de dosagem do Instituto de Asfalto, dá ao projetista a liberdade de escolher qual densidade usar no cálculo da DMT, ou seja,

densidade aparente (D_a), real (D_r) ou efetiva (D_e). Contudo, experiências mostraram que o uso da densidade aparente conduz a valores de vazios inferiores ao real, uma vez não ser considerada a absorção de asfalto pelos agregados. Por outro lado, o uso das densidades reais leva a valores de vazios superiores ao real, pois considera que a absorção de asfalto é igual à absorção de água. Daí surgiu a densidade efetiva de agregados, defendida por *Leod* (1957) *apud Leahy e McGennis* (1999), que definia volume de vazios como volume total das pequenas bolsas de ar entre os agregados cobertos com ligante.

A fim de considerar a interpenetração entre agregados e ligantes, Pinto (1996) sugeriu substituir, no cálculo da DMT, o valor da densidade real dos agregados por densidade efetiva, calculada como a média aritmética entre os valores da densidade real e da densidade aparente. No procedimento de dosagem de misturas asfálticas SUPERPAVE, o programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*) propõe adotar como densidade efetiva a expressão $D_e = D_a + 0,8 (D_r - D_a)$, pois considera uma absorção de ligante menor que a defendida por Pinto, indicada para agregados poucos absorptivos (MOTTA *et al*, 1996).

Neste trabalho, adotou-se o procedimento proposto por Pinto (1996), aplicando-se a seguinte expressão:

$$DMT = \frac{100}{\frac{X}{D_{ef}} + \frac{Y}{D_r} + \frac{Z}{D_r} + \frac{L}{D_b}}$$

Onde:

X = % do agregado graúdo na mistura;

Y = % do agregado miúdo na mistura;

Z = % de *filler* na mistura;

L = % de CAP na mistura;

Def = densidade efetiva do agregado graúdo;

Dr = densidade real do agregado miúdo e do *filler*;

Db = densidade do CAP.

3.6.1.2 PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS DAS MISTURAS

As propriedades volumétricas das misturas como volume de vazios, relação betume-vazios, vazios cheios de betume e vazios do agregado mineral são conhecidas a partir da desmoldagem dos corpos-de-prova compactados, segundo o método Marshall.

Para determinação destes índices, foram moldados cinco corpos-de-prova para cada mistura ensaiada, adotando-se como valor resultante aquele obtido a partir da média aritmética dos cinco valores parciais. Cada corpo-de-prova foi pesado ao ar e imerso em água, além de efetuadas quatro medições de altura, em posições diametralmente opostas. Na sequência, foram determinadas as densidades aparentes das misturas, aplicando-se a expressão:

$$d = \frac{M_{ar}}{M_{ar} - M_i}$$

onde:

d = densidade aparente da mistura;

M_{ar} = massa da mistura, ao ar;

M_i = massa da mistura, submersa.

De posse da DMT (densidade máxima teórica), já descrita no item 3.6.1.1, e da densidade aparente das misturas, determinou-se seus volumes de vazios, através da expressão:

$$V_v = \frac{DMT - d}{DMT} \times 100 \%$$

Onde:

V_v = volume de vazios da mistura;

DMT = densidade máxima teórica da mistura;

d = densidade aparente da mistura.

Conhecidas as porcentagens de CAP de cada mistura, determinaram-se os vazios cheios de betume (VCB), a partir da expressão:

$$VCB = \frac{d \times \%L}{D_b}$$

onde:

VCB = vazios cheios de betume;

d = densidade aparente da mistura;

L = percentagem de CAP na mistura;

D_b = densidade do CAP.

Os vazios do agregado mineral (VAM) resultaram da soma do volume de vazios com os vazios cheios de betume, ou seja:

$$VAM = V_v + VCB$$

Por fim, determinou-se a relação betume-vazios (RBV) de cada mistura ensaiada, através da expressão:

$$RBV = \frac{VCB}{VAM}$$

3.6.2 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DAS MISTURAS

3.6.2.1 ESTABILIDADE E FLUÊNCIA MARSHALL

A estabilidade corresponde à resistência máxima à compressão radial, apresentada pelo corpo-de-prova ensaiado segundo o método Marshall. Enquanto que a fluência corresponde à deformação total apresentada pelo corpo-de-prova, quando da aplicação da carga.

Os corpos-de-prova após confeccionados, como descrito no item 3.5, foram imersos em banho-maria, a 60 °C, por duas horas. Em seguida, foram colocados no molde de compressão e posicionados na prensa, segundo a geratriz. A prensa foi ligada e permaneceu assim até o rompimento do corpo-de-prova. Foi anotada a leitura de ruptura, indicada pelo anel dinamométrico, assim como a deformação medida pelo medidor de fluência, como ilustrado na figura 16. A leitura de ruptura, multiplicada pela constante do anel e corrigida segundo a altura do corpo-de-prova, corresponde à estabilidade da mistura.



Figura 16 – Ensaio de Estabilidade e Fluência do CBUQ

3.6.2.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Este ensaio foi desenvolvido pelo professor Fernando Luiz Lobo B. Carneiro e é conhecido mundialmente como “ensaio brasileiro”, cujo objetivo inicial foi determinar a

resistência à tração de corpos-de-prova de concreto de cimento *Portland*, com carregamento estático. Atualmente, tem sido utilizado para determinação tanto da resistência à tração como para o módulo de resiliência de misturas asfálticas, aplicando-se carregamento dinâmico.

Para a realização deste ensaio, utiliza-se corpo-de-prova cilíndrico posicionado diametralmente numa prensa, em relação à direção do esforço de compressão, resultando numa tração que age perpendicularmente ao longo do plano diametral, provocando a ruptura da amostra nesta direção.

Foram moldados e ensaiados cinco corpos-de-prova cilíndricos para cada tipo de mistura, isto é, CBUQ confeccionado com seixo, CBUQ confeccionado com agregado calcinado a 850 °C, CBUQ confeccionado com agregado calcinado a 950 °C e CBUQ confeccionado com agregado calcinado a 1050 °C. Os corpos-de-prova ensaiados foram colocados em estufa a 25 °C e seguiram os procedimentos constantes da norma DNER-ME 138/94, abaixo transcrita:

- foram realizadas quatro medidas de altura, com auxílio de um paquímetro, em quatro posições diametralmente opostas, adotando-se como altura resultante o valor da média aritmética das quatro leituras;
- procedimento análogo foi feito com o diâmetro, em três posições diametralmente opostas;
- na seqüência, os corpos-de-prova foram colocados na estufa, por duas horas, a 25 °C;
- após, foram dispostos na prensa mecânica, em posição horizontal, ajustando-se os pratos da prensa até observada uma leve compressão;
- aplicou-se a carga progressivamente, até a ruptura completa do corpo-de-prova, por separação das duas metades, segundo o plano diametral vertical e anotou-se a carga de ruptura, como ilustrado na figura 17.

O valor da resistência à tração por compressão diametral foi obtido através da expressão:

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH}$$

onde:

σ_R = resistência à tração, em kgf/cm²;

F = carga de ruptura, em kgf;

D = diâmetro do corpo-de-prova, em cm;

H = altura do corpo-de-prova, em cm.



Figura 17 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

3.6.2.3 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Os ensaios de carga repetida em que a força aplicada atua sempre no mesmo sentido de compressão, de zero a um máximo e depois diminui até anular-se, ou atingir um patamar inferior, para atuar novamente após pequeno intervalo de repouso (fração de segundo), procura reproduzir as condições de campo. A amplitude e o tempo de pulso dependem da velocidade do veículo e da profundidade em que se calculam as tensões de deformação produzidas. A frequência espelha o fluxo de veículos (MEDINA, 1997).

Ainda segundo aquele autor, o primeiro estudo sistemático da deformabilidade dos pavimentos deve-se a *Hveem*, em 1950, que entendia que o trincamento progressivo dos revestimentos asfálticos era proveniente da deformação resiliente (elástica) das camadas subjacentes, em especial a do subleito. *Hveem* preferiu usar o termo resiliente ao invés de deformação elástica, sob argumento de que as deformações no pavimento são muito maiores que nos sólidos elásticos, como concreto e aço, por exemplo. Do inglês, o termo *resilience* significa energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações.

A aplicação da teoria da elasticidade às misturas asfálticas só é admissível em nível de tensões de tração baixas, ou seja, menor ou igual a 50% da tensão de ruptura, sob temperaturas inferiores a 40 °C.

O ensaio para determinação do módulo de resiliência, ensaio de tração indireta com carregamento repetido, simula o comportamento mecânico da mistura asfáltica na zona onde ocorrem as deformações específicas de tração, responsáveis pela fadiga da camada.

Pinto e Preussler (1980) relataram que os materiais que constituem a estrutura de um pavimento, quando submetidos a carregamentos dinâmicos de curta duração, sob tensões abaixo de sua plastificação, apresentam comportamento quase elástico, não necessariamente linear. O tráfego condiciona o conjunto pavimento-fundação de modo semelhante. O módulo de elasticidade determinado através de ensaios laboratoriais, com equipamentos que simulem as condições de campo, denomina-se módulo de resiliência.

Em geral, pode-se dizer que o módulo de resiliência varia com a granulometria da mistura, sendo maior quanto mais grossa for a faixa adotada; varia com o ligante betuminoso, sendo maior quanto menor a penetração do asfalto ou maior a sua viscosidade, não sendo muito

sensível ao teor de asfalto, desde que dentro da faixa normal de dosagem. Outros fatores influem também, como a relação ligante-*filler* e a própria natureza do *filler* (MOTTA *et al.*, 2002).

Através do ensaio de compressão diametral é possível obter o módulo de resiliência de misturas asfálticas. Este ensaio foi desenvolvido pelo professor Fernando Luiz Lobo B. Carneiro da COPPE/UFRJ, com o propósito inicial de determinar a resistência à tração de corpos-de-prova cilíndricos de concreto de cimento *Portland*, conhecido no exterior como “ensaio brasileiro”.

O procedimento do ensaio, padronizado no método da AASHTO, usado neste trabalho de pesquisa e ilustrado na figura 18, foi realizado na COPPE/UFRJ. Foram moldados três corpos-de-prova para cada mistura estudada, ou seja, CBUQ confeccionado com agregado calcinado a 850 °C, 950 °C, 1050 °C e CBUQ confeccionado com seixo.

A compactação dos corpos-de-prova foi realizada com compactador mecânico tipo Marshall, com 75 golpes por face. O equipamento para execução do ensaio é composto de prensa, sistema pneumático de carregamento, com controle de tempo e frequência para aplicação da carga, sistema de medição de deformação diametral horizontal e estrutura de suporte com acessórios.

Cada corpo-de-prova foi posicionado no interior do suporte para fixação dos transdutores, na base da estrutura de suporte, entre dois cabeçotes curvos. Ajustaram-se os transdutores de modo a se obter registro no oscilógrafo, assentando o pistão de carga com o friso superior em contato com o corpo-de-prova diametralmente oposto ao friso inferior.

Aplicou-se uma carga vertical F , repetidamente, até que se obtivesse uma tensão menor ou igual a 20% da tensão de tração por compressão diametral, com frequência de 60 ciclos por minuto e duração de 0,10 segundos, com 0,9 segundos de repouso. Registraram-se os

deslocamentos horizontais durante a aplicação da carga F. Determinou-se o valor do módulo de resiliência através da expressão:

$$MR = \frac{F}{\Delta H} \times (0,9976\mu + 0,2692)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, em MPa;

F = carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo-de-prova, em N;

Δ = deformação elástica ou resiliente, em cm;

H = altura do corpo-de-prova, em cm;

μ = coeficiente de Poisson.



Figura 18 – Ensaio módulo de resiliência do CBUQ

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ARGILA

A matéria-prima de matriz argilosa objeto deste estudo, provém de área de várzea que permanece inundada durante seis meses do ano, extraída a 1 m de profundidade do nível do terreno. Suas características foram conhecidas por meio de ensaios laboratoriais como granulometria, limites de consistência, densidade real, composição química e mineralógica.

Sua análise granulométrica foi realizada segundo o método de ensaio do DNER-ME 080/94 e DNER-ME 051/94, pelos processos de peneiramento e sedimentação. A distribuição granulométrica está ilustrada na figura 19, que demonstra um solo com caráter essencialmente argiloso, com considerável quantidade de finos, com granulometria densa que pode favorecer na densidade do agregado produzido.

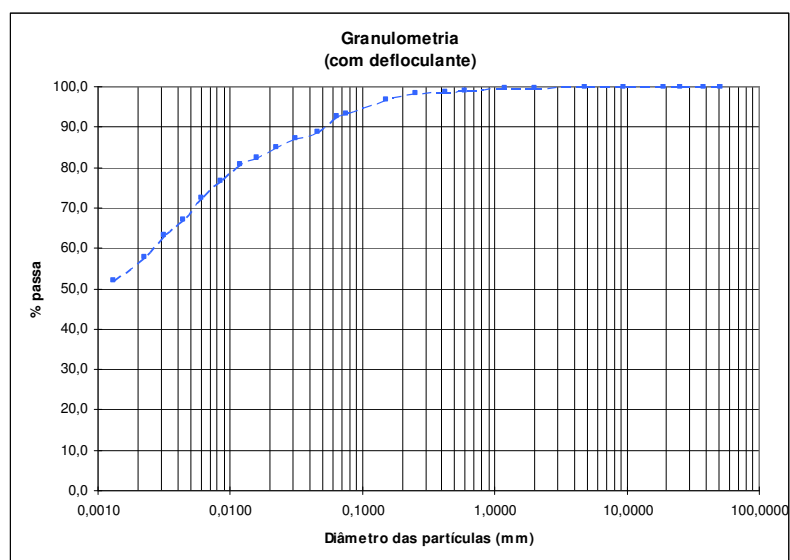


Figura 19 – Curva de distribuição granulométrica do solo

Observa-se, pela tabela 6, que segundo a norma brasileira da ABNT, a matéria-prima usada neste estudo para a produção de agregado sintético, possui mais de 90 % de sua fração constituinte composta de materiais finos (silte + argila), característica típica de solo amazônico.

d (mm)	% mat. passa	% mat.ret.	MATERIAL *	% do material
50,80	100,0	0,0	20< Pedregulho grosso <60	0,0
38,10	100,0	0,0		
25,40	100,0	0,0		
19,10	100,0	0,0	6,0< Pedregulho médio <20,0	0,0
9,52	100,0	0,0		
4,76	99,9	0,1	2,0< Pedregulho fino <6,0	0,2
2,00	99,7	0,3		
1,190	99,6	0,4	0,60< Areia grossa <2,0	0,60
0,590	99,1	0,9	0,20< Areia média <0,6	1,52
0,420	98,6	1,4		
0,250	98,3	1,7		
0,149	96,9	3,1	0,06< Areia fina <0,20	6,55
0,075	93,3	6,7		
0,0645	92,7	7,3	0,002 < Silte < 0,06	34,75
0,0462	89,0	11,0		
0,0313	87,1	12,9		
0,0224	84,9	15,1		
0,0160	82,5	17,5		
0,0118	80,8	19,2		
0,0084	76,6	23,4		
0,0061	72,5	27,5		
0,0044	67,2	32,8		
0,0031	63,2	36,8		
0,0023	57,9	42,1		
0,0013	52,1	47,9	Argila < 0,002	56,31

* ABNT - NBR 6502, Rochas e Solos - setembro 1995 (unidade em mm)

Tabela 6 – Características granulométricas do solo

Os limites de consistência, demonstrados na tabela 7, apontam 76 % de umidade correspondente ao limite de liquidez, 32 % de umidade correspondente ao limite de plasticidade e 44 % de índice de plasticidade, além de 2,40 de densidade real deste solo. Pode-se dizer, segundo a classificação Jenkis, que esta argila é considerada altamente plástica, o que contribui para a produção do agregado sintético calcinado.

Ensaio característicos	Método de ensaio	Resultados
LL	DNER – ME 122/94	76 %
LP	DNER – ME 082/94	32 %
IP	IP = LL - LP	44 %
Densidade real	DNER – ME 093/94	2,40

Tabela 7 – Resultados da caracterização da argila

Uma microanálise deste solo foi possível por meio dos ensaios de espectrometria de energia dispersiva de raios-x (EDS) e difração de raios-x. Na tabela 8 estão representados os principais elementos encontrados na amostra de argila. A determinação desses elementos permitiu avaliar a potencialidade ou não de propriedades piroexpansivas da matéria-prima. Observa-se uma grande concentração de sílica (SiO_2) e uma apreciável quantidade de MgO , que sugere a presença do argilomineral montmorilonita, confirmada na difração de raios-x. A sílica também é responsável pela propriedade de contração durante a secagem das peças cerâmicas e formadora de fase vítrea. O alto teor de Al_2O_3 está associado principalmente à caulinita. Os três elementos de maior concentração na amostra analisada foram SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , elementos estes característicos das massas para produção da cerâmica vermelha.

Óxidos	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	MgO	TiO_2
Quantidade (%)	59,94	25,61	9,07	2,37	1,59	1,42

Tabela 8 – Principais elementos encontrados na amostra de argila

A figura 20 apresenta o difratograma da amostra de argila, a partir do método de difração de raios-x. Nota-se que as fases cristalinas presentes são quartzo, caulinita, ilita e montmorilonita. O quartzo e a caulinita são minerais abundantes nesta região, enquanto os argilominerais ilita e montmorilonita são característicos das argilas aluvionares com propriedades expansivas. Estudos do Serviço Geológico do Brasil (2006) revelam que as argilas aluvionares localizadas na região objeto deste estudo de pesquisa são constituídas por quartzo, caulinita, ilita/muscovita, esmectita, rutilo/anatásio, feldspato e hematita. A difração está de acordo com os dados de composição química analisados.

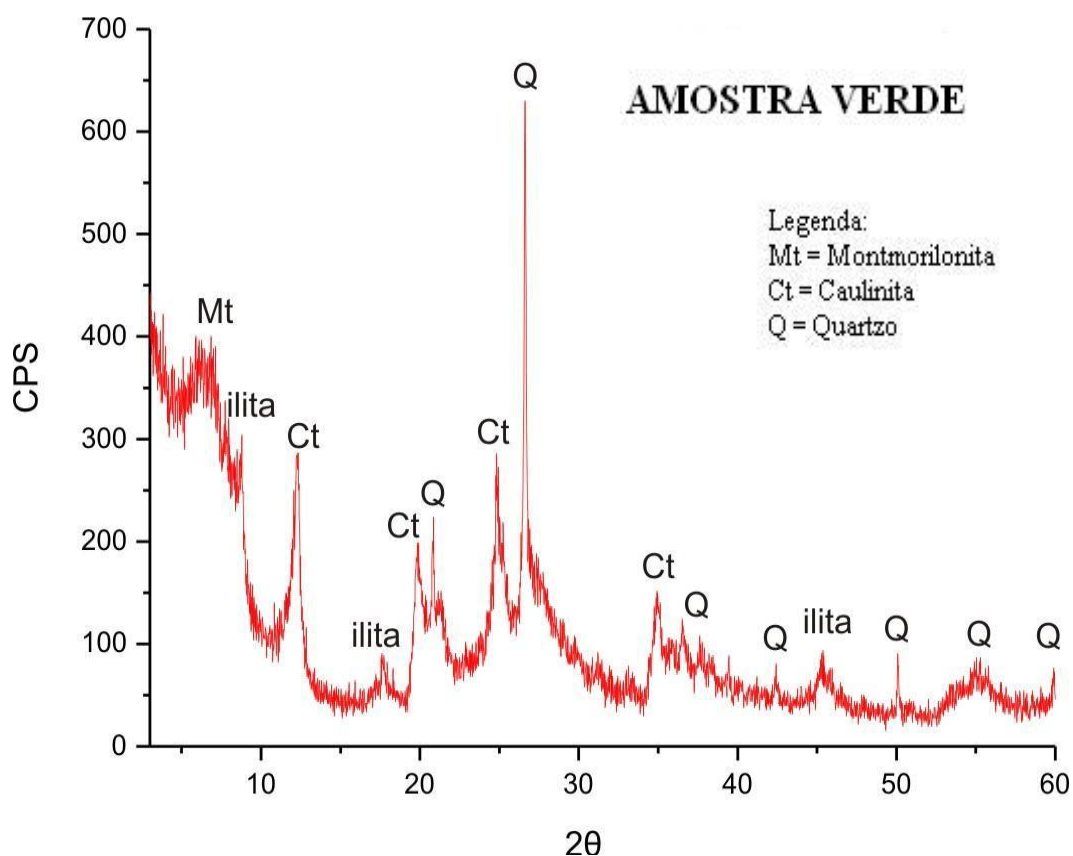


Figura 20 – Difratograma da amostra de argila

4.2 RESULTADOS DA AREIA

A areia usada neste estudo foi adquirida no comércio local. Suas características resultam de análise granulométrica e massa específica real. Os resultados obtidos estão demonstrados na tabela 9 e figura 21. Sua análise granulométrica foi realizada segundo a norma DNER-ME 083/98. Pode-se observar que há uma concentração granulométrica maior na faixa compreendida entre as peneiras de aberturas de 0,42 mm e 0,18 mm. Consoante escala granulométrica da norma americana AASTHO, conclui-se que 42 % da fração desse material é considerada areia grossa e 56 % como areia fina, constituindo-se material de granulometria contínua.

Ensaio	Método	Resultado	
Massa específica real	DNER – ME 194/98	2,63 g/cm ³	
Granulometria	DNER – ME 083/98		
Peneira	Abertura (mm)	% retida, em massa	% passando, em massa
4	4,8	0,82	99,18
10	2,0	3,29	95,89
40	0,42	38,39	57,50
80	0,18	40,56	16,94
200	0,074	15,64	1,28

Tabela 9 – Resultados da caracterização da areia

A figura 21 ilustra a curva de distribuição granulométrica da areia utilizada nesta pesquisa.

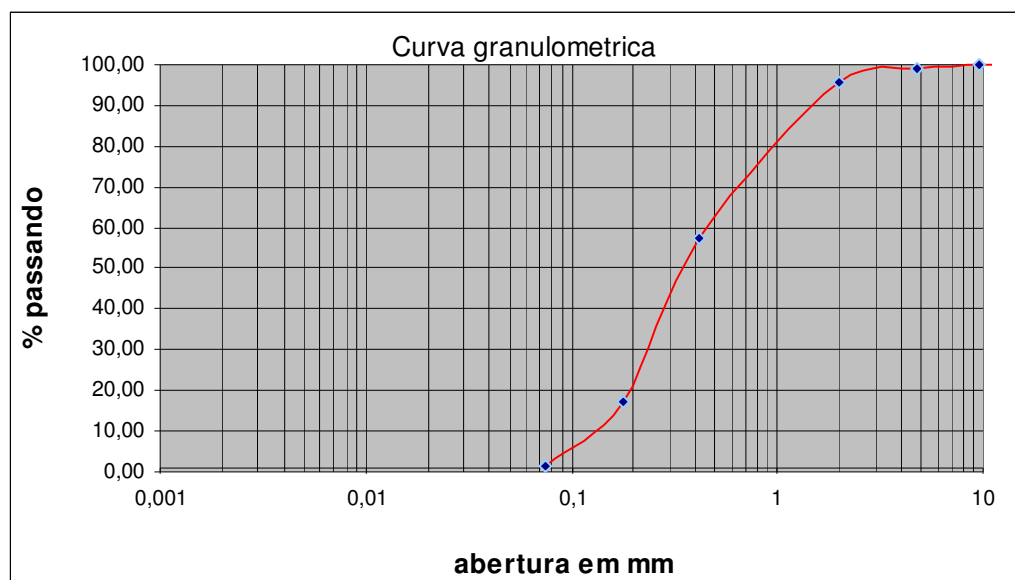


Figura 21 – Curva de distribuição granulométrica da areia

4.3 RESULTADOS DO SEIXO

As características do seixo foram obtidas por meio de ensaios laboratoriais como granulometria, absorção e massa específica, desgaste por abrasão Los Angeles e adesividade a ligante betuminoso.

Os resultados encontrados estão ilustrados na tabela 10 e figura 22. Observa-se, na figura 22, que esse agregado possui granulometria contínua, com 59 % de sua fração constituída de material grosso e 41 % de material fino. Sua superfície lisa favorece a baixa absorção de água, demonstrada na tabela 10, correspondente a 1,32 %, sem comprometer seu poder de aderência ao ligante betuminoso, cujo resultado foi considerado satisfatório. Pode-se observar também, que esse agregado apresentou 20 % de desgaste por abrasão, o que é perfeitamente aceitável, considerando que a norma DNIT-ES 031/2006, admite até 50 % de desgaste para o agregado graúdo aplicado em CBUQ.

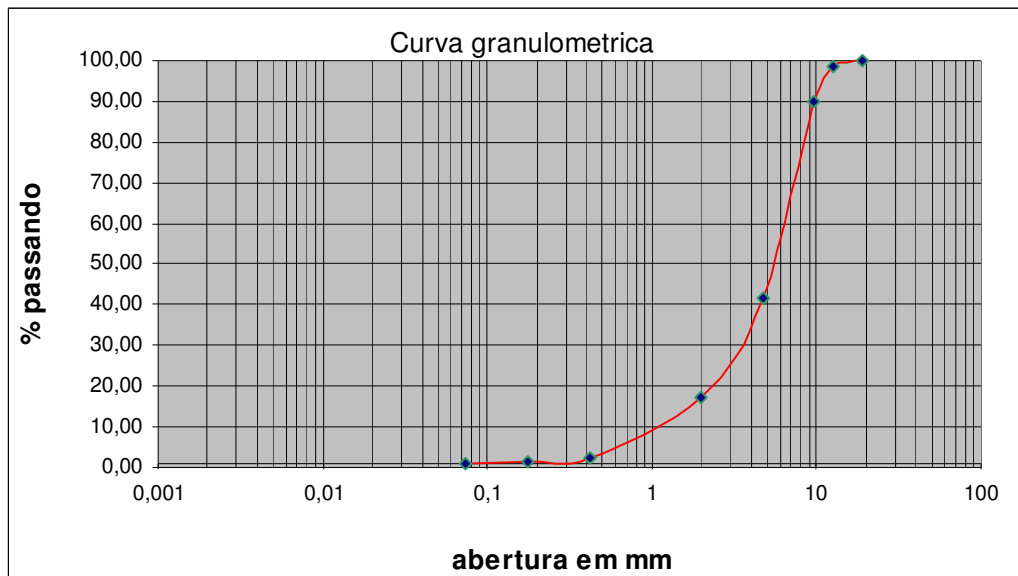


Figura 22 – Curva de distribuição granulométrica do seixo

Ensaio	Método		Resultado
Absorção	DNER – ME 195/97		1,32 %
Desgaste por abrasão Los Angeles	DNER – ME 035/98		20,0 %
Adesividade a ligante betuminoso	DNER – ME 078/94		Satisfatório
Massa específica aparente	DNER – ME 195/97		2,63 g/cm ³
Massa específica real	DNER – ME 195/97		2,73 g/cm ³
Granulometria	DNER – ME 083/98		
Peneira	Abertura (mm)	% em massa	
		retida	passando
3/4"	19,1	0,0	100
1/2"	12,7	1,7	98,3
3/8"	9,5	8,2	90,1
4	4,8	48,8	41,3
10	2,0	24,7	16,6
40	0,42	14,7	1,9
80	0,18	1,2	0,7
200	0,074	0,5	0,2

Tabela 10 – Resultados da caracterização do seixo

4.4 RESULTADOS DO *FILLER* (cimento)

Foi usado o cimento Portland como material de enchimento. Encontram-se na tabela 11 os resultados obtidos quanto à granulometria e densidade. Trata-se de um material muito usado, com características bem conhecidas, cuja função é preencher os vazios formados pelo esqueleto da mistura. Os resultados foram satisfatórios e enquadraram-se na norma DNER-EM 367/97.

Ensaio	Método	Resultado	
Massa específica real	DNER – ME 085/94	3,109 g/cm ³	
Granulometria	DNER – EM 367/97		
Peneira	Abertura (mm)	% retida, em massa	% passando, em massa
40	0,42	0,0	100,0
80	0,18	1,5	98,5
200	0,074	6,4	92,1

Tabela 11 – Resultados da caracterização do *filler*

4.5 RESULTADOS DO CAP 50/70

Os resultados dos ensaios do ligante asfáltico CAP 50/70, comumente utilizado na região Amazônica, classificado segundo sua penetração, encontram-se na tabela 12. Nota-se que todos os valores encontrados atenderam à norma DNIT-EM 095/2006.

Características	Método	Especificação EM 095/2006	Resultado	Unidade
Penetração	D 5	50 - 70	55	0,1 mm
Viscosidade Saybolt Furol a 135° C	E 102	≥ 141	498	s
Viscosidade Saybolt Furol a 150° C	E 102	≥ 50	80,152	s
Viscosidade Saybolt Furol a 177° C	E 102	30 – 150	30,057	s
Penetração retida	D 5	≥ 55	71	%
Aumento do ponto de amolecimento	D 36	≤ 8	7,9	° C
RTFOT-Ductilidade a 25° C	D 113	≥ 20	54	cm
Variação em massa	D 2872	$\leq 0,5$	0,076	%
Ductilidade a 25° C	D 113	≥ 60	>100	cm
Solubilidade no tricloroetileno	D 2042	$\geq 99,5$	99,9	% massa
Ponto de fulgor	D 92	$\geq 235^{\circ} \text{C}$	329	° C
Índice de suscetibilidade térmica	X 018	- 1,5 a 0,7	- 1,2	-
Densidade relativa	D 70	-	0,998	-

Tabela 12 – Resultados da caracterização do CAP 50/70

4.6 RESULTADOS DO AGREGADO SINTÉTICO DE ARGILA CALCINADA

Os agregados sintéticos foram produzidos e calcinados a 780 °C, 850 °C, 950 °C, 1050 °C e 1150 °C e caracterizados por granulometria, absorção, massa específica, composição química, mineralógica, microscopia eletrônica de varredura, perda de massa após fervura, desgaste por abrasão Los Angeles e adesividade a ligante betuminoso.

Embora a matéria-prima usada para a fabricação dos agregados tenha sido a mesma, trata-se efetivamente de cinco diferentes agregados sintéticos, com características diferenciadas, como pode ser observado nos resultados abaixo elencados.

4.6.1 RESULTADOS DA GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS SINTÉTICOS

A granulometria dos agregados de argila calcinada foi fabricada de acordo com o objetivo desejado, isto é, buscou-se uma distribuição granulométrica que oferecesse uma mistura

compacta, com volume de vazios necessários e suficientes para produzir um CBUQ enquadrado na norma DNIT-ES 031/2006. Para tanto, utilizou-se duas misturas, demonstradas na tabela 13. Nota-se, pela distribuição granulométrica, que a mistura 2 possui uma quantidade um pouco maior de finos, o que favorece uma mistura mais densa.

Misturas	AGC	Areia	Cimento	Granulometria dos agregados calcinados	Peneiras	3/4”	1/2”	3/8”	4	10
					Abertura (mm)	19,1	12,7	9,5	4,8	2,0
Mistura 1	60%	35%	5%		% Passa	100	85	70	30	0
					% Retida	0	15	15	40	30
Mistura 2	55%	40%	5%		% Passa	100	90	60	40	0
					% Retida	0	10	30	20	40

Tabela 13 – Composição das misturas e distribuição granulométrica dos AGCs

4.6.2 RESULTADOS DA ABSORÇÃO DE ÁGUA E MASSA ESPECÍFICA DOS AGREGADOS SINTÉTICOS

Utilizou-se o método de ensaio do DNER-ME 195/97, cujos resultados constam da tabela 14. Observa-se que o agregado calcinado a 780 °C se mostrou mais absorcivo que os demais, pois esta temperatura demonstrou insuficiência na formação de fase líquida por determinados elementos fundentes presentes nos argilominerais constituintes da matéria-prima argilosa. Contudo, nota-se uma considerável redução na absorção de água na passagem de temperatura de 850 °C para 950 °C, mantendo-se praticamente uniforme nas faixas seguintes de temperatura.

Observa-se uma mudança de comportamento no agregado calcinado a 1050 °C, onde houve aumento da absorção de água e redução da massa específica aparente, provocadas pelo final das transformações de fase do cristal, para a fase amorfa. Enquanto a 1150 °C houve

vitificação completa da fase amorfa presente até 1050 °C, o que provocou aumento da massa específica. Estas transformações de fase podem ser confirmadas nos resultados de difração de raios-x.

Tipo de agregado	DNER-ME 195/97		
	Absorção (%)	Massa específica (g/cm ³)	
		Aparente	Real
AGC-780 °C	13,3	1,851	2,455
AGC-850 °C	11,7	1,860	2,380
AGC-950 °C	8,4	1,905	2,269
AGC-1050 °C	8,8	1,800	2,140
AGC-1150 °C	7,9	1,965	2,327

Tabela 14 – Absorção e massa específica dos agregados sintéticos

As figuras 23 e 24 ilustram de forma mais clara a evolução dessas características, em função da temperatura de queima dos agregados.

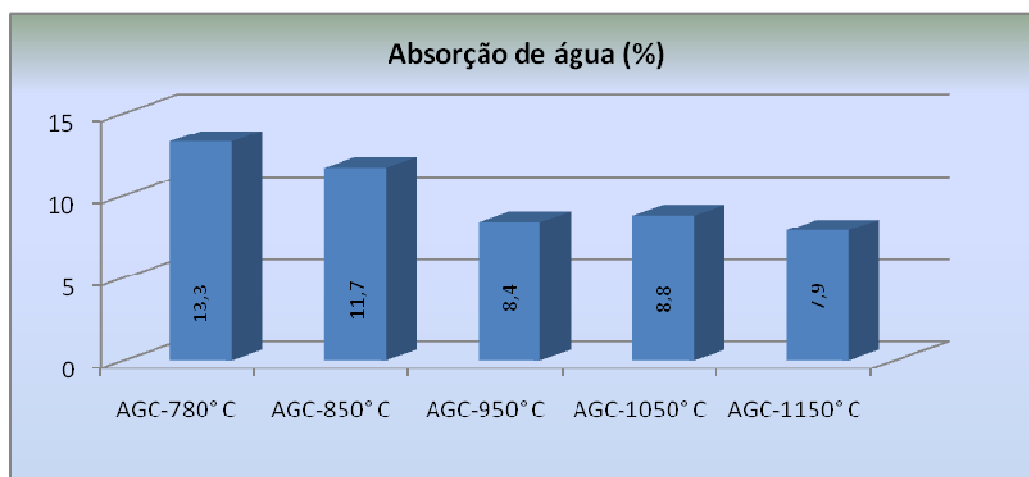


Figura 23 – Evolução da absorção dos agregados sintéticos

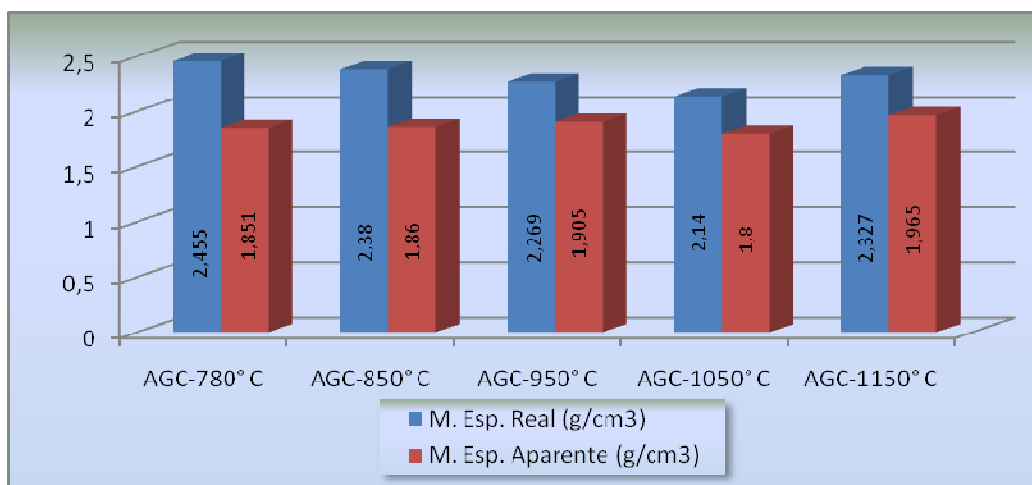


Figura 24 – Evolução da massa específica dos agregados sintéticos

4.6.3 RESULTADOS DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS AGREGADOS SINTÉTICOS

A tabela 15 apresenta os principais elementos encontrados nas amostras de agregado sintético de argila calcinada. Com exceção do AGC-780 e AGC-1150, os demais agregados apresentaram os mesmos elementos com variação de concentração, uma vez que o método de análise constitui-se como semi-quantitativo. Nota-se a presença do óxido de enxofre (SO_3), responsável pela produção de poros fechados, que favorece a formação de fase vítrea, auxiliando na densificação do agregado produzido. A redução na concentração de Fe_2O_3 e TiO_2 no AGC-1150 decorre da incorporação destes elementos na fase vítrea do agregado, presente nesta temperatura.

Agregados	Óxidos (%)							
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃
AGC-780	1,08	1,62	26,67	59,25	2,79	1,17	7,43	-
AGC-850	1,0	1,67	25,43	58,15	2,72	1,22	9,16	0,64
AGC-950	0,91	1,43	25,36	57,51	2,71	1,32	10,39	0,38
AGC-1050	1,03	1,41	24,37	57,90	2,71	1,33	10,77	0,49
AGC-1150	-	-	27,61	64,73	2,58	0,51	4,56	-

Tabela 15 – Principais elementos encontrados nas amostras de agregados de argila calcinada

Os minerais encontrados nas amostras de agregados de argila calcinada encontram-se dispostos na tabela 16. Ressalta-se que o método de difração de raios-x detecta somente mineral de estrutura cristalina. Nota-se que em nenhuma amostra calcinada foi encontrada a caulinita, uma vez que a cristalinidade deste argilomineral começa a desaparecer a partir de 500 °C. O incremento de temperatura sobre os argilominerais que formam o corpo cerâmico provoca reações químicas, com transformação de fases e modificação de suas estruturas cristalinas.

Agregados	AGC-780	AGC-850	AGC-950	AGC-1050	AGC-1150
Minerais	Ilita	Ilita	Ilita		
	Quartzo	Quartzo	Quartzo	Quartzo	Quartzo

Tabela 16 – Minerais presentes nos agregados sintéticos

Na figura 25 encontram-se os difratogramas dos agregados sintéticos, obtidos através do ensaio de difração de raios-x.

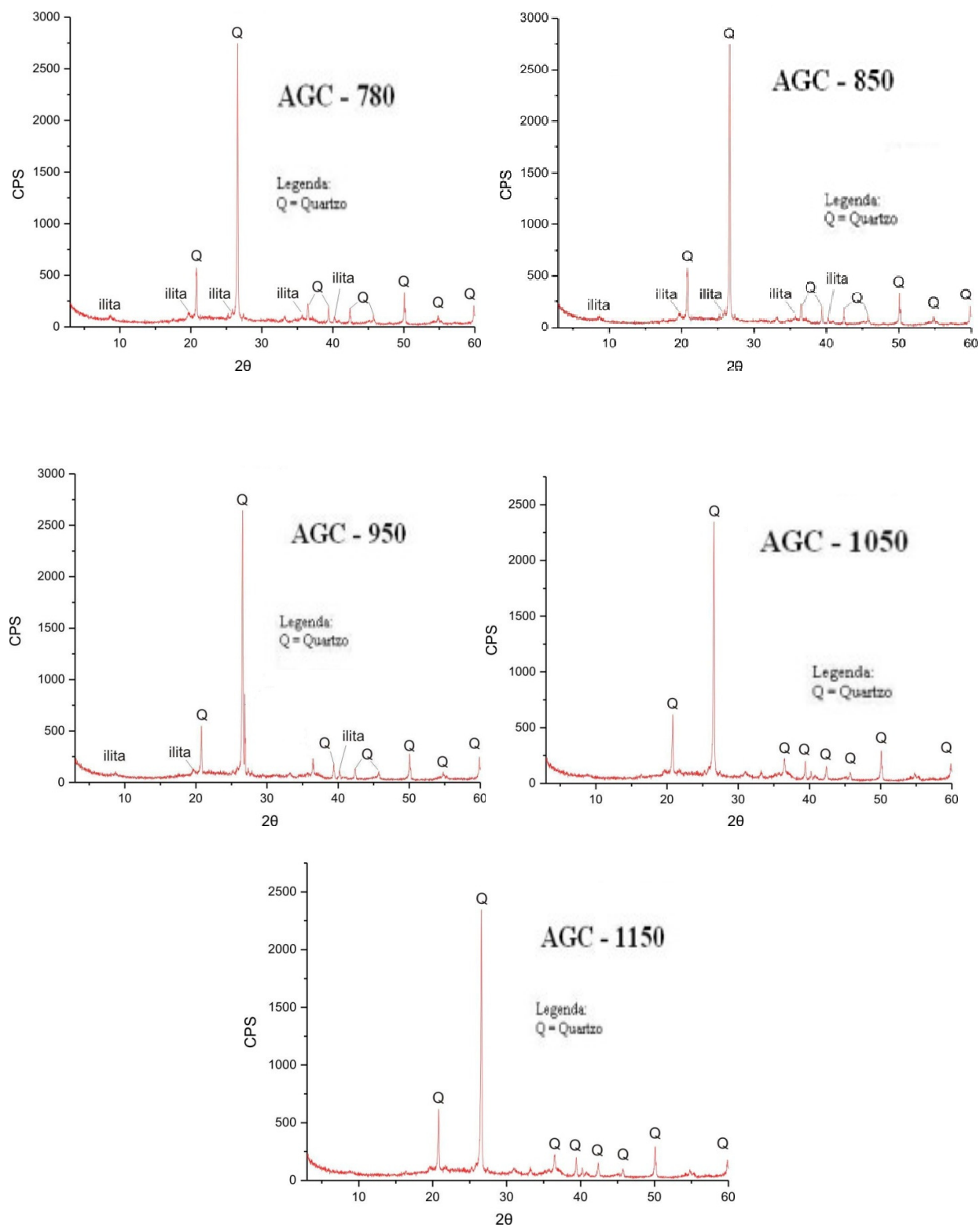
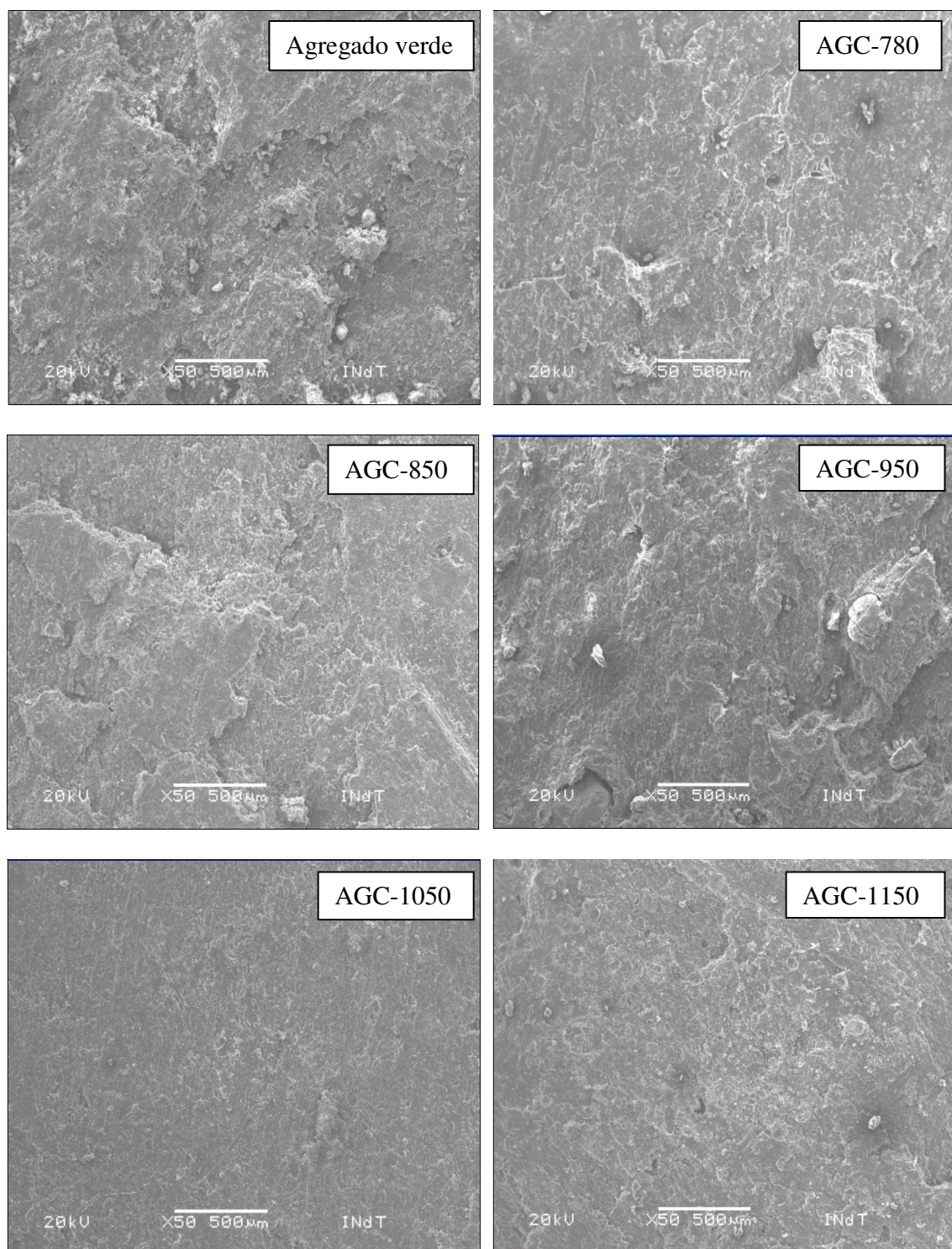


Figura 25 – Difratomogramas dos agregados sintéticos

4.6.4 RESULTADOS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DOS AGREGADOS SINTÉTICOS

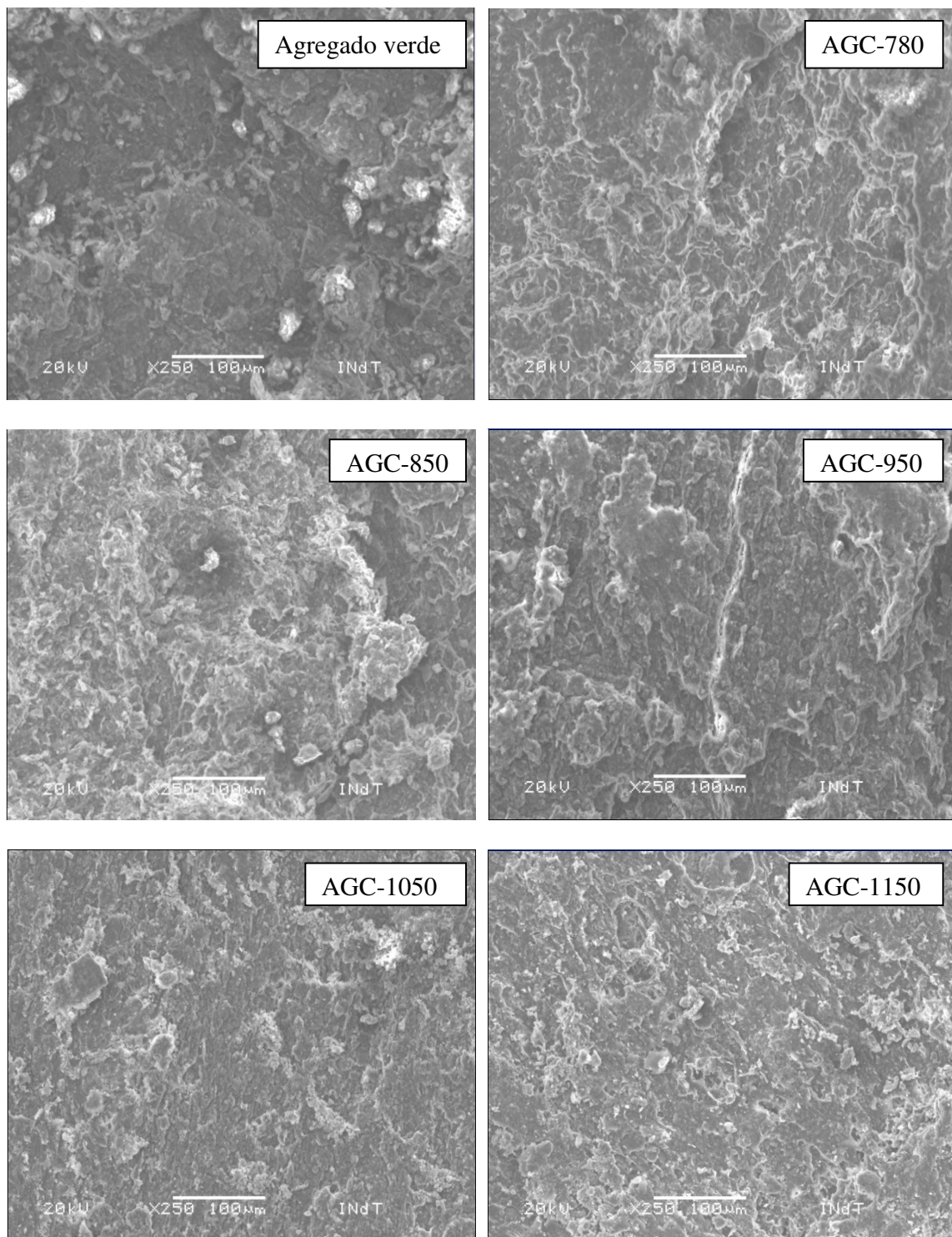
Nas figuras 26 e 27 estão apresentadas as micrografias das amostras de agregados de argila calcinada ampliadas nas escalas 50x, 250x, 450x e 3000x. Nota-se uma tendência na melhoria da textura dos agregados com o incremento da temperatura. Todavia, é evidente a microestrutura de textura lisa do agregado calcinado a 1150 °C, o que o fez menos resistente que o AGC-1050, como pode ser observado nos resultados mecânicos do CBUQ confeccionado com este agregado.

As micrografias que demonstram textura lisa com poros em forma arredondada indicam vitrificação do corpo cerâmico.



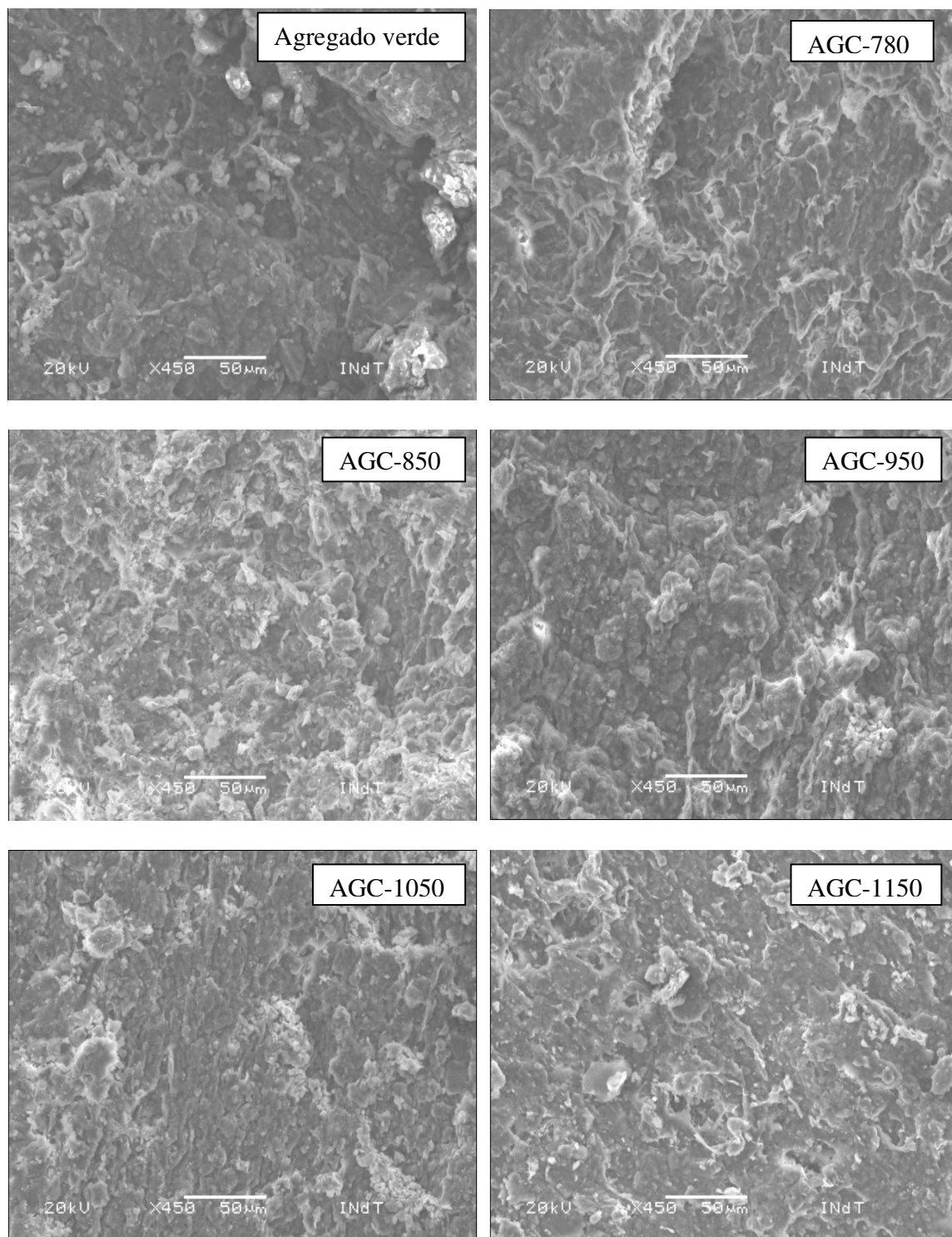
(a)

Figura 26 – Imagens microscópicas das superfícies dos agregados sintéticos: a) ampliadas 50x



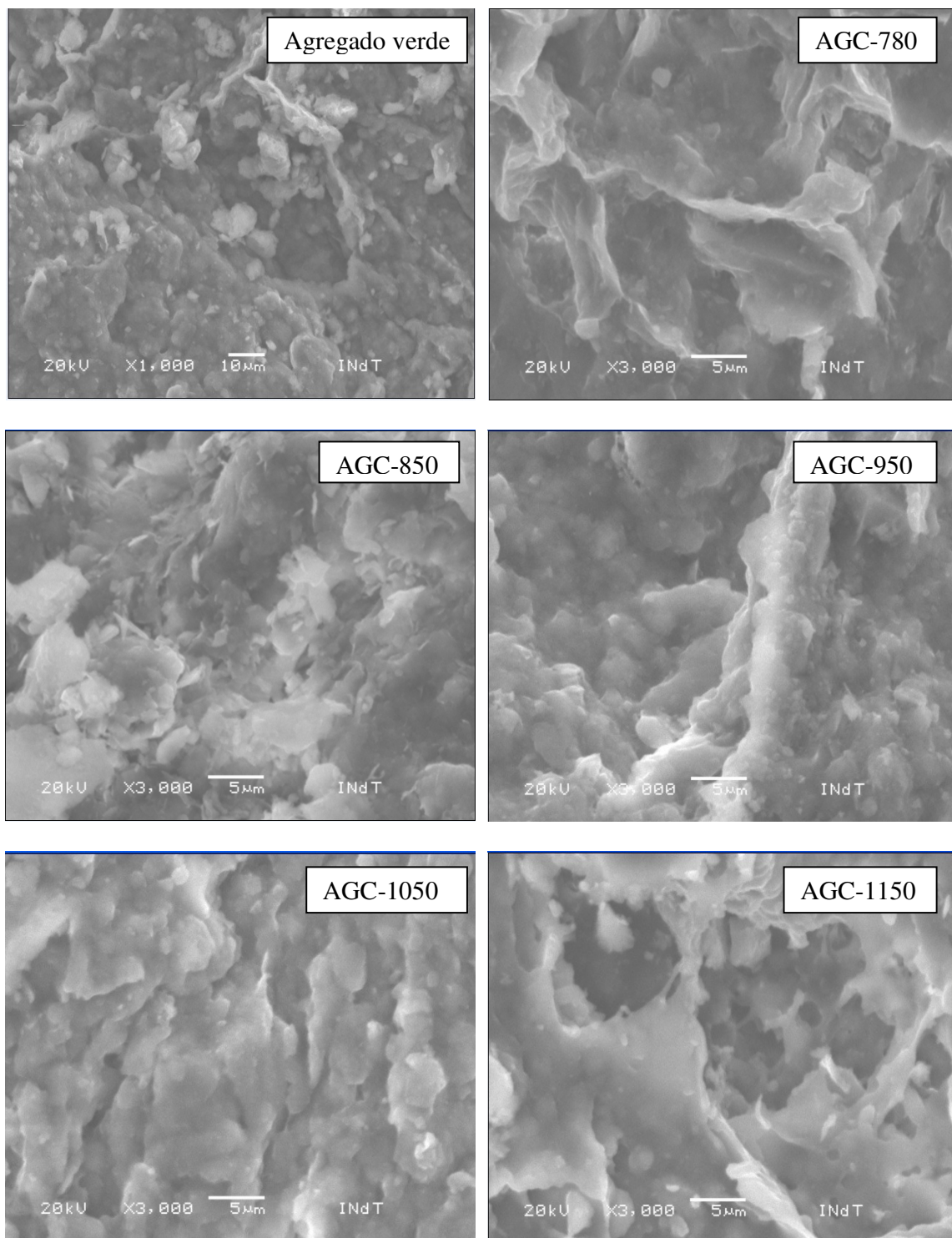
(b)

Figura 26 – Imagens microscópicas das superfícies dos agregados sintéticos: b) ampliadas 250x



(c)

Figura 26 – Imagens microscópicas das superfícies dos agregados sintéticos: c) ampliadas 450x

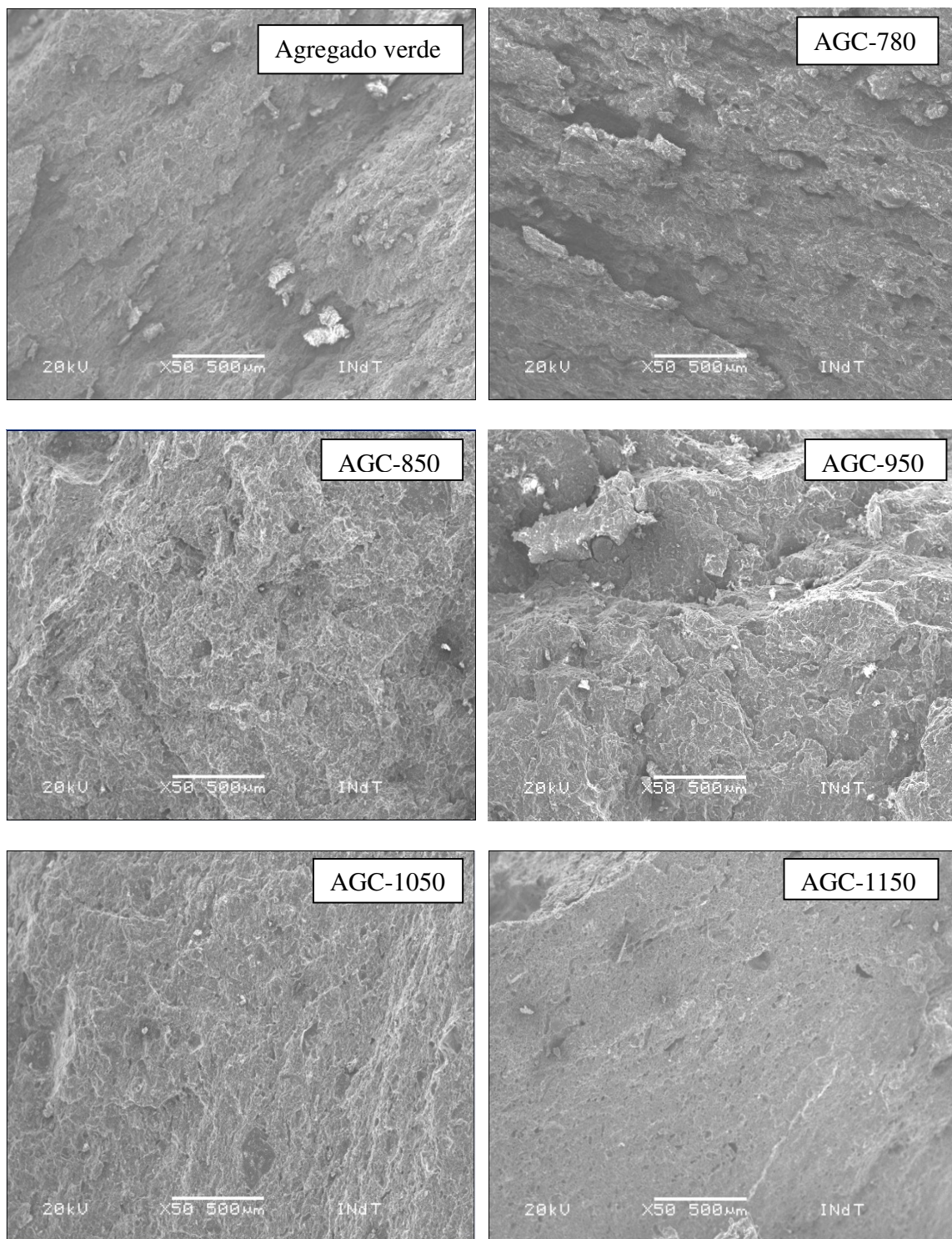


(d)

Figura 26 – Imagens microscópicas das superfícies dos agregados sintéticos: d) ampliadas 3000x

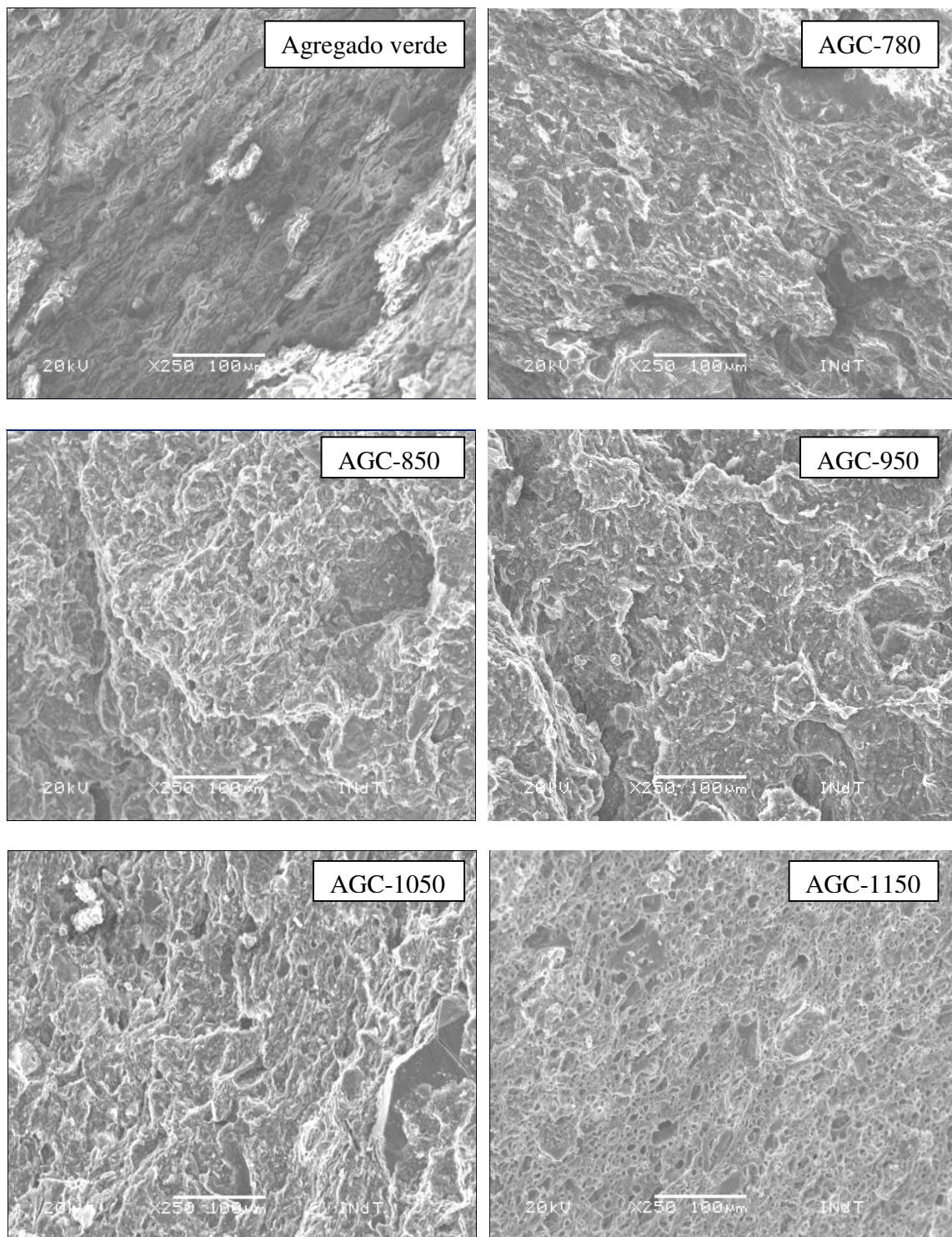
Nota-se pela figura 27, que as micrografias das superfícies fraturadas dos agregados sintéticos, com texturas bem definidas, caracterizam formação de fase vítrea. Todavia, a superfície lisa provoca queda de resistência mecânica, como pode ser confirmado nos resultados mecânicos do CBUQ confeccionado com este agregado.

Embora o método de difração de raios-x não tenha identificado a formação da mulita, fase de transformação da caulinita a altas temperaturas, as imagens geradas pelo MEV do AGC-1150 sugerem a cristalização desta fase, responsável pela densificação do corpo cerâmico, com redução da porosidade aberta e aumento da massa específica.



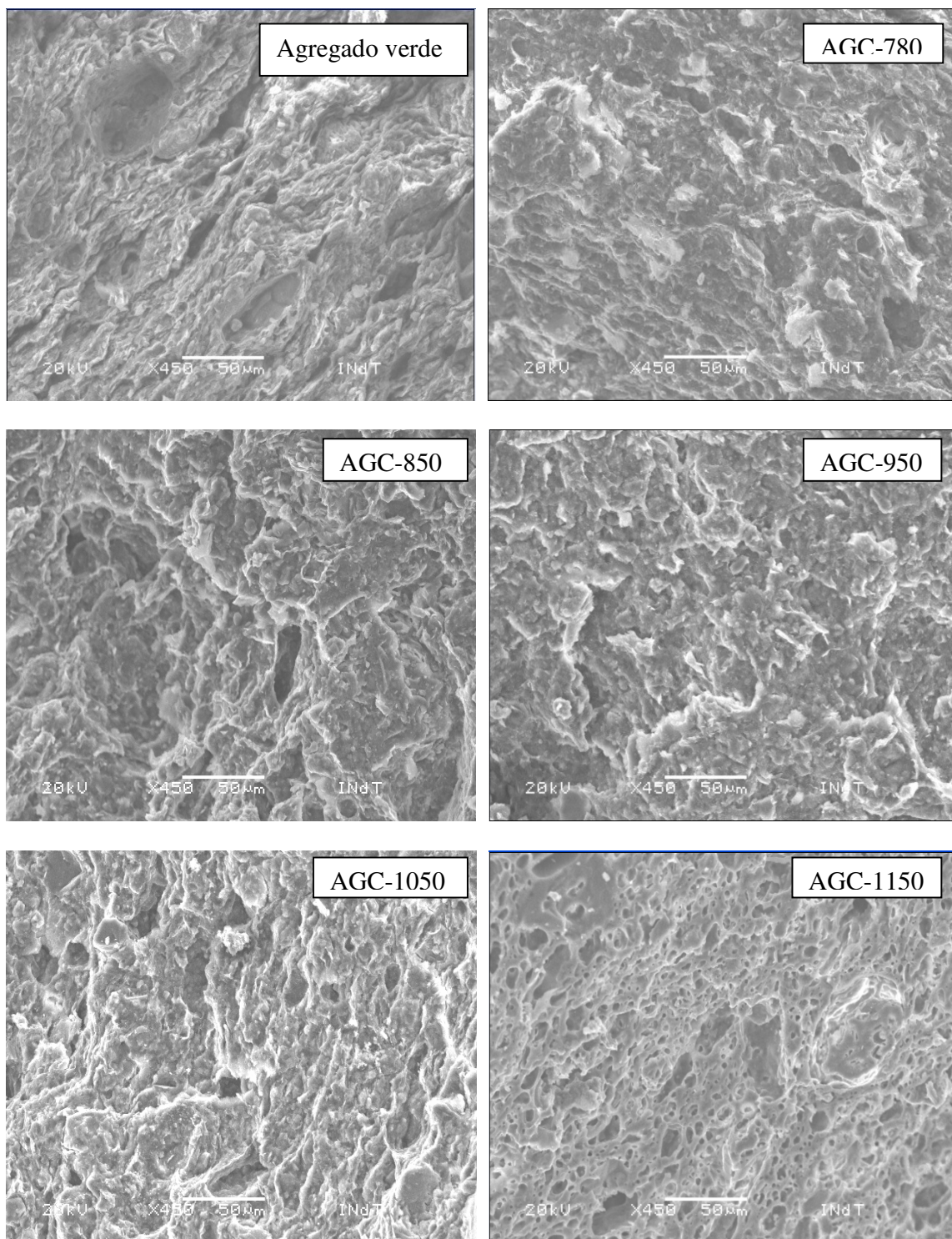
(a)

Figura 27 – Imagens microscópicas das superfícies fraturadas dos agregados sintéticos: a) ampliadas 50x



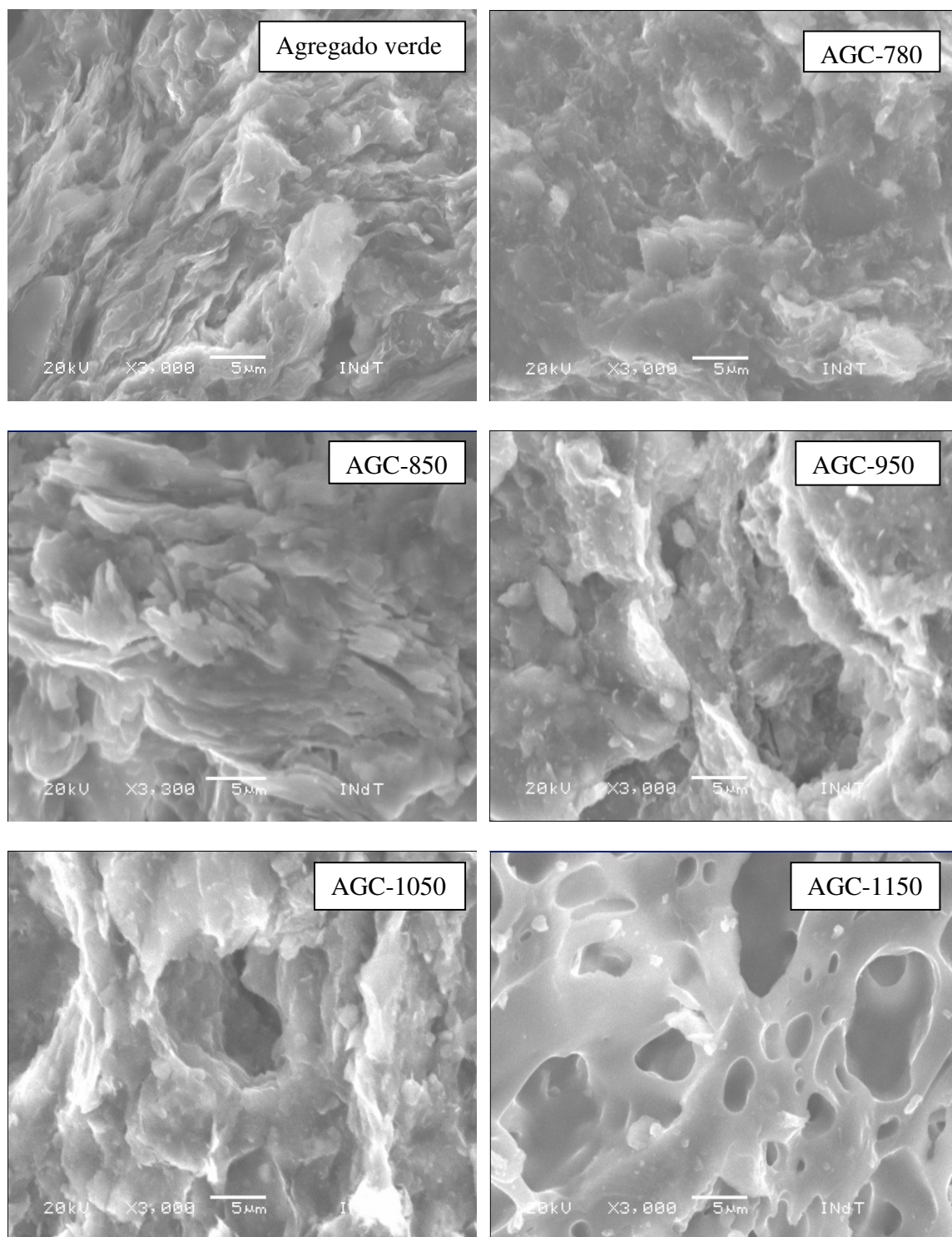
(b)

Figura 27 – Imagens microscópicas das superfícies fraturadas dos agregados sintéticos: b) ampliadas 250x



(c)

Figura 27 – Imagens microscópicas das superfícies fraturadas dos agregados sintéticos: c) ampliadas 450x



(d)

Figura 27 – Imagens microscópicas das superfícies fraturadas dos agregados sintéticos: d) ampliadas 3000x

4.6.5 PERDA DE MASSA APÓS FERVURA DOS AGREGADOS SINTÉTICOS

Este ensaio foi realizado segundo os procedimentos contidos nas normas DNER-ME 225/94 e DNER-EM 230/94, que estabelece 6 % como limite máximo de desgaste, para agregados calcinados aplicados em CBUQ. Todos os agregados produzidos nesta pesquisa apresentaram desgaste inferior a 1 %, valor este muito aquém do máximo permitido pela especificação, o que demonstra desempenho satisfatório.

4.6.6 DESGASTE POR ABRASÃO LOS ANGELES DOS AGREGADOS SINTÉTICOS

Este ensaio cumpriu os procedimentos contidos na norma DNER-ME 222/94, cujos resultados estão ilustrados na figura 28. Pode-se observar uma redução gradual de desgaste abrasivo com o aumento da temperatura de queima do agregado. Os agregados atenderam à especificação DNER-EM 230/94, que estabelece 35 % como limite máximo para desgaste do agregado sintético usado em CBUQ. Contudo, os agregados calcinados a 780 °C e 1150 °C não foram submetidos a este ensaio em razão de sua limitada produção. Destarte, o AGC-780 não foi aplicado em CBUQ por ter apresentado alto teor de absorção de água, conseqüentemente também de ligante asfáltico, enquanto que a aplicação do AGC-1150 em CBUQ configura-se economicamente inviável pela alta temperatura de calcinação.

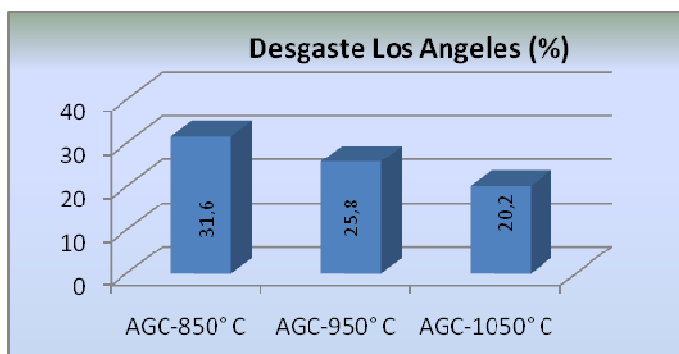


Figura 28 – Desgaste dos agregados sintéticos por abrasão Los Angeles

4.6.6 ADESIVIDADE A LIGANTE BETUMINOSO DOS AGREGADOS SINTÉTICOS

Os agregados sintéticos calcinados a 780 °C, 850 °C, 950 °C, 1050 °C e 1150 °C apresentaram uma adesividade ao CAP 50/70 satisfatória. Depois de cumpridas rigorosamente todas as etapas do ensaio, observou-se que o ligante não se desprende dos agregados, não sendo necessária adição de melhoradores de adesividade.

4.6.7 DOSAGEM DAS MISTURAS

4.6.7.1 CURVAS DE PROJETO

O concreto asfáltico convencional (com seixo) e com agregado sintético de argila calcinada (AGC) foram enquadrados na faixa C do DNIT. Esta faixa granulométrica é indicada para misturas de agregados com vistas à aplicação em camadas de rolamento de revestimentos asfálticos.

As tabelas 17/19 apresentam as composições granulométricas dos agregados das misturas. Pode-se observar que a mistura 1, com 60 % de AGC, foi composta com uma quantidade maior de agregado calcinado que a mistura 2, enquanto que esta última possui maior quantidade de areia.

Peneira	Abertura (mm)	AGC	Areia	Cimento	Projeto da mistura 1	Especificação Faixa C
		60%	35%	5%		
3/4"	19,1	60	35	5	100	100
1/2"	12,7	51	35	5	91	80 – 100
3/8"	9,5	42	35	5	82	70 – 90
4	4,8	18	34,7	5	57,7	44 – 72
10	2,0	-	33,6	5	38,6	22 – 50
40	0,42	-	20,1	5	25,1	08 – 26
80	0,18	-	5,9	4,9	10,8	4 – 16
200	0,074	-	0,4	4,6	5,0	2 - 10

Tabela 17 – Projeto da mistura 1

Peneira	Abertura (mm)	AGC	Areia	Cimento	Projeto da mistura 2	Especificação Faixa C
		55%	40%	5%		
3/4"	19,1	55	40	5	100	100
1/2"	12,7	49,5	40	5	94,5	80 – 100
3/8"	9,5	33	40	5	78,0	70 – 90
4	4,8	22	39,7	5	66,7	44 – 72
10	2,0	-	38,4	5	43,4	22 – 50
40	0,42	-	23	5	28,0	08 – 26
80	0,18	-	6,8	4,9	11,7	4 – 16
200	0,074	-	0,5	4,6	5,1	2 - 10

Tabela 18 – Projeto da mistura 2

Peneira	Abertura (mm)	Seixo	Areia	Cimento	Projeto da mistura	Especificação Faixa C
		67%	28%	5%		
3/4"	19,1	67	28	5	100	100
1/2"	12,7	65,9	28	5	98,9	80 – 100
3/8"	9,5	60,4	28	5	93,4	70 – 90
4	4,8	27,7	27,8	5	60,5	44 – 72
10	2,0	11,1	26,8	5	42,9	22 – 50
40	0,42	1,3	16,1	5	22,4	08 – 26
80	0,18	0,4	4,7	4,9	10	4 – 16
200	0,074	0,1	0,3	4,6	5,1	2 - 10

Tabela 19 – Projeto da mistura convencional (com seixo)

4.6.7.2 TEMPERATURAS DE TRABALHO

A viscosidade do ligante deve ser controlada em função da temperatura de aquecimento, a fim de assegurar o envolvimento completo do agregado, bem como contribuir na trabalhabilidade de espalhamento e compactação da mistura. A figura 29 ilustra os resultados do ensaio viscosidade x temperatura, que permitiu definir as temperaturas de trabalho, constantes da tabela 20. Observa-se que os valores encontrados atendem à especificação do DNIT – ES 031/2006, que estabelece como temperatura do ligante o intervalo de temperatura compreendido entre 107 °C e

177 °C; temperatura de aquecimento dos agregados de 10 °C a 15 °C acima da temperatura do ligante.

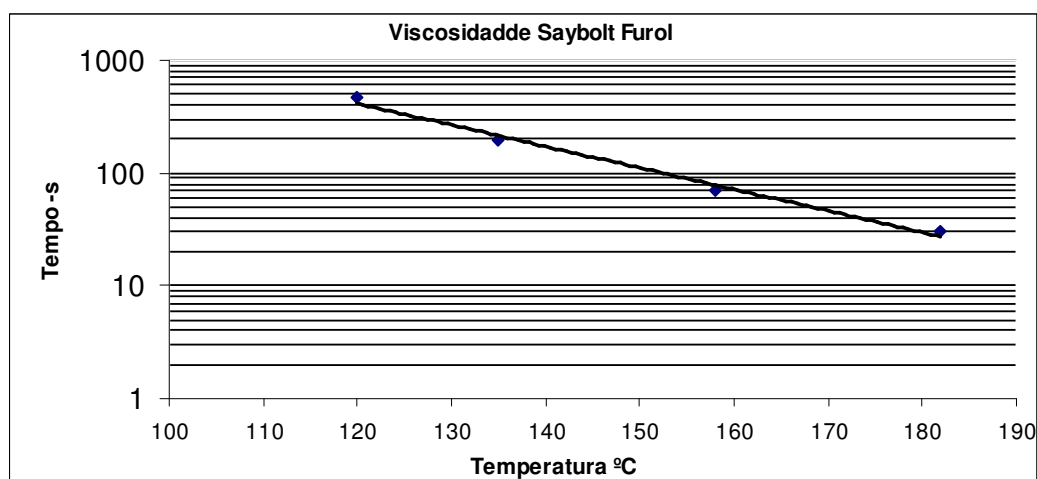


Figura 29 – Viscosidade x temperatura do CAP 50/70

Material	Temperatura de trabalho
Mistura	146 °C
CAP 50/70	157 °C
Agregados	170 °C

Tabela 20 – Temperaturas de trabalho das misturas

4.6.7.3 PROJETOS DAS MISTURAS

Após enquadramento das misturas na faixa especificada, acrescentou-se o CAP 50/70 gradualmente, nos teores de 6 %, 7 %, 8 % e 9 %, para as duas misturas confeccionadas com AGC e 4 %, 4,5 %, 5 % e 5,5 % de CAP para a mistura convencional, a fim de se encontrar o teor ótimo de projeto de cada mistura. Foi avaliado o desempenho das misturas confeccionadas com

AGC, cujos resultados encontram-se ilustrados nas figuras 30.1 (a/f), 30.2 (a/f) e 30.3 (a/f). Pode-se observar um melhor desempenho da mistura 2 quando comparada à mistura 1.

Suas densidades, seja aparente ou máxima teórica, são maiores para os três teores de CAP utilizados, caracterizando-a como mais densa que a mistura 1. As figuras 30.1 (c), 30.2 (c) e 30.3 (c) confirmaram esta afirmação, pois para um mesmo teor de CAP, a quantidade de vazios da mistura 2 foi menor que à mistura 1, provavelmente pelo aumento da fração areia naquela mistura. O mesmo raciocínio vale para a relação betume-vazios, pois quanto menor a quantidade de vazios, maior será a relação betume-vazios.

No tocante à estabilidade, figuras 30.1 (e), 30.2 (e) e 30.3 (e), observa-se que na faixa de 7 % a 8 % de CAP, houve pouca variação entre as duas misturas. Contudo, na faixa de ligante compreendida entre 8 % e 9 %, houve um decréscimo maior na estabilidade da mistura 2, pois é chegado um ponto em que o acréscimo de ligante reduz a interação entre os componentes da mistura, com conseqüente queda de resistência.

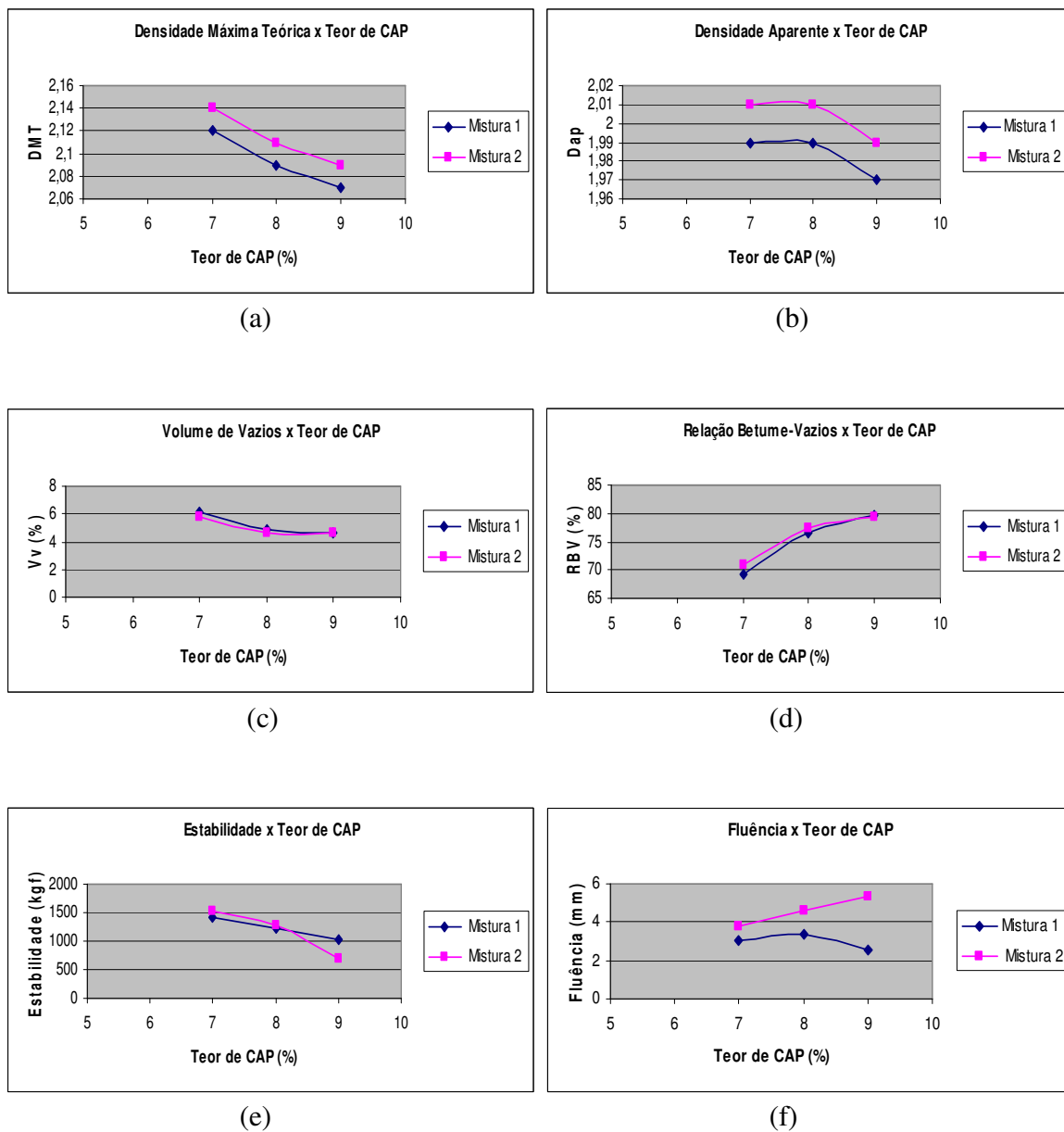


Figura 30.1 – Comparativo entre as mistura 1 e 2, com AGC-850° C: a) DMT; b) Densidades aparentes; c) Volume de vazios; d) RBV; e) Estabilidades; f) Fluências

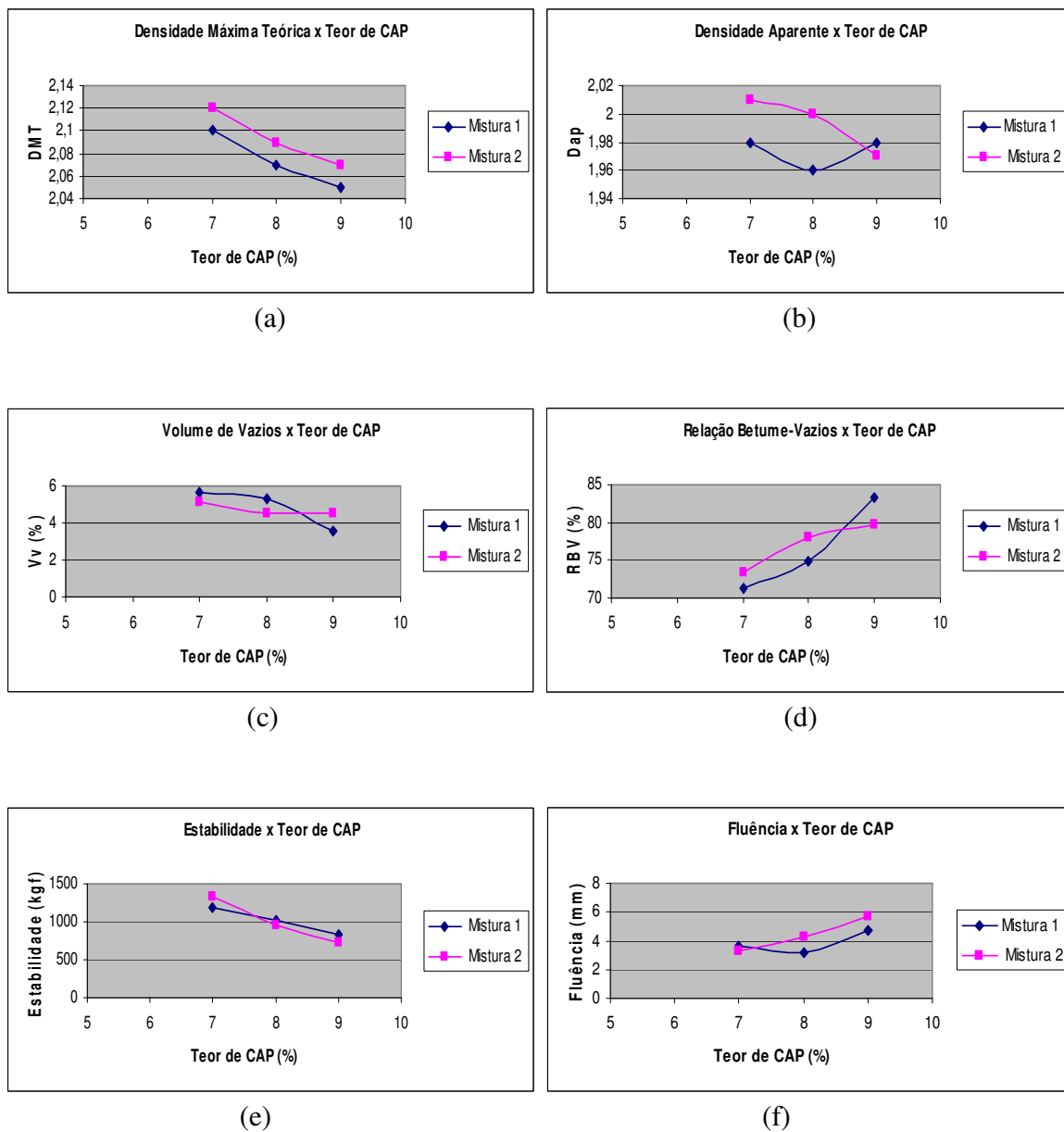


Figura 30.2 – Comparativo entre as mistura 1 e 2, com AGC-950° C: a) DMT; b) Densidades aparentes; c) Volume de vazios; d) RBV; e) Estabilidades; f) Fluências

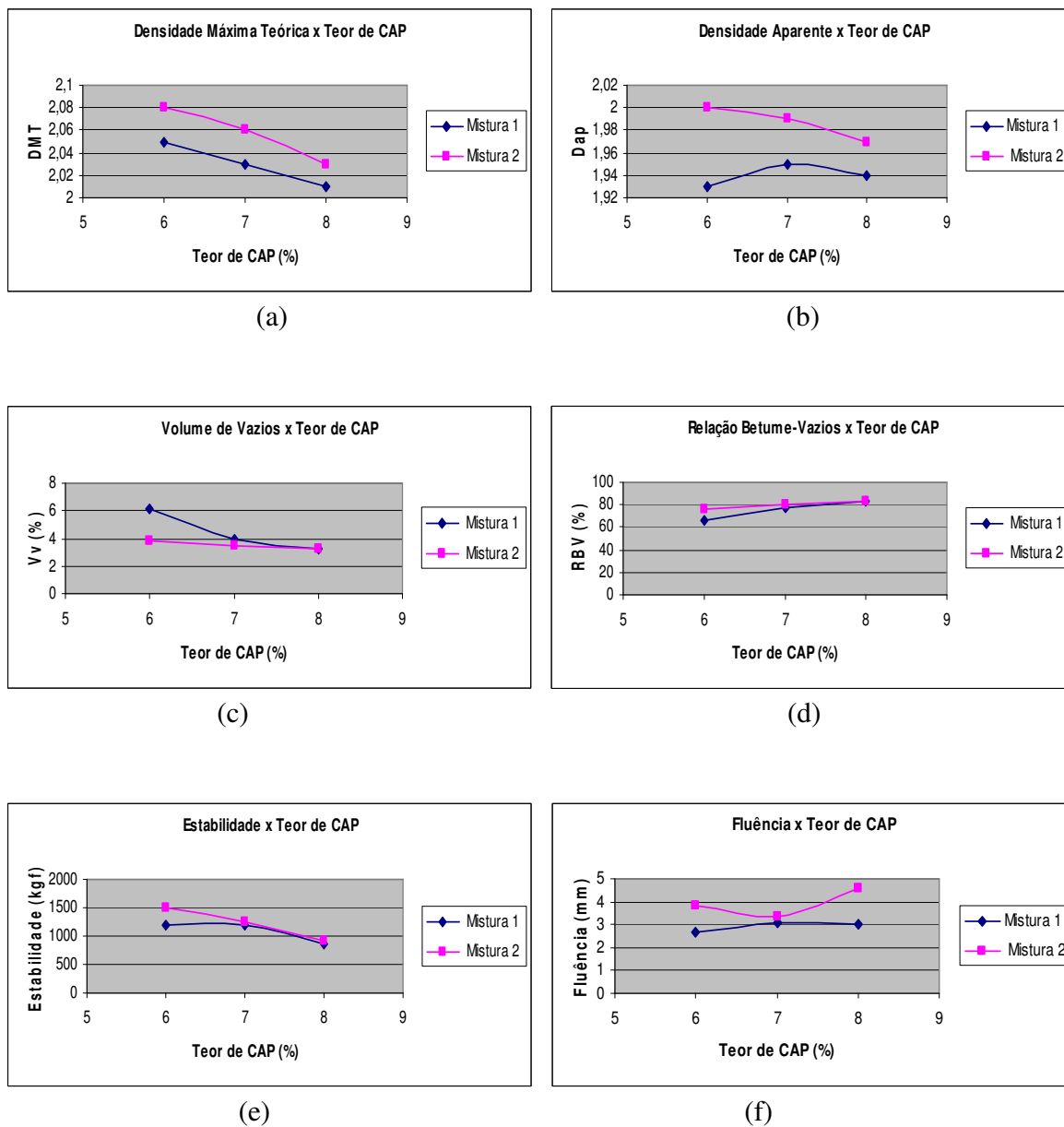


Figura 30.3 – Comparativo entre as mistura 1 e 2, com AGC-1050° C: a) DMT; b) Densidades aparentes; c) Volume de vazios; d) RBV; e) Estabilidades; f) Fluências

Por todo o desempenho apresentado, sobretudo em razão das densidades encontradas, optou-se pela mistura 2, para continuidade dos ensaios. Os teores de projeto encontrados para cada mistura encontram-se na tabela 21.

Mistura	Teor de ligante CAP 50/70 (%)
CBUQ com seixo	5
CBUQ com AGC 850 °C	8,4
CBUQ com AGC 950 °C	8,0
CBUQ com AGC 1050 °C	6,0
CBUQ com AGC 1150 °C	6,0

Tabela 21 – Teor de ligante dos projetos das misturas

Como eram esperados, os concretos asfálticos confeccionados com agregados sintéticos de argila calcinada (AGC) consomem mais ligante, em razão da porosidade destes agregados, quando comparados ao concreto asfáltico convencional. Contudo, à medida que se aumenta a temperatura de queima desses agregados, o consumo de ligante diminui na proporção em que o agregado se densifica.

4.6.7.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS MISTURAS

Para análise dos parâmetros físicos das misturas pesquisadas, foram moldados, para cada mistura, cinco corpos-de-prova nos teores de CAP discriminados na tabela 21, anteriormente exposta, com exceção do CBUQ confeccionado com AGC-1150, que pela produção limitada de material, foram moldados três corpos-de-prova para esta mistura. Os valores encontrados para as densidades aparentes (D_{ap}), densidades máximas teóricas (DMT), volume de vazios (V_v), vazios

cheios de betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM) e relação betume-vazios (RBV), foram obtidos pela média aritmética das cinco determinações.

A tabela 22 apresenta os resultados obtidos das misturas asfálticas com seixo e com agregado sintético de argila calcinada. As densidades aparentes foram obtidas seguindo os procedimentos descritos na norma do DNER-ME 117/94, enquanto as densidades máximas teóricas foram obtidas pela média ponderada das densidades individuais de cada agregado da mistura. Observa-se um ganho de densidade aparente entre os agregados calcinados a 850 °C e 950 °C. O incremento de temperatura densifica o material cerâmico com a presença de fase vítrea, diminuindo sua porosidade aberta.

A mesma observação deve ser feita quanto à densidade máxima teórica, que é dependente das densidades reais dos agregados. À medida que se aumenta a temperatura de queima dos agregados, suas densidades reais decrescem, o que está provavelmente associado ao aumento da porosidade fechada, favorecida pela presença de montmorilonita, argilomineral de característica expansiva. Isto porque durante a queima ocorrem reações físico-químicas na microestrutura do corpo cerâmico, reações estas que são aceleradas com o aumento da temperatura, provocando fusão incipiente de alguns elementos químicos, gerando uma fase líquida, responsável pelo preenchimento dos poros do agregado em aquecimento. Alguns desses poros podem conter gases aprisionados que favorecem o aumento do volume da parte sólida mais vazios impermeáveis. Aumentando o volume, a densidade diminui, considerando uma mesma massa.

Mistura	Teor de CAP (%)	DMT	Dap		Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)		RBV (%)
CBUQ com seixo	5	2,47	2,38	Limites da Especificação – 3% a 5%	3,90	11,94	15,84	Limites da Especificação – 75% a 82%	75,37
CBUQ com AGC-850 °C	8,4	2,10	2,0		4,58	16,91	21,48		78,69
CBUQ com AGC-950 °C	8,0	2,09	2,01		4,06	16,14	20,20		79,89
CBUQ com AGC-1050 °C	6,0	2,08	2,0		3,99	12,03	16,02		75,08
CBUQ com AGC-1150 °C	6,0	2,18	2,09		4,18	12,57	16,75		75,05

Tabela 22 – Características físicas das misturas estudadas

As misturas com agregado calcinado apresentaram densidades aparentes e teóricas bem menores, quando comparadas à mistura com seixo.

As densidades exercem influência direta nos vazios do agregado, ou seja, agregado mais denso, menos vazios. Esta característica foi conseguida com o aumento da temperatura de queima. Nota-se, pelos resultados apresentados na tabela 22, que quanto menor a temperatura de calcinação do agregado, maior o consumo de ligante. O ligante que deveria estar sendo usado para impermeabilizar e unir os agregados, parte foi absorvido por este. Como o cimento asfáltico é mais viscoso que a água, sabe-se que a quantidade de ligante absorvido pelo agregado é menor que a quantidade de água absorvida.

Isto posto, a mistura com seixo apresentou uma redução de aproximadamente 40 %, em peso, no teor de CAP, quando comparadas às misturas confeccionadas com AGC-850 °C e AGC-950 °C. Contudo, esta redução caiu pela metade quando comparada ao CBUQ confeccionado com AGC-1050 °C. Ressalta-se que foi adotado um teor de ligante asfáltico para cada mistura

pesquisada, a fim de que os vazios não preenchidos e os vazios cheios de betume se enquadrassem na especificação DNIT-ES 031/2006.

A figura 31 (a/f) facilita a visualização dos resultados expostos na tabela 30.

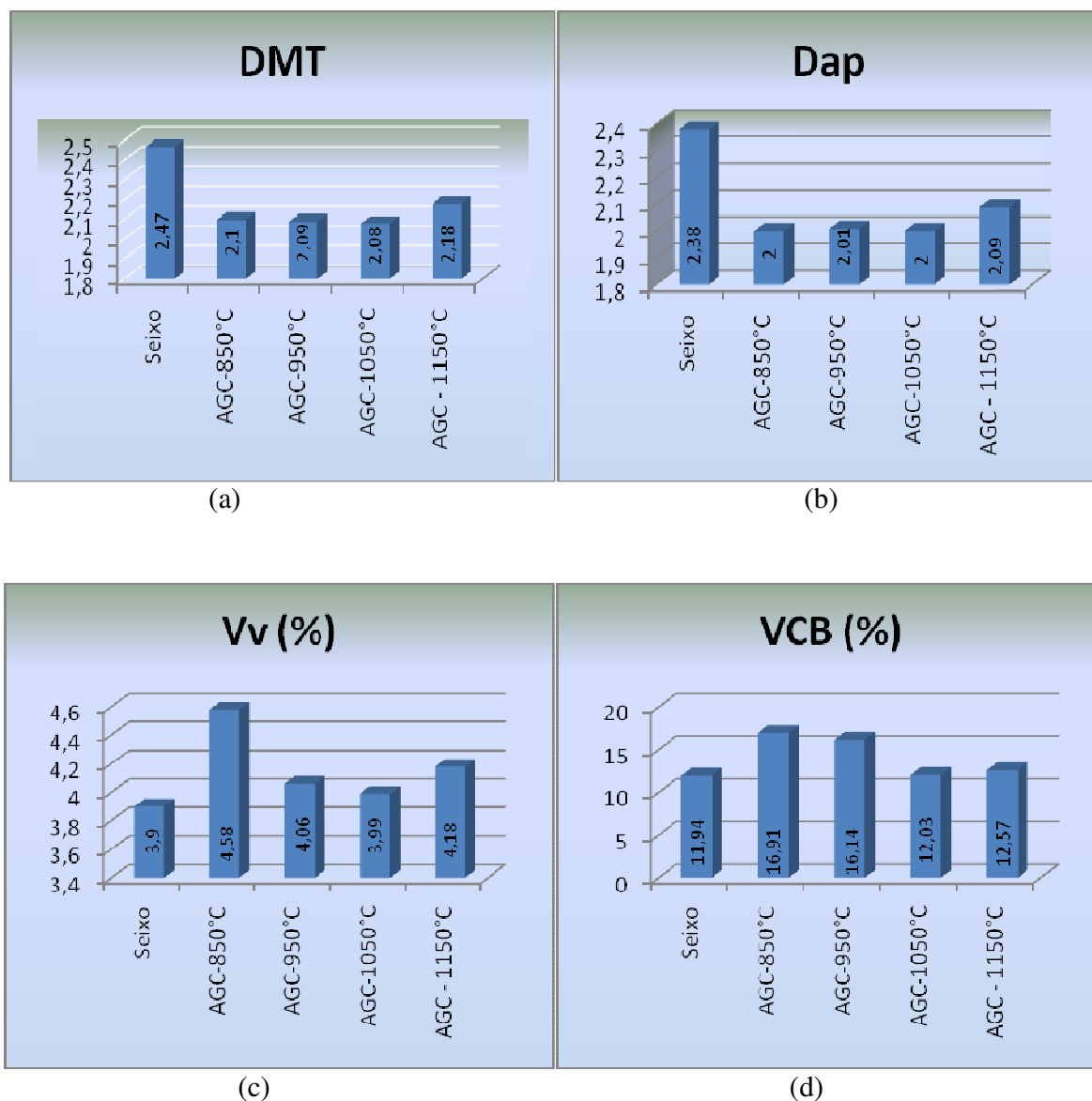


Figura 31 – Características físicas das misturas estudadas: a) Densidade máxima teórica; b) Densidade aparente; c) Volume de vazios; d) Vazios cheios de betume

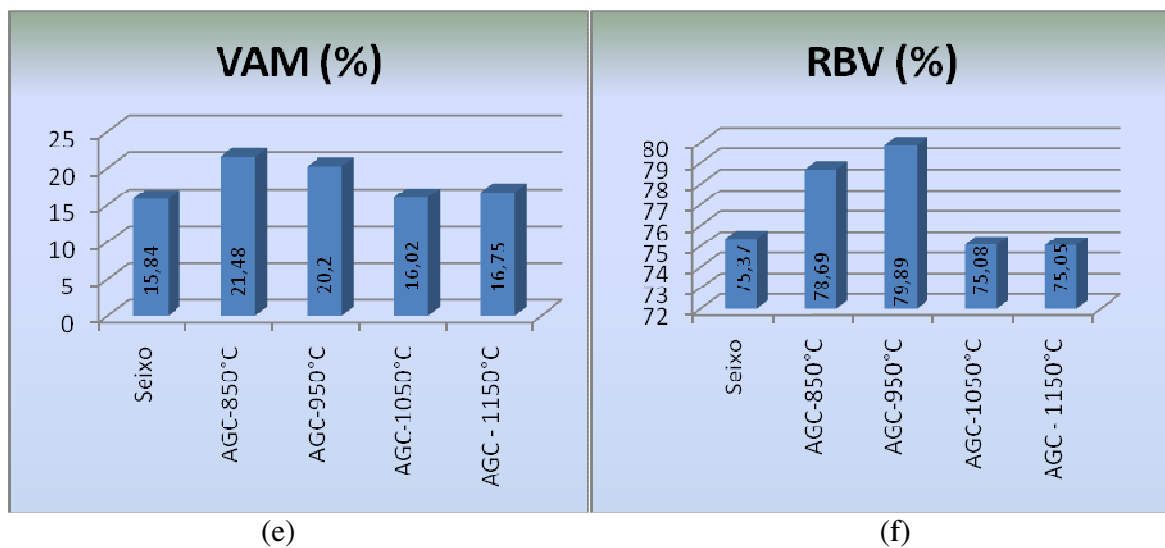


Figura 31 – Características físicas das misturas estudadas: e) Vazios do agregado mineral; f) Relação betume-vazios

4.6.7.5 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DAS MISTURAS

A avaliação do comportamento mecânico das misturas estudadas resultou dos ensaios estabilidade e fluência Marshall, tração indireta (compressão diametral) e módulo de resiliência.

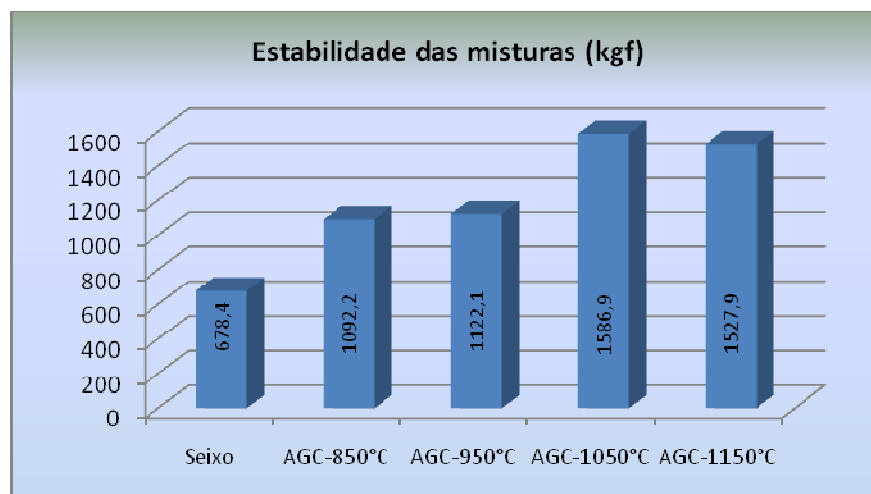
Os resultados, obtidos pela média aritmética de cinco determinações, encontram-se na tabela 23 e figura 32. Nota-se que todas as misturas superaram o limite mínimo estabelecido por norma, quanto à estabilidade. A mistura convencional mostrou-se menos resistente que qualquer outra confeccionada com AGC. A forma arredondada e textura lisa do seixo diminuem a resistência ao cisalhamento, influenciando na queda de resistência desta mistura.

Mistura	Teor de CAP (%)	Limite mínimo da especificação ≥ 500 kgf	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)	Limite mínimo da especificação $\geq 0,65$ MPa	Compressão diametral (MPa)	Módulo de Resiliência (MPa)
CBUQ com seixo	5		678,4	2,83		0,845	3316
CBUQ com AGC-850	8,4		1092,22	4,22		0,801	2613
CBUQ com AGC-950	8,0		1122,07	4,19		0,853	2809
CBUQ com AGC-1050	6,0		1586,96	3,11		1,154	4292
CBUQ com AGC-1150	6,0		1527,9	2,86		-	-

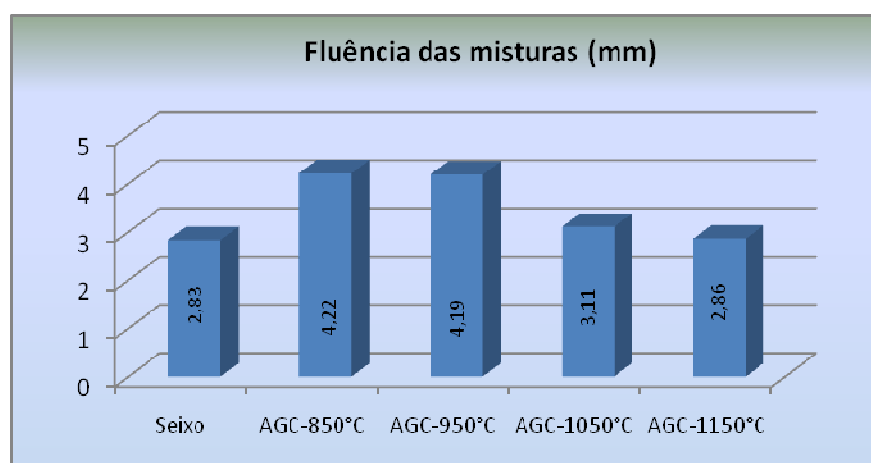
Tabela 23 – Características mecânicas das misturas estudadas

Por outro lado, as misturas feitas com AGC possuem um esqueleto estrutural mais resistente que as misturas com seixo, devido à melhor interação entre seus componentes. Observa-se que as misturas com maior teor de CAP apresentaram deformações maiores, vez que esse material tem comportamento visco-elasto-plástico, isto é, com uma deformação recuperável e outra não.

Evidencia-se, pelos resultados constantes da tabela 23, que à medida que o agregado sintético calcinado se densifica, ou seja, reduz seus vazios, há ganho de resistência por compressão diametral. Nota-se que somente a mistura confeccionada com AGC-850 °C apresentou compressão diametral ligeiramente abaixo da mistura convencional. As demais mostraram-se superiores no desempenho, onde a mistura confeccionada com AGC-1050 °C superou em 37 % aquela confeccionada com seixo.



(a)



(b)

Figura 32 – Características mecânicas das misturas estudadas: a) estabilidade; b) fluência

Os valores de módulos resilientes das misturas encontram-se na tabela 23 e figura 32 (d). Observa-se uma proporcionalidade entre os valores encontrados para a tração por compressão diametral e os módulos resilientes das misturas.

A resiliência de um material corresponde à energia armazenada quando submetido à tensões que provocam deformações elásticas. O CBUQ confeccionado com AGC-1150

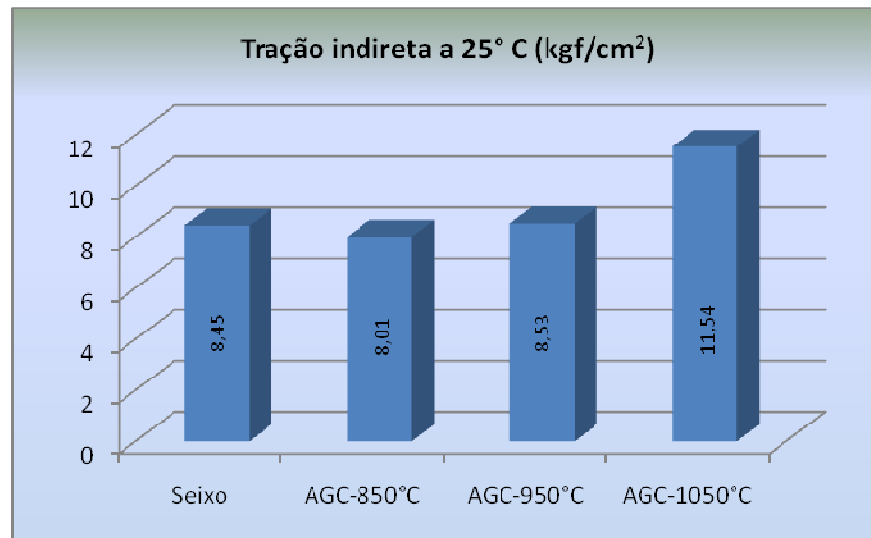
apresentou resistência à tração por compressão diametral e módulo resiliente muito superiores, quando comparado aos demais CBUQs. Pois, módulos altos caracterizam misturas muito rígidas, isto é, com grande possibilidade de desenvolver deformações permanentes, com aparecimento de trincas.

O comportamento de misturas asfálticas com relação à vida de fadiga é uma característica igualmente importante às demais até aqui apresentadas. Todavia, a falta de matéria-prima da amostra estudada nesta pesquisa impossibilitou tal análise. Contudo, a literatura propõe a relação módulo resiliente e resistência à tração indireta (MR/RT), como parâmetro de análise usado para avaliar o comportamento de misturas asfálticas relativo à vida de fadiga.

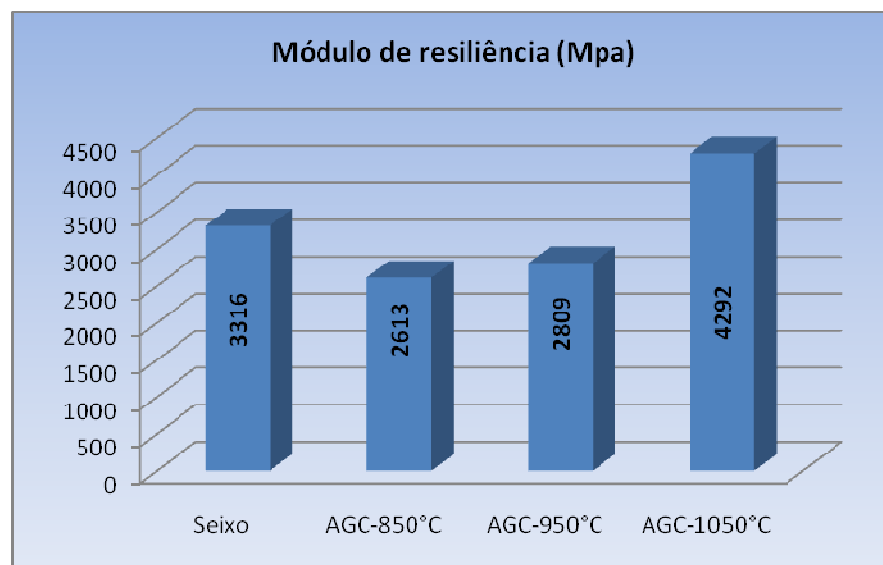
A partir dos resultados encontrados para MR e RT, foi possível encontrar os valores da relação MR/RT para as misturas asfálticas pesquisadas. Os valores resultantes desta relação, dispostos na tabela 24, foram 3924 MPa, para o CBUQ confeccionado com seixo, 3262 MPa, para o CBUQ com AGC-850, 3293 MPa, para o CBUQ com AGC-950 e 3719 MPa para o CBUQ com AGG-1050. Observa-se que todas as misturas confeccionadas com agregado sintético apresentaram valores menores para a relação MR/RT, quando comparadas com a mistura convencional (com seixo), sugerindo maior vida de fadiga para as misturas com AGC. A textura lisa e arredondada do seixo contribui negativamente para a redução na vida de fadiga de misturas asfálticas confeccionada com esse agregado.

Misturas	MR/RT (MPa)
CBUQ com seixo	3924
CBUQ com AGC-850	3262
CBUQ com AGC-950	3293
CBUQ com AGC-1050	3719

Tabela 24 – Relação MR/RT das misturas pesquisadas



(c)



(d)

Figura 32 – Características mecânicas das misturas estudadas: c) tração indireta; d) módulo de resiliência

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

Diante das experiências conquistadas com o fechamento desta pesquisa, são apresentadas abaixo, as principais conclusões a que se chegou, focadas nos objetivos inicialmente propostos:

- Solos ricos em elementos fundentes e minerais do tipo illita e caulinita, podem oferecer agregados sintéticos de notável resistência mecânica, adequados para pavimentação, contribuindo para a densificação do agregado produzido;
- A análise da composição química e mineralógica da matéria-prima constitui-se peça relevante, sobretudo para previsão de algumas propriedades físicas e resistência mecânica;
- Outra variável importante na qualidade final do produto é o processo de homogeneização da argila, que deve evitar vazios e impurezas no interior da massa, de forma a conter fissuras e queda de resistência;
- Em regiões carentes de material pétreo, a produção em larga escala de agregados sintéticos de argila calcinada em uma olaria, ou indústria cerâmica específica, pode ser considerada uma alternativa técnica e economicamente viável, vez que os agregados calcinados nas temperaturas de trabalho das olarias, isto é, 850° C e 950° C mostraram-se satisfatórios;
- Misturas asfálticas confeccionadas com agregados sintéticos de argila calcinada oferecem um melhor entrosamento entre seus componentes, quando comparadas com aquelas confeccionadas com seixo, favorecendo ganho de resistência mecânica;
- Os agregados sintéticos de argila calcinada, quando aplicados em misturas asfálticas, representam um esqueleto estrutural mais resistente que o seixo, agregado mais usado na região amazônica;

- O uso de agregados de argila calcinada em misturas asfálticas, mostra-se como alternativa técnica e economicamente viável para esta região, contribuindo para uma sobrevida dos pavimentos, como também para a redução dos impactos ambientais causados pela exploração de pedreiras e retirada de seixo do leito dos rios;
- No concreto asfáltico, à medida que se aumenta a temperatura de queima dos agregados sintéticos de argila calcinada, o consumo de ligante asfáltico diminui, em razão das transformações de fase do cristal para a fase amorfa. Este processo provoca densificação do corpo cerâmico, fechando os poros existentes nos agregados;
- Os resultados da relação MR/RT permitiram inferir que as misturas asfálticas confeccionadas com agregados sintéticos de argila calcinada apontam para uma vida de fadiga maior, quando comparadas com a mistura confeccionada com seixo.

CAPÍTULO 6 - SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A título de contribuição, estão elencadas algumas propostas para futuras pesquisas, como também recomendações de uso e exploração dos agregados sintéticos de argila calcinada:

- Considerando que a exploração de jazidas de solo, com a finalidade de produzir agregado sintético de argila calcinada, configura-se como uma atividade impactante ao meio ambiente, faz-se necessário planejamento e licença ambiental que contemple a recuperação das áreas degradadas;
- Para que o processo de exploração das jazidas de solo seja otimizado, conclama-se a comunidade científica regional a promover pesquisas, no sentido de elaborar um banco de dados das jazidas desse estado, com potencial para calcinação;
- Os núcleos de pesquisa das instituições de ensino realizem visitas e palestras junto às olarias locais, esclarecendo da viabilidade técnica e econômica da produção do agregado sintético de argila calcinada, utilizando o mesmo processo produtivo da cerâmica vermelha, com algumas adaptações de conformação da peça cerâmica, com vistas à produção industrial deste agregado;
- Com a finalidade de reduzir o consumo de ligante nas misturas asfálticas, intensifiquem-se as pesquisas na busca de aditivos que possam ser incorporados à matéria-prima de matriz argilosa, com a finalidade de reduzir a porosidade dos agregados sintéticos produzidos, para queima na faixa de temperatura praticada pelas olarias, isto é, entre 850 °C e 950 °C;
- Faz-se necessário encontrar uma nova metodologia de dosagem para as misturas confeccionadas com agregados sintéticos de argila calcinada, vez que não se sabe qual o teor de vazios adequados para este tipo de mistura;

- Adotar, a exemplo de alguns países, a dosagem de misturas pelo seu desempenho, sem a obrigatoriedade de cumprimento de limites estabelecidos para misturas asfálticas confeccionadas com outros materiais;
- E a todos nós, técnicos e engenheiros civis, para que não nos poupemos de envidar esforços, no sentido de viabilizar a execução, nesse estado, de um trecho experimental de revestimento asfáltico, confeccionado com agregado de argila calcinada, avaliando seu desempenho ao longo de um período pré-estabelecido.

REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, J. Caracterização das argilas do município de Campo de Goytacazes para a utilização em cerâmica vermelha. Dissertação de mestrado, UENF. Campo de Goytacazes, Rio de Janeiro, 1997.

AMBIENTE BRASIL. Portal ambiental. Disponível em: < <http://www.ambientebrasil.com.br>>. Acesso em: 06 de outubro de 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rochas e Solos – Terminologia: NBR 6502. Rio de Janeiro, 1993.

BADILLO, E. J; RODRÍGUEZ, A. R. (1992). *Mecánica de suelos*. Tomos I, II e III. Editorial Limusa - México, 3^a.edição.

BATISTA, F. G. S. Caracterização física e mecânica dos agregados de argila calcinada produzidos com solos finos da BR-163/PA. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2004.

BAUER, W.G. *Mechanics, techniques and economics of expanded clay- shale aggregate production. Part I: Pit and Quarry 41*, 1948. Part II: PQ 41, 1948. Part IV: PQ 41, 1949.

BISH, D. L. e REYNOLDS, R. C. *Sample preparation for X-ray diffraction. In: Modern Powder Diffraction. Mineralogical Society of America, Washington, D.C.*, 1989, Cap. 4, p. 73-97. *Reviews in Mineralogy*, v. 20.

BÓ, M. D.; NEVES, W.; AMARAL, S. Substituição do mercúrio por água na determinação da densidade aparente do suporte cerâmico cru. Cerâmica Industrial. Disponível em www.ceramicaindustrial.org.br, capturado em junho de 2004.

BOWLES, J.B. (1984). *Physical and geotechnical properties of soils*. McGraw-Hill Book Co., New York, 2^a. edição.

CABRAL, G. L. L. Metodologia de produção e emprego de agregado de argila calcinada em pavimentação. Dissertação de Mestrado em engenharia de Transportes. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2005.

CAMPELO, N.S; NOGUEIRA, A. C. R; SILVA, J. F. P. Fabricação de agregado sintético de argila calcinada no pólo oleiro do município de Iranduba, para emprego em infra-estrutura viária e da construção civil, no estado do Amazonas. Estudo de viabilidade técnica, ambiental, econômica e comercial – EVTEC. Programa Amazonas de apoio à pesquisa em empresas. PAPPE/FAPEAM/FINEP. Manaus, 2005.

CONLEY, J.E. WILSON, H. e KLINEFELTER, T.A. Production of lightweight concrete aggregates from clays, shales, slates and other material. U.S. Bureau Mines, R.I. 4401, 1948.

CPRM. Carta Geológica do Brasil ao milionésimo: Sistema de Informações Geográficas – SIG e mapa na escala 1: 1.000.000. Brasília: CPRM, 2004. CD-ROM.

CURTIS, C. W. *et al. Fundamental properties of asphalt-aggregate interactions including adhesion and adsorption. SHRP-A-341. Strategic Highway Research Program. National Research Council.* Washington, D.C, 1993.

D'ANTONA, R. J. G; REIS, N. J; ARAÚJO, I. B; MAIA, M. A. M; ROSA, S. F; NAVA, D. B. Projeto Materiais de Construção da Área Manacapuru – Iranduba – Manaus – Careiro (Domínio Baixo Solimões). Manaus: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico: DNIT-ES 031/2006. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Agregado sintético graúdo de argila calcinada: DNER-EM 230/94. Rio de Janeiro, 1994.

-----, Agregados - determinação da abrasão Los Angeles: DNER-ME 035/98. Rio de Janeiro, 1998.

-----, Solos – análise granulométrica: DNER-ME 051/94. Rio de Janeiro, 1994.

-----, Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso: DNER-ME 078/94. Rio de Janeiro, 1994.

-----, Solos – análise granulométrica por peneiramento: DNER-ME 080/94. Rio de Janeiro, 1994.

-----, Solos – determinação do limite de plasticidade: DNER-ME 082/94. Rio de Janeiro, 1994.

-----, Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real: DNER-ME 083/94. Rio de Janeiro, 1994.

-----, Agregados – análise granulométrica: DNER-ME 085/94. Rio de Janeiro, 1994.

-----, Solos – determinação da densidade real: DNER-ME 093/94. Rio de Janeiro, 1994.

-----, Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito: DNER-ME 122/94. Rio de Janeiro, 1994.

-----, Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman: DNER-ME 194/98. Rio de Janeiro, 1998.

-----. Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo: DNER-ME 195/97. Rio de Janeiro, 1997.

-----. Agregado sintético fabricado com argila – desgaste por abrasão: DNER-ME 222/94. Rio de Janeiro, 1994.

-----. Agregado sintético de argila calcinada – determinação da perda de massa após fervura: DNER-ME 225/94. Rio de Janeiro, 1994.

-----. Material de enchimento para misturas betuminosas: DNER-EM 367/97. Rio de Janeiro, 1997.

E C L – Engenharia, Consultoria e Economia S.A. Fábrica protótipo móvel de agregados de argila: Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manaus, 1989.

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

GOUVÊA, P. H. V. A exploração de minerais aplicados à construção civil na região metropolitana de Manaus e alguns aspectos ambientais. Centro de Estudos Superiores para a exploração de minas e pedreiras à céu aberto. Manaus, 2001.

HORBE, A. C. M.; HORBE, M. A; SUGUIO, K. 2003. Origem dos depósitos de areias brancas no nordeste do Amazonas. Ver. Bras. Geoc. 33 (1): 41-50.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. Pesquisa de viabilidade de implantação da fábrica de argila expandida na região amazônica. Relatório final. DNER, Divisão de Pesquisa. Rio de Janeiro, 1981.

LAMBE, T.W. & WHITMAN, R.V. (1990). *Mecânica de suelos*. Editorial Limusa - México, 1ª edição.

LEAHY, R. B e McGENNIS, R. B. (1999) *Asphalt Mixes: Materials, Design and Characterization*. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 68ª, p. 70-127.

LEITE, L. F.; BITTENCOURT, C.P.; BINOTTO, R. Estudo de envelhecimento de ligantes asfálticos por curto e longo prazo. 36ª Reunião Anual de Pavimentação. Curitiba, 2005.

LITTLE, D. N e EPPS, J (2001). *The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt*. *National Lime Association*, 2003.

MÁS, Edgard. A queima. Qualidade e tecnologia em cerâmica vermelha. Criciúma/SC, apostila 4, capítulo 7, p. 7-31.

MEDINA, J. 1997. Mecânica dos Pavimentos: UFRJ. 1 ed. Rio de Janeiro, 1997.

MENEZES, R. R. *et al.* O estado da arte sobre o uso de resíduo como matérias-primas cerâmicas alternativas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2002, v. 6, n.2, p. 303–313.

MIRZA, M. W; WITCZAK, M. W. 1995. *Development of a global aging system for short and long term aging of asphalt cements, proceedings. Association of Asphalt Paving technologists, AAPT*, Vol 64, Vol 74, pag. 393-430.

MOTTA, L. M. G. *et al.* As matérias-primas cerâmicas. Parte II: os minerais industriais e as massas da cerâmica tradicional. *Cerâmica Industrial*, v. 7, n. 1, p. 33/40. Janeiro/Fevereiro de 2002.

MOTTA, L. M. G. *et al.* Princípios do projeto e análise SUPERPAVE de misturas asfálticas. Tradução comentada. Instituto brasileiro do Petróleo, 1996.

NASCIMENTO, R. R. Utilização de agregados de argila calcinada em pavimentação; uma alternativa para o estado do Acre. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

NEVES FILHO, A. S. Avaliação de adição de dopes no comportamento de misturas asfálticas a quente. Dissertação de mestrado. IME, Rio de Janeiro, 2006.

NOGUEIRA, J. B. (2001). *Mecânica dos solos. Ensaio de laboratório*. São Carlos: USP/São Carlos, 2001. 248 p.

NUNES, F. R. G. Caracterização mecânica de misturas asfálticas confeccionadas com agregados sintéticos de argila calcinada quanto à deformação permanente. Dissertação de Mestrado – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, 203 fl. Fortaleza, 2006.

PINILLA, A. Aderência entre betumes asfálticos e agregados pétreos. Conselho Nacional de Pesquisa. IPR, Rio de Janeiro, 1965.

PINTO, S. Materiais pétreos e concreto asfáltico, conceituação e dosagem: Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 1996.

PINTO, S. Materiais pétreos e concreto asfáltico, conceituação e dosagem: Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2003.

PINTO, S. *Pavimentação Rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis*. 2 ed. Rio de Janeiro: copiadora e artes gráficas Ltda. 269 p. Rio de Janeiro, 2002.

REIS, N. J.; FIGUEIREDO, E. S. Projeto Turfa do Médio Amazonas: Relatório de Progresso. Ministério das Minas e Energia: DNPM/CPRM. Manaus, 1983, 69 p.

REIS, N. J. *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas Serviço Geológico do Brasil*. Manaus, 2006.

RILEY, C.M. Relation of chemical properties to the bloating of clay. J. Amer. Cer. Soc., 1951.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, R.E.; LEE, D.; KENNEDY, T.W. *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*. NAPA. Maryland, USA, 1996.

RODRIGUES, A F S *et al.* Projeto Argila: Regularização e levantamento ambiental do setor oleiro nos municípios de Iranduba e Manacapuru. Relatório Final. DNPM – 8º Distrito. Manaus, 2000.

SANTANNA-GRECO, J. A.; FABBRI, G. T. P.; PARREIRA, A. B. 2004. Avaliação da influência de alguns fatores na avaliação do módulo de resiliência de misturas asfálticas densas. 17º Encontro de Asfalto, Anais. Rio de Janeiro, pp. 166-173.

SARKAR, S. L.; AIMIN, X.; JANA, D. 2001. *Scanning elétron microscopy x-ray: microanalysis of concretes*. In: Ramachandran, V.S.; Beaudorn, J.J (eds); *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology – principles, techniques and applications*. New Jersey: Noyes Publications, 231-274p.

SILVA, M. A. V. Comportamento de misturas asfálticas a quente utilizando agregado de argila calcinada. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2006.

SOARES, A. L. C. P; BATISTA, F. G. S.; CABRAL, G. L. L. Estudo da viabilidade técnica do agregado de argila calcinada para a pavimentação da Amazônia. Projeto de fim de curso. Instituto Militar de Engenharia – IME. Rio de Janeiro, 1998.

SOUZA SANTOS, P. e SOUZA SANTOS, H. L. Desenvolvimento de argilas brasileiras para diversos usos tecnológicos. *Cerâmica* 12 (46), 50 (1996).

SOUZA SANTOS, P. *Ciência e Tecnologia de Argilas*, Vol. I, II, III. Ed. Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 1992.

TAYLOR, D. W. (1961). *Fundamentos de la mecánica de suelos*. Compañia Editorial Continental S.A., México.

WOODS, K.B. *Symposium on mineral aggregates*. ASTM Special Publication nº 83, p.1, 1948.

ZETTERSTRON, J.D. e COLE, W.A. *Expansion of clays and shales from North and South Dakota in a rotary-kiln*. U.S. Bureau Mines, R.I. 5202, 1956.

ANEXO

PROJETO DE IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA FIXA DE AGREGADO CALCINADO

Através do Núcleo de Tecnologia de Materiais (NUTEMA) da Universidade Federal do Amazonas, foi desenvolvido um projeto de implantação de uma usina fixa de produção de agregado sintético de argila calcinada. Considerando o melhor aproveitamento dos recursos naturais e o emprego das políticas públicas voltadas ao desenvolvimento econômico do interior do estado, de forma sustentável, dentre elas a política de incentivos fiscais, a proposta de localização da fábrica de agregado sintético de argila calcinada foi no município de Iranduba, que está fora da Zona Franca de Manaus, portanto, goza de incentivos fiscais integrais destinados ao interior do estado (CAMPELO, 2005).

A matriz energética responsável pelo funcionamento da fábrica seria o gás natural, por oferecer uma energia mais limpa e barata, uma vez que o gasoduto que transportará o gás proveniente da província de Urucu até Manaus atravessará aquele município.

A figura 33 demonstra uma comparação de consumo energético entre o gás natural e o óleo diesel, necessários para queimar cerca de 1 kg de minério.

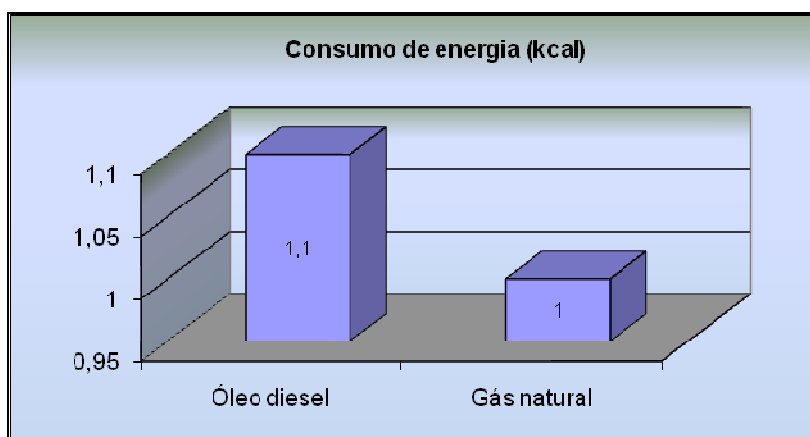


Figura 33 – Consumo de energia para queimar 1 kg de minério
Fonte: COMGÁS

Com efeito, o Sistema de Informação Econômica Energética da América Latina e do Caribe (OLADE – SIEE) apresenta uma comparação dos padrões de emissão de gases em atividades, relacionados ao uso da energia, por tipo de combustível, representado na figura 34.

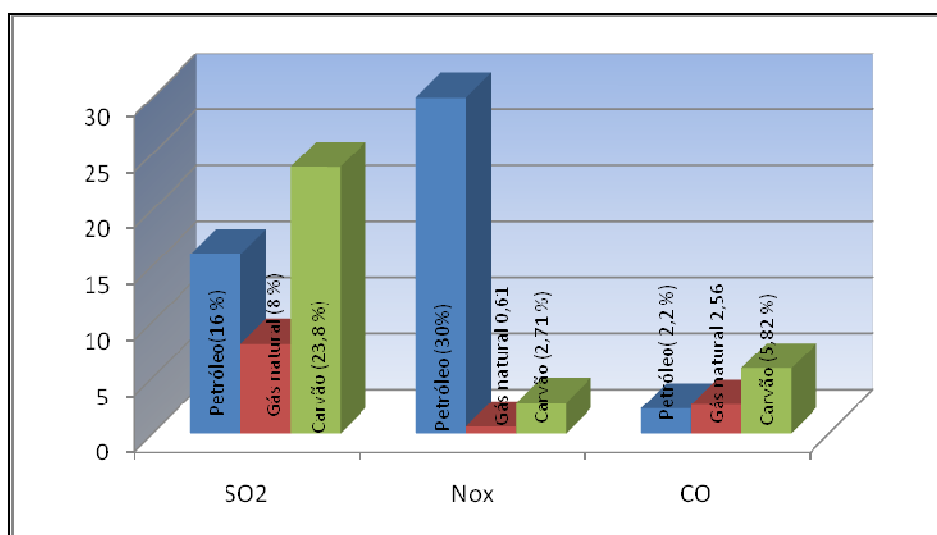


Figura 34 – Emissão de gases em atividades energéticas, por tipo de combustível
Fonte: OLADE-SIEE

Os recursos financeiros necessários para a instalação dessa usina fixa, com capacidade nominal anual de 600.000 m³, são da ordem de R\$ 3.593.390,00 (ano base 2005). O detalhamento das despesas encontra-se na tabela 24 (CAMPELO *et al.*, 2005).

DISCRIMINAÇÃO	VALORES (R\$)
FIXO	2.093.390,00
Terreno	2.400,00
Edificação	420.000,00
Instalações	30.000,00
Máquinas, equipamentos	1.170.990,00
Veículos	55.000,00
Móveis e utensílios	10.000,00
Forno rotativo	400.000,00
Outros	5.000,00
CAPITAL DE GIRO	1.500.000,00
Despesas médias mensais	1.300.000,00
Outros	200.000,00
TOTAL	3.593.390,00

Tabela 25 – Valores, em reais, da instalação da usina fixa, no município de Iranduba

Os custos com a aquisição de bens de capital necessários para a industrialização do agregado sintético de argila calcinada estão apresentados na tabela 25 (CAMPELO *et al.*, 2005).

DISCRIMINAÇÃO	QUANTIDADE	VALOR (R\$)
Destorroador 117DT	01	136.442,00
Alimentador 027P	01	76.952,00
Desintegrador 125	01	66.365,00
Homogeneizador 303	01	278.243,00
Laminador 084FD	01	130.214,00
Misturador 044D	01	84.702,00
Extrusora monobloco	01	290.388,00
Esteiras	01	107.684,00
Veículos	01	55.000,00
Forno rotativo	01	400.000,00
TOTAL		1.625.990,00

Tabela 26 – Bens de capital necessários à produção de agregado sintético

Campelo *et al.* (2005) consideraram o custo de fabricação do agregado sintético de argila calcinada 40 % menor que o preço de mercado da brita em Manaus, conduzindo a um valor

médio do agregado calcinado em torno de R\$ 45,00/m³ (ano base 2005). Com isso, o faturamento anual esperado para a fabricação desse agregado é da ordem de R\$ 27.000.000,00, como demonstrado na tabela 26.

DISCRIMINAÇÃO	QUANTIDADE	UNIDADE	PREÇO UNITÁRIO	FATURAMENTO
	ANUAL		PROPOSTO (R\$)	ANUAL (R\$)
Argila calcinada	600.000	m ³	45,00	27.000.000,00
TOTAL				27.000.000,00

Tabela 27 – Volume bruto da produção de agregado sintético e faturamento anual

Contudo, para que a usina fixa no município de Iranduba produza anualmente os 600.000 m³ de agregado calcinado previstos são necessários R\$ 2.222.838,00 (ano base 2005), de acordo com a tabela 27.

RUBRICA	VALOR (R\$)
Mão de obra	39.000,00
Encargos sociais	25.740,00
Benefícios	6.000,00
Materiais (insumos)	120.000,00
Combustíveis e lubrificantes	12.000,00
Energia (força e luz)	360.000,00
Água	24.000,00
Tributos (hipótese do benefício de 100%)	-
Telefone	6.000,00
Depreciação	145.409,00
Seguro	20.021,00
Manutenção	85.100,00
COFINS (3% sobre a receita)	810.000,00
PIS (1,65% sobre a receita)	445.000,00
CPMF (0,38% sobre a receita)	102.600,00
Eventuais (1% sobre os custos)	21.468,00
TOTAL	2.222.838,00

Tabela 28 – Custos totais de produção do agregado sintético

Portanto, o **rédito financeiro** do empreendimento seria de R\$ 24.777.162,00, como demonstrado na tabela 28.

DISCRIMINAÇÃO	VALOR (R\$)
Faturamento anual (1)	27.000.000,00
Custo total (2)	2.222.838,00
Rédito financeiro (1) – (2)	24.777.162,00

Tabela 29 – Demonstrativo do **rédito financeiro** (ano base 2005)