

# ARGILAS CALCINADAS PARA USO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

CALCINED CLAYS FOR USE IN HIGHWAY PAVEMENTS

HELENA POLIVANOV

*Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
E-mail: hpolivanov@gmail.com*

LAURA MARIA GORETTI DA MOTTA

*Coordenação de Programas de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
E-mail: laura@coc.ufrj.br*

FILIPE DE BRITO FRATTE MODESTO

*CPRM – Serviço Geológico do Brasil  
Fortaleza, CE, Brasil  
E-mail: filipe.modesto@cprm.gov.br*

EMILIO VELLOSO BARROSO

*Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
E-mail: emilio@geologia.ufrj.br*

## RESUMO ABSTRACT

Em função de suas características geológicas, a disponibilidade de agregados na região norte do Brasil é reduzida para fins da pavimentação rodoviária, em particular, e para a construção civil de um modo geral. Embora frequente na região, a produção de agregados a partir de seixos rolados em ambiente fluvial traz importantes impactos ambientais negativos. Uma possível alternativa aos agregados naturais é a produção de argilas calcinadas, um agregado artificial obtido a partir da queima de solos argilosos. Neste artigo são apresentados os resultados iniciais de uma pesquisa que visa investigar as características tecnológicas de agregados artificiais produzidos a partir da queima de Latossolos, uma classe de solo bastante comum na região. A metodologia da pesquisa envolveu a caracterização física e mineralógica dos solos e das misturas de solos, bem como a propriedades físicas e mecânicas

As a result of its geological framework, the availability of natural aggregates is low in the northern region of Brazil for pavement purposes and for civil construction in general. Although common, the production of pebbles from fluvial environment has huge adverse impacts. The aggregate of calcined clay is a possible alternative for the replacement of natural aggregate. In this paper we present the preliminary results of a research whose main goal was to check the technological characteristics of calcined clay aggregates produced from burning of oxisols and from their mixtures with other soils. The methodology included the physical and mineralogical characterization of soils and their mixtures, as well as physical and mechanical properties of different calcined clay aggregates. The obtained data point out that the coarse aggregates produced did not have adequate properties for its application on asphalt

dos agregados artificiais. Os estudos demonstraram que os agregados graúdos produzidos não apresentaram resultados satisfatórios para uso em pavimentação asfáltica, no entanto apresentaram características adequadas para serem usados como base e sub-base da estrutura de pavimento.

**Palavras-chave:** Agregado de argila calcinada; propriedades físicas e mecânicas; pavimento asfáltico

## 1 INTRODUÇÃO

Em virtude do seu contexto geológico, há escassez de jazidas de rochas para o fornecimento de britas naturais em grande parte da região amazônica. As rochas sedimentares presentes na região normalmente estão intensamente intemperizadas e originam produtos porosos e de baixa resistência que representam agregados de baixa qualidade tecnológica (da Silva et al. 2009). Este fato tem como consequência a necessidade de transporte deste insumo para o local da construção, muitas vezes por grandes distâncias, o que impacta fortemente o preço da brita e torna mais caras as obras de pavimentação rodoviária. Segundo Campos (2008) os custos com transporte respondem por cerca de 50 % do preço final do produto, elevando fortemente os custos de pavimentação, cujo consumo de agregados corresponde a aproximadamente 60 % do volume total do concreto asfáltico.

Uma alternativa econômica para a substituição dos agregados originados de pedreiras é a utilização de seixos rolados, extraídos dos leitos dos rios. No Estado do Amazonas, por exemplo, a totalidade dos seixos produzidos tem origem nos leitos ativos dos rios e são extraídos em operações de dragagem. A intensa extração e utilização desse bem mineral são justificadas pela grande demanda nas sedes municipais, que inclui Manaus, onde o mesmo é empregado na concretagem, no setor da construção civil (CPRM 2006). Uma desvantagem importante do aproveitamento dos seixos são os impactos ambientais provocados pela extração deste tipo de agregado, os quais frequentemente inviabilizam sua produção comercial.

Uma alternativa para as rochas britadas e para os seixos de rios são os agregados sintéticos de argila calcinada (ASAC), fabricados pela queima de argila a partir de 760°C, e os agregados de

pavements, but they probably could be used in the layers that comprise the whole underlying structure of pavement.

**Keywords:** Calcined clay aggregate; physical and mechanical properties; asphalt pavement

argila expandida, que normalmente são produzidos em temperaturas superiores a 1.110°C. Em função da temperatura de queima mais baixa para sua fabricação, as argilas calcinadas são econômicas para a utilização em misturas asfálticas destinadas aos pavimentos.

Os primeiros estudos com as argilas calcinadas foram realizados nos Estados Unidos da América nas décadas de 1950 e 1960. Exemplos de instituições americanas pioneiras na área de pavimentação são o *Texas Highway Department* e o *Louisiana Department of Highway*. Dentre outros resultados, a experiência do Estado do Texas mostra que as argilas levadas às temperaturas superiores a 760°C fornecem agregados estáveis e mais adequados para a utilização em condições mais econômicas do que o agregado sintético de argila expandida (Cabral 2005).

As pesquisas sobre a utilização de agregados de argilas para aplicação em pavimentos rodoviários teve início no Brasil no final da década de 1970 com as investigações do Instituto de Pesquisas Rodoviárias, do antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (IPR/DNER). Esta pesquisa pioneira tratava da coleta de solos da região norte do Brasil, de análises sobre a demanda de agregados, da viabilidade da produção e do emprego de agregados de argilas expandidas na região norte. Os resultados alcançados à época apontavam para os elevados custos de produção deste tipo de agregado, o que inviabilizava sua adoção corrente nos projetos de estradas na região norte do Brasil (DNER, 1981). Com relação aos estudos sobre agregado artificial de argila calcinada no Brasil, também foi pioneiro o IPR/DNER no início dos anos de 1980.

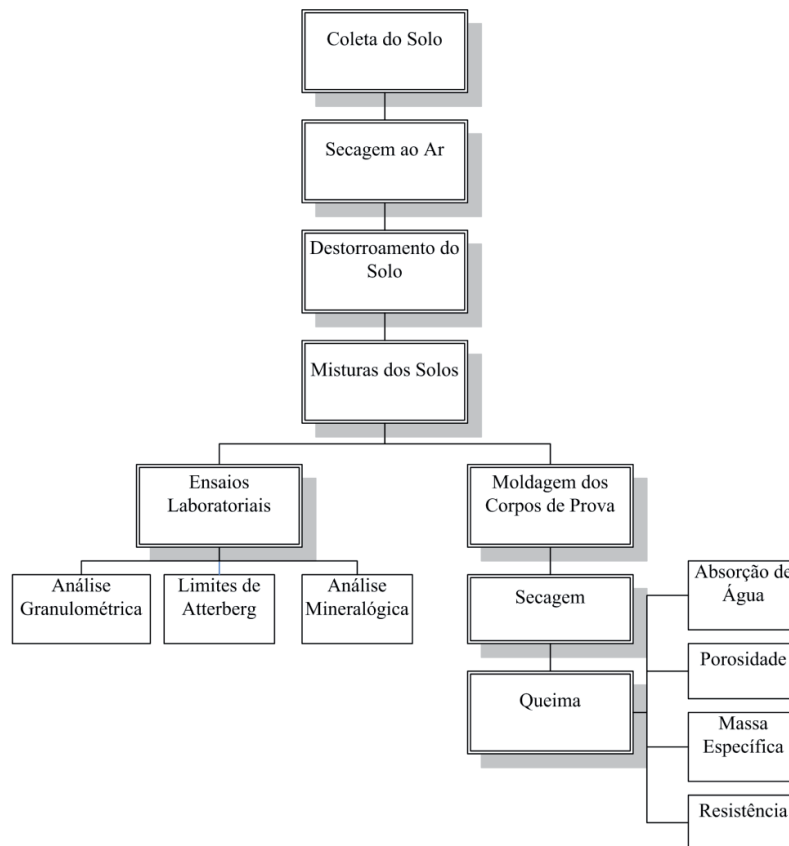
O presente artigo tem como objetivo analisar as propriedades e o comportamento físico do material obtido pelo processo da queima de solos

argilosos para fins de pavimentação, especialmente os latossolos por se constituírem em uma unidade pedológica bastante comum na região amazônica. Os parâmetros que serão investigados e comparados com valores já existentes na literatura são a porosidade aparente, a absorção de água, a massa específica aparente e a resistência à compressão. Tendo em vista que os materiais calcinados produzidos pela queima serão utilizados como substituintes aos agregados pétreos na pavimentação, torna-se necessário que tenham propriedades físicas e resistências adequadas. Destaca-se a importância da obtenção de baixos valores de porosidade e de absorção no material produzido visando obter materiais com resistência mecânica adequada para suportar os carregamentos gerados pelo peso dos

veículos durante a operação da via. Considera-se que a baixa disponibilidade de agregados na região amazônica e as implicações ambientais negativas ligadas à produção de seixos em leitos de rios, conforme já discutido anteriormente, sejam justificativas relevantes para a pesquisa que foi desenvolvida e cujos resultados parciais são apresentados neste artigo.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas da metodologia empregada na pesquisa podem ser evidenciadas no fluxograma da figura 1, o qual fornece ao leitor uma visão geral das etapas de trabalho. Estas etapas também estão descritas em detalhe nos parágrafos subsequentes.



**Figura 1** – Fluxograma que ilustra o método de estudo empregado e o encadeamento de suas diversas etapas.

### 2.1 Coleta dos Solos

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram obtidos nas regiões do Pará e do Rio de Janeiro. Foram utilizados inicialmente solos lateríticos,

pois estes são os materiais representativos da região amazônica. Trabalhou-se inicialmente com solos do Pará para os estudos iniciais e por dificuldade de acesso a esta região e necessidade contínua de material para a pesquisa, optou-se por

trabalhar também com latossolos e outros solos da região metropolitana do Rio de Janeiro, pois se trata de pesquisa desenvolvida na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Todos os solos foram utilizados “*in natura*”.

Ao todo foram selecionados quatro perfis de solos. O primeiro, um latossolo proveniente de Carajás (PA), doravante denominado LPA. O segundo, um latossolo localizado em Duque de Caxias (RJ), denominado LCA, do qual foram obtidas amostras deformadas do horizonte B. Com o objetivo de inserir materiais fundentes (particularmente  $K_2O$ ) e melhorar o desempenho na queima, coletou-se no bairro de Jacarepaguá, cidade do Rio de Janeiro, um solo residual jovem (SRJ) proveniente da alteração de biotita gnaisse. A presença marcante de mica neste material, observada em campo, é fonte de potássio, que exerce uma função fundente permitindo a melhora da qualidade do material calcinado, pois favorece a densificação, com a formação de uma fase líquida. O quarto solo tinha o propósito de funcionar como material ligante, razão pela qual se coletou um gleissolo (GLE) de alta plasticidade localizado no bairro de Santa Cruz, também no município do Rio de Janeiro.

## 2.2 Misturas dos Solos

Depois das coletas, os solos foram secos ao ar, destorroados e misturados em diferentes proporções em massa para constituir três diferentes conjuntos de misturas. O primeiro conjunto foi representado pela mistura LCA-SRJ nas seguintes proporções: 100% LCA; 80% LCA : 20% SRJ; 60% LCA:40% SRJ; 40% LCA : 60% SRJ. O segundo conjunto, dado pela mistura de LCA-GLE, tinha as seguintes proporções: 50% LCA : 50% GLE e 100% GLE. Finalmente, no terceiro conjunto de misturas, entre LPA-GLE, optou-se pelas seguintes proporções: 100% LPA; 60% LPA : 40% GLE; 50% LPA : 50% GLE e 40% LPA : 60% GLE.

Os solos foram homogêneos manualmente, conforme a figura 2, e as misturas 80% latossolo Caxias : 20% solo residual Jovem; 60% latossolo Caxias : 40% solo residual jovem; 40% latossolo Caxias : 60% solo residual jovem foram homogêneas num moinho de bolas (Pavite) com 30 rpm durante 2 minutos.



**Figura 2** - Mistura manual dos solos. Nesta foto mistura de 50%LPA : 50%GLE.

## 2.3 Ensaios Laboratoriais nos Solos

Depois de homogêneas, as amostras foram caracterizadas quanto aos seus índices físicos (granulometria e limites de Atterberg) e à mineralogia das argilas por difração de raios-X (DRX).

### 2.3.1 Granulometria

A determinação granulométrica dos solos e das misturas foi realizada de acordo com a norma NBR-7181 (ABNT 1984a). Esta norma prescreve o método para análise granulométrica de solos, realizada por peneiramento ou por combinação de sedimentação e peneiramento.

### 2.3.2 Limites de Atterberg

Os teores de umidade limites entre os estados de consistência são chamados de limites de consistência ou de Atterberg. A determinação do limite de liquidez (LL) foi executada segundo Norma NBR-6459 (ABNT 1984b), o qual representa o teor de umidade limite entre os estados plástico e líquido do solo. O limite de plasticidade (LP) foi determinado de acordo com a norma NBR-7180 (ABNT 1984c), o qual representa o teor de umidade limite entre os estados semi-sólido e plástico.



### 2.3.3 Análise mineralógica

A mineralogia da fração argila dos solos e das misturas foi determinada pelo método da difração de raios X. Para a retirada da fração argila adotou-se o método de Claessen (1997). Depois de realizada a separação da fração argila, as laminas foram confeccionadas de forma orientada pelo método do esfregaço (Theisen & Harvard 1962). Após este procedimento, os materiais foram levados ao difratômetro Rigaku - Termoflex que operou na velocidade de 1°/min, voltagem de 40kV e corrente de 30mA. Em seguida as laminas foram submetidas a uma atmosfera saturada de etilenoglicol por 4 horas para determinar os minerais expansivos. Depois as lâminas foram aquecidas a temperaturas de 500°C na mufla Quimis para a identificação de argilominerais cujas estruturas são suscetíveis ao colapso quando aquecidas.

### 2.4 Moldagem e Queima dos Corpos de Prova

Depois de realizada a caracterização física, as amostras foram preparadas para o processo de obtenção de agregados a partir da queima das misturas e dos solos puros. Os solos primeiramente foram umedecidos com umidade correspondente à metade do LL mais 2% de água ( $h=LL/2 + 2\%$ ), teor de umidade sugerido por Alexandre (1997) para produção de cerâmica vermelha. Já umedecidas, as amostras 100% LCA; 80% LCA : 20% SRJ e 60% LCA : 40% SRJ, foram moldadas em extrusoras a vácuo (Figura 3). Já as demais amostras (50% LCA : 50% GLE; 100% LPA; 60% LPA : 40% GLE; 50% LPA : 50% GLE; 40% LPA : 60% GLE e 100% GLE) foram moldadas manualmente em fôrmas de madeira com dimensões de 2,5 cm de altura por 3,0 cm de largura (Figura 4). A moldagem na extrusora faz com que o material fique mais compactado, porem não foi possível utilizar este método para todas as amostras. A mistura 40% LCA : 60% SRJ não foi moldada devido ao elevado teor de fração areia.

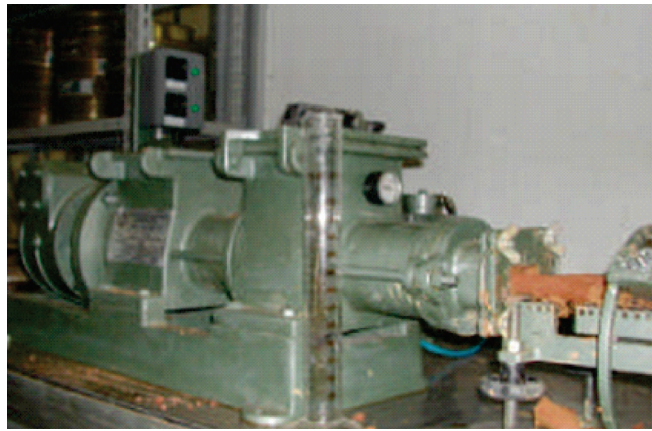


Figura 3 - Extrusora a vácuo empregada nesta pesquisa.

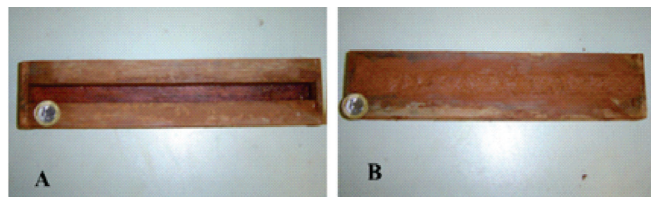


Figura 4 - Imagem representativa do molde, sem solo (a) e com solo o Latossolo do Pará (b).

As amostras foram queimadas em forno tipo mufla Quimis a 1000 °C. Na sequência da figura 6 podem ser observadas todas as etapas do processo de obtenção dos corpos de prova. Esta temperatura foi estipulada, pois as principais transformações necessárias para corpos cerâmicos ocorrem até esse valor de temperatura, de acordo com estudos realizados pela Divisão de Engenharia Mecânica do IPT-SP (Nascimento, 2005), conforme a tabela 1.

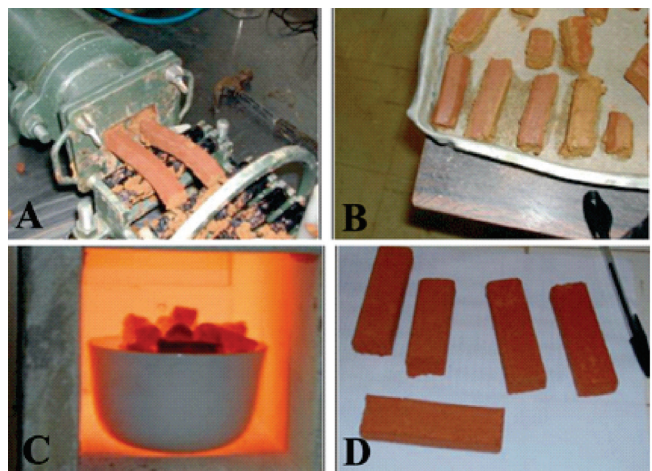


Figura 5 - Etapas de preparação dos corpos de prova dos solos e das misturas: na extrusora (a); corpos de provas recém-moldados e ainda úmidos (b); em processo de queima na temperatura de 1000 °C (c) e após a preparação (d).

**Tabela 1** – Principais transformações em corpos-de-prova cerâmicos até a temperatura de 1000°C de acordo com estudos realizados pela Divisão de Engenharia Mecânica do IPT-SP (Nascimento 2005)

Temperatura de Queima (°C)	Reações Minerais
200	Eliminação da água livre e a eliminação da água proveniente de matéria orgânica
350 - 650	A gibbsita perde a água de constituição. Ocorre a combustão de substâncias orgânicas contidas na argila e a dissociação de compostos sulfurosos
450 - 650	Decomposição das argilas, com liberação sob a forma de vapor, da água de constituição (quimicamente combinada ao argilomineral). Nesta mesma faixa de temperatura a illita perde a água estrutural.
570	Rápida transformação do quartzo de sua forma cristalina alfa para beta, acompanhada de uma violenta expansão durante o aquecimento, e de beta para alfa durante o resfriamento, acompanhado de fortes contrações;
580	Ocorre a desidroxilação da caulinita
700	Iniciam-se reações químicas da sílica e da alumina com elementos fundentes, formando sílico-aluminatos complexos que dão à massa cerâmica característica como dureza, estabilidade e resistência mecânica. Atinge-se assim o início da sinterização.
800 - 950	Os carbonatos se decompõem e liberam CO <sub>2</sub> .
980	Nucleação da mulita
1000	Os sílico-aluminatos que estão na forma vítrea começam a amolecer, dando ao corpo maior dureza, compacidade e impermeabilidade.

## 2.5 Índices Físicos dos Materiais Calcinados

Os ensaios para a determinação da porosidade aparente, absorção de água e massa específica aparente seca foram realizados de acordo com a norma da NBR-6220 (ABNT 2011). Este ensaio consiste basicamente na obtenção da massa seca, massa saturada e a massa imersa dos corpos de prova, os valores de porosidade aparente, absorção de água e massa específica foram obtidos através das equações:

$$P_a = \left( \frac{M_{SAT} - M_S}{M_{SAT} - M_{SUB}} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

$$A = \frac{(M_{SAT} - M_S)}{M_S} \cdot 100 \quad (2)$$

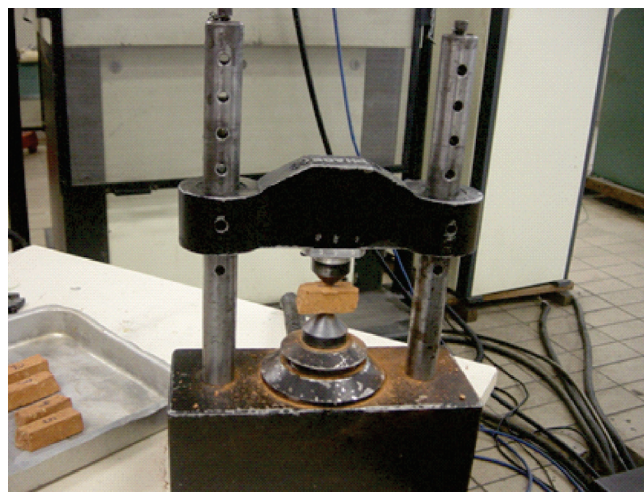
$$MEAS = \frac{M_S}{V_A} \quad (3)$$

$$V_A = \frac{(M_{SAT} - M_{SUB})}{ME_A} \quad (4)$$

onde **Pa** é a porosidade aparente; **A** é o índice de absorção; **Ms** é a massa seca; **M<sub>SAT</sub>** é a massa saturada; **M<sub>SUB</sub>** é a massa submersa; **MEAS** é a massa específica aparente seca; **ME<sub>A</sub>** é a massa específica da água e **VA** é o volume aparente do corpo-de-prova.

## 2.6 Resistência à Compressão Puntiforme dos Materiais Calcinados

O ensaio de Resistência à Compressão Puntiforme foi realizado de acordo com método proposto pela ISRM (1985) e desenvolvido por Broch & Franklin (1972). No ensaio, o corpo de prova é carregado pontualmente através de dois cones metálicos com o auxílio de um macaco hidráulico (figura 6). A ruptura é provocada pelo desenvolvimento de fraturas de tração paralelas ao eixo de carregamento.



**Figura 6** – Quadro de reação e carregamento puntiforme em corpo de prova cerâmico.

A resistência à compressão puntiforme, padronizada para corpos de prova de 50mm de

diâmetro ( $IS_{50}$ ), pode ser correlacionada à compressão uniaxial (ISRM 1985). Para se obter este valor é necessário calcular o valor do índice de resistência à compressão puntiforme (IS) e multiplicar por um fator de correção (FC), que é função da relação entre o diâmetro da amostra e o diâmetro padronizado (50 mm).

$$IS_{50} = IS \times FC \quad (5)$$

O ensaio consiste na aplicação de compressão pontual por dois cones metálicos no corpo de prova até a sua ruptura. O manômetro registra a pressão em que o corpo de prova rompe. A leitura manométrica não fornece a carga diretamente, ou seja, faz-se necessária uma curva de calibração

entre a pressão manométrica lida e a força aplicada na amostra.

O manômetro foi calibrado em dois ciclos de pressão ascendente (compressão) e descendente (descompressão). A curva de calibração é dada pela pressão que é lida diretamente no manômetro ( $Kgf/cm^2$ ) pela força (KN) medida pela célula de carga acoplada ao equipamento para a realização da calibração

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Granulometria

Na tabela 2 são apresentados os resultados da distribuição do tamanho de partículas para os solos e para as misturas.

**Tabela 2** – Distribuição das frações granulométricas nos solos (LPA, LCA, SRJ e GLE) e suas misturas.

Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Média (%)	Areia Grossa (%)	Pedregulho (%)	$\Sigma$ areia (%)
100% LCA	59,0	4,0	13,0	21,0	2,0	0	36,0
80%LCA X 20% SRJ	46,0	11,1	7,4	17,0	18,5	0	42,9
60%LCA X 40% SRJ	29,4	7,7	10,7	25,3	24,8	2,1	60,8
40% LCA X 60% SRJ	24,4	8,5	11,0	25,2	27,9	3	64,1
50% LCA X 50% GLE	61,0	19,0	8,0	12,0	0	0	20,0
100 % LPA	44,0	26,0	24,0	4,0	2,0	0	30,0
60% LPA X 40% GLE	66,0	27,0	4,0	2,0	1,0	0	7,0
50% LPA X 50% GLE	72,0	17,0	9,0	2,0	0	0	11,0
40% LPA X 60% GLE	69,0	26,0	3,0	2,0	0	0	5,0
100%GLE	70,0	18,0	9,0	3,0	0	0	12,0

É possível notar que há preponderância da fração fina (areia + silte) nos solos que dão origem às misturas preparadas nesta pesquisa: 61% no LCA; 70% no LPA e 88% no GLE. A participação da fração areia nos latossolos é de 36% no LCA e de 30% no LPA, sendo de apenas 12% no GLE.

Com base nos dados de distribuição granulométrica, três intervalos foram recalculados para 100%, a saber: a fração menor do que  $2\mu m$ ; a fração entre  $2\mu m$  e  $20\mu m$  e a fração maior do que  $20\mu m$ . Estes dados são apresentados na tabela 3 e locados no diagrama de Winkler (Figura 7).

**Tabela 3** - Valores em micrometro referentes à granulometria dos solos e suas misturas.

Amostra	< $2\mu m$	$2\mu m - 20\mu m$	> $20\mu m$
100% LCA	59	8	32
80%LCA : 20% SRJ	46	8	46
60%LCA : 40% SRJ	29	6	65
40%LCA : 60% SRJ	24	4	72
50%LCA : 50%GLE	61	14	25
100 % LPA	44	10	46
60%LPA : 40%GLE	66	17	17
50%LPA : 50%GLE	72	13	15
40%LPA : 60%GLE	69	19	11
100%GLE	70	16	14



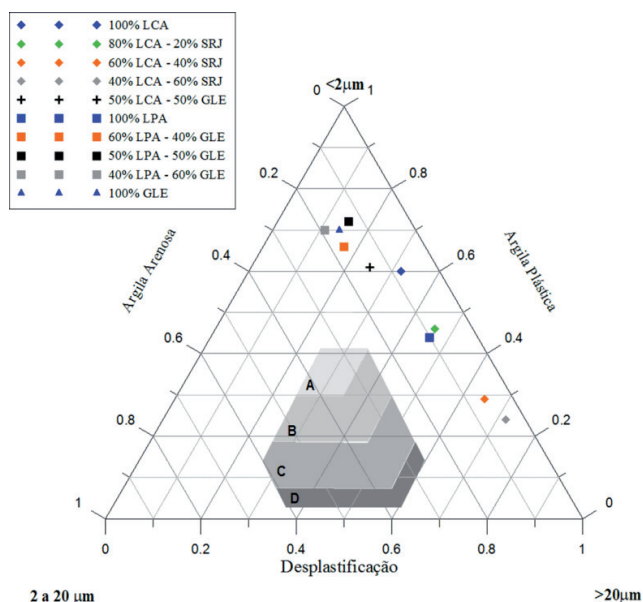


Figura 7 - Diagrama de Winkler com as posições dos solos e diferentes misturas.

Pode-se observar na figura 8 que existem dois grupos bem distintos: o primeiro com uma granulometria rica na fração menor que  $2\mu m$  e o segundo com granulometria preferencialmente maior que  $20\mu m$ . Os dois grupos não possuem solos ou misturas com intervalos de composição granulométrica localizados no campo B do diagrama.

O diagrama de Winkler (Pracidelli & Melchhiades 1997) que é um diagrama triangular, onde cada vértice é representado por frações granulométricas: menor do que  $2\mu m$ , entre 2 e  $20\mu m$  e maior do que  $20\mu m$ . Os quatro campos do diagrama (A, B, C, e D) representam intervalos de composições granulométricas mais apropriadas de uso para o solo na indústria cerâmica. A área B é a mais indicada para a produção de agregado de argila calcinada seguida das regiões A, C e D, respectivamente (Cabral, 2005). As argilas e/ou misturas que são localizadas no campo A podem produzir agregados de argilas calcinadas de boa qualidade, mas é exigido um maior controle da produção, principalmente com a temperatura de queima. Aquelas localizadas na área B, a mais indicada, são encontradas com maior facilidade e seu manuseio é mais fácil, usado para produção de telhas. As regiões C e D também podem produzir agregados calcinados, porém é necessário que a queima ocorra em temperaturas maiores, o que eleva o custo da produção.

### 3.2 Limites de Atterberg

Os resultados para os limites de Atterberg, tanto dos solos quanto das misturas, estão apresentados na tabela 4. Segundo Cabral (2005), as amostras que possuem o índice de plasticidade (IP) superior a 15% são consideradas satisfatórias para uso como argila calcinada. Os resultados encontrados foram satisfatórios para uso como argila calcinada, de acordo com os valores do índice de plasticidade, com exceção das amostras 100% LPA e 60% LPA : 40% GLE.

Tabela 4 - Resultados de limite de Atterberg para os solos e misturas.

Amostras	LL	LP	IP
100% LCA	91,5	43,3	48,2
80% LCA : 20% SRJ	68,9	29,6	39,4
60% LCA : 40% SRJ	46,7	24,5	22,2
40% LCA : 60% SRJ	42,4	21,2	20,7
50% LCA : 50% GLE	76,0	47,4	28,6
100% LPA	54,0	45,4	8,5
60% LPA : 40% GLE	66,0	55,1	10,9
50% LPA : 50% GLE	66,0	44,3	21,7
40% LPA : 60% GLE	67,0	40,0	27,0
100% GLE	72,0	42,7	29,3

### 3.3 Mineralogia

A tabela 5 traz os resultados da análise mineralógica da fração argila, realizada por difração de raios-X. A presença da ilita em algumas misturas é um fato positivo, pois se trata de um argilomineral com característica sinterizante. Isto gera uma maior coesão das partículas, aumentando a resistência dos corpos-de-prova submetidos à queima e diminuindo o volume de vazios e, conseqüentemente, a porosidade aparente e a absorção de água.



**Tabela 5** – Mineralogia da fração argila dos solos e suas misturas.

Amostras	Argilominerais
100% LCA	Caulinita, Gibbsita, Goethita
80%LCA : 20% SRJ	Caulinita, Gibbsita, Goethita
60%LCA : 40% SRJ	Caulinita, Gibbsita, Goethita
40%LCA : 60% SRJ	Caulinita, Gibbsita, Goethita
50%LCA : 50%GLE	Caulinita, Ilita
100 % LPA	Caulinita, goethita, gibbsita
60%LPA : 40%GLE	Caulinita, Ilita, Esmectita
50%LPA : 50%GLE	Caulinita, Ilita, Esmectita
40%LPA : 60%GLE	Caulinita, Ilita, Esmectita
100%GLE	Caulinita, Ilita, Esmectita
100% SRJ	Caulinita, Ilita

### 3.4 Absorção de Água, Porosidade Aparente, Massa Específica Aparente Seca e Resistência à Compressão Pontual $IS_{(50)}$

Na tabela 6 são apresentados os valores médios dos índices físicos obtidos nos corpos-de-prova após a queima, bem como os resultados (médias) de resistência à compressão pontual. Os resultados de índice de plasticidade (IP) são repetidos nesta tabela para auxiliar as discussões apresentadas a seguir. Os dados estão organizados em ordem crescente da resistência.

**Tabela 6** – Valores médios de porosidade aparente, absorção de água, massa específica aparente seca, resistência à compressão pontual e resistência a compressão simples e índice de plasticidade.

Solo/Mistura	Porosidade média (%)	Absorção média (%)	Massa específica seca média ( $g/cm^3$ )	$IS_{(50)}$ médio (MPa)	RCS (MPa)	IP (%)
100% LCA	46,0	33,2	1,39	0,11	2,4	48,2
80%LCA : 20% SRJ	32,6	19,4	1,68	0,15	3,3	39,4
60%LCA : 40% SRJ	39,7	25,5	1,55	0,20	4,4	22,2
100 % LPA	50,1	32,9	1,53	0,45	9,9	8,5
50%LCA : 50%GLE	39,5	24,9	1,58	0,94	20,7	28,6
50%LPA : 50%GLE	31,8	16,7	1,89	1,06	23,3	21,7
40%LPA : 60%GLE	41,8	25,8	1,64	1,60	35,2	27,0
60%LPA : 40%GLE	36,3	19,9	1,85	1,73	38,1	10,9
100%GLE	23,0	12,6	1,85	1,54	33,9	29,3

Com relação às porosidades e às absorções, o gleissolo puro (100%GLE) foi aquele que apresentou os menores valores de ambos os parâmetros: 22,7% para a porosidade e 12,5 % para a absorção. Cabral (2005;2011) cita o valor de 18% de absorção como valor satisfatório para agregado de argila calcinada para uso em pavimentação. Observa-se que a mistura 50%LPA : 50%GLE apresentou o valor de 16,8% para a absorção, também dentro do limite mencionado. As misturas 80% LCA : 20%SRJ e 60%LPA : 40% GLE, apresentam valores de 19,4 e 19,9% de absorção, respectivamente, próximos dos limites citados. Observa-se também que os valores de porosidade diminuem com a adição de materiais com ilita na sua composição. Esse resultado pode estar relacionado com presença de fundentes na composição da ilita.

Esses dados são concordantes com o trabalho de Vieira (2004) que conclui que a adição de argilas ílíticas em materiais cerâmicos contribui para a redução da porosidade e melhora das suas características tecnológicas. As demais amostras de solos e suas misturas apresentaram valores bastante afastados do limite mencionado por Cabral (2005).

Pode-se destacar também a redução da porosidade aparente e da absorção de água e o resultante aumento da massa específica aparente seca. Embora este fato seja esperado, considera-se que ele serve para atestar a qualidade dos dados medidos nos corpos de prova após a queima.

Na tabela 6 estão ainda as médias calculadas a partir dos dados dos ensaios de compressão pontual. Os valores de resistência à compressão simples (RCS) foram calculados a partir da

conhecida relação entre esta propriedade e a resistência à compressão pontual, que varia na faixa de 20 a 25 vezes (ISRM,1985), tendo-se adotado a seguinte relação:

$$RCS = 22 \times IS_{(50)} \quad (6)$$

O gráfico da figura 9 representa as resistências à compressão pontual para cada solo e suas diferentes misturas. A análise da tabela 6 e do gráfico da figura 8 permite observar que a mistura em que se obteve o melhor resultado de resistência foi a de 60% latossolo do Pará (LPA) com 40% de gleissolo (GLE) ( $IS_{(50)} = 1,74\text{MPa}$ ). Verifica-se também que os materiais provenientes das misturas com o latossolo do Pará (LPA) e os gleissolos (GLE) apresentaram os melhores resultados na compressão puntiforme entre os materiais analisados. Os corpos de prova confeccionados com as misturas que contêm o latossolo de Caxias (LCA), com o solo residual (SRJ), apresentaram uma leve tendência de melhora do  $IS_{(50)}$  com o aumento da proporção de solo residual na mistura. Constatase também que a adição de gleissolo (GLE) melhora a qualidade dos corpos de prova obtidos dos latossolos, tanto do Pará (LPA) quanto de Caxias (LCA). Estas melhoras ocorrem devido à presença de ilita presente no gleissolo estudado.

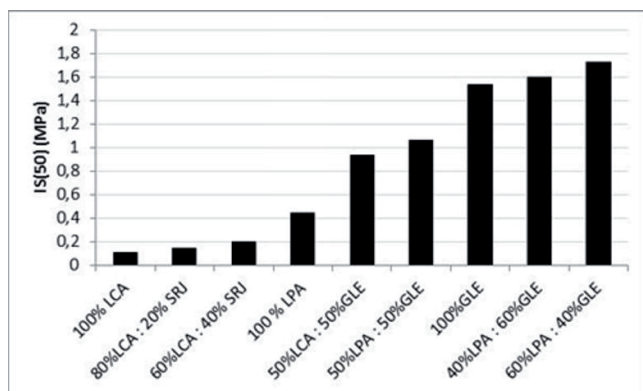


Figura 8 - Representação dos valores médios de  $IS_{(50)}$  por classe de solo e por mistura.

Com relação às resistências alcançadas pelos agregados de argila calcinada produzidos nesta pesquisa, em comparação à classificação da resistência de rochas proposta pela ISRM (1978), estas poderiam ser classificadas como rochas brandas, com exceção de duas misturas (40%LPA : 60%GLE

e 60%LPA : 40%GLE) e do agregado produzido a partir do gleissolo (100% GLE), os quais se enquadram na classe de rochas medianamente resistentes ( $25 < RCS < 50$ ). Ainda a título de comparação com resistências de rochas, a tabela 7 apresenta valores obtidos por Marques et al. (2010) para diferentes gnaisses da cidade do Rio de Janeiro, segundo seus estágios de alteração. Na tabela 7 as rochas de classe I são as menos alteradas, enquanto as rochas designadas como classe IV são muito alteradas. A figura 9 ilustra corpos de prova de argila antes e após a ruptura no ensaio de compressão pontual.

Tabela 7 - Valores de resistência à compressão pontual (em MPa) de gnaisses da Cidade do Rio de Janeiro (Marques et al. 2010).

Classes de Alteração	Tipo de Gnaisse	
	Lepetinito	Facoidal
I	2,56 - 1,68	2,49 - 2,46
II	1,89 - 1,18	1,68 - 1,05
III	0,56 - 0,48	1,06 - 1,67
IV	N.D.	0,24

N.D. Sem dados experimentais disponíveis.

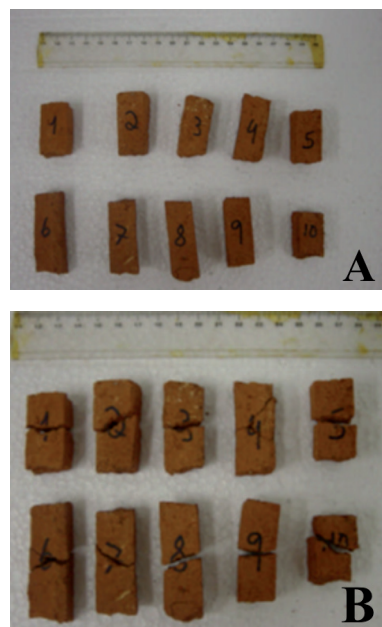
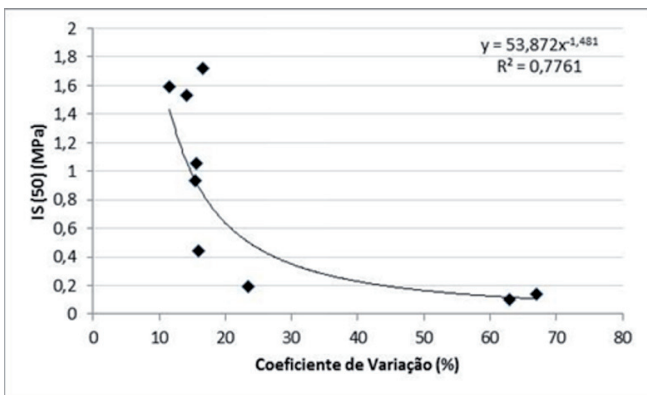


Figura 9 - Imagens de corpos-de-prova antes (a) e após (b) a ruptura.

Na tabela 8 são apresentados os dados completos dos ensaios de resistência à compressão pontual. Pode-se observar o número de amostras

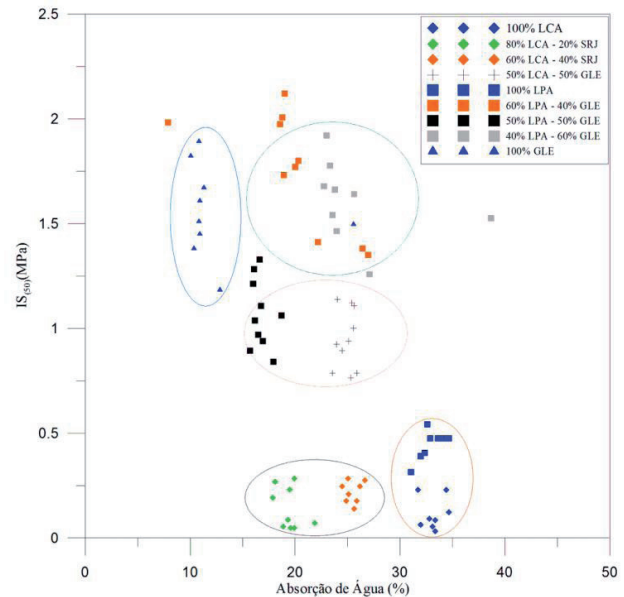
ensaiadas por solo e misturas de solos, além de dados de valor máximo, valor mínimo e dispersão. A dispersão dos resultados é dada pela relação porcentual entre o desvio padrão e a média de cada conjunto, o coeficiente de variação (CV). Nota-se que esta medida da dispersão dos dados é, via de regra, maior para os dados de resistência do que para os dados de porosidade aparente e de absorção de água. A distribuição dos pontos experimentais no gráfico do coeficiente de variação contra a resistência à compressão pontual mostra uma relação com tendência potencial negativa, ou seja, há acentuado declínio da dispersão com o aumento das resistências (figura 10).



**Figura 10** – Relação entre a dispersão dos dados, dada pelo coeficiente de variação (CV) e a resistência à compressão pontual ( $IS_{(50)}$ )

Para o melhor entendimento do comportamento dos solos e misturas foram construídos

gráficos que correlacionam os valores de porosidade aparente e absorção de água, para cada amostra, com os valores dos índices de compressão puntiforme o  $IS_{(50)}$  (figuras 11 e 12). Com os resultados obtidos foi possível observar que os latossolos (LCA e LPA) possuem comportamentos semelhantes quanto aos parâmetros de correlação entre a porosidade aparente, absorção de água e o  $IS_{(50)}$  campo representado pela elipse vermelha nas figuras 12 e 13.



**Figura 11** – Relação entre a absorção de água e a resistência à compressão pontual.

**Tabela 8** – Dados completos de porosidade aparente, absorção de água e resistência à compressão pontual (RCP). N° é o número de testes, Min é o valor mínimo, Max é o valor máximo, é a média e CV(%) é o coeficiente de variação.

Material	N°	Porosidade (%)			Absorção (%)			$IS_{(50)}$ (MPa)					
		Min	Max	CV(%)	Min	Max	CV(%)	Min	Max	CV(%)			
100% LCA	8	44,4	47,1	46,0	2,2	31,7	34,7	33,2	3,1	0,04	0,22	0,11	63,0
80%LCA : 20% SRJ	9	31,1	35,3	32,6	4,2	17,9	21,9	19,4	6,0	0,06	0,28	0,15	67,0
60%LCA : 40% SRJ	8	38,8	40,4	39,7	1,2	24,5	26,7	25,5	2,9	0,13	0,26	0,20	23,4
100 % LPA	8	48,5	53,1	50,1	3,0	31,0	34,7	32,9	3,6	0,32	0,55	0,45	15,9
50%LCA :50%GLE	10	37,8	40,4	39,5	2,2	23,6	25,6	24,9	3,3	0,76	1,12	0,94	15,4
50%LPA : 50%GLE	10	30,2	34,5	31,8	4,2	15,7	18,7	16,7	5,6	0,83	1,31	1,06	15,6
40%LPA : 60%GLE	9	39,1	52,0	41,8	9,6	22,7	27,1	25,8	19,6	1,29	1,92	1,60	11,6
60%LPA : 40%GLE	10	16,7	44,3	36,3	21,0	7,9	22,2	19,9	26,3	1,29	2,08	1,73	16,6
100%GLE	9	19,4	40,3	23,0	28,6	10,1	12,8	12,6	38,9	1,17	1,88	1,54	14,1





com uma granulometria que seja equivalente aos intervalos granulométricos referentes ao campo B do diagrama de Winkler. O aumento da temperatura de queima será uma alternativa que deverá melhorar a qualidade do material obtido. Sugere-se também estudos com solos e misturas com matérias fundentes, tais como potássio, cálcio e sódio.

### Agradecimentos

*Ao IME e à UENF pelo uso de suas extrusoras. Ao CNPq pelas bolsas de produtividade em pesquisa de Helena Polivanov e de Laura Maria Goretti da Motta.*

### REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1984a. NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 13p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1984b. NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 6p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1984c. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 3p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2011. NBR 6220: Materiais refratários densos conformados – Determinação do volume aparente, densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida. Rio de Janeiro, 4p.
- Alexandre J. 1997. Caracterização das argilas do Município de Campos dos Goytacazes para utilização em cerâmicas vermelhas. Dissertação Mestrado, Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 164p.
- Broch E. & Franklin J.A. 1972. The point load strength test. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech Abstr.*, 9:669-697.
- Cabral G.L.L. 2005. Metodologia de produção e emprego de agregados de argila calcinada para pavimentação. Dissertação de Mestrado, Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, 358p.
- Cabral G.L.L. 2011. Utilização do agregado artificial de argila calcinada em obras de pavimentação e aperfeiçoamento da tecnologia. Doutorado, Programa de Engenharia Civil (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 216p.
- Campos A.M.L.S. 2008. O efeito da temperatura de queima no agregado sintético de argila calcinada, aplicado em concreto asfáltico. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, 159p.
- Claessen M.E.C. 1997. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, EMBRAPA-CNPq, 212p.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2006. Geologia e recursos minerais do Estado do Amazonas: texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais do Estado do Amazonas - escala 1:1.000.000. Rio de Janeiro, CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 144p.
- Da Silva C.L.A., da Silva C.L., Rebelo E.P., da Frota C.A. 2009. Processo produtivo de agregados sinterizados de argila calcinada para a região Amazônica. *Estudos Tecnológicos*, 5: 374-388.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. 1981. Pesquisa de Viabilidade de Implantação da Fábrica de Argila Expandida na Região Amazônica. Rio de Janeiro, IPR/Divisão de Pesquisas.
- ISRM. 1978. Suggested methods for the quantitative description discontinuities in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 15: 319-368.
- ISRM. 1985. Suggested method for determining point load strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 22: 51-60.
- Marques E.A.G., Barroso E.V., Menezes Filho A.P., Vargas Jr. E. do A. 2010. Weathering zones on metamorphic rocks from Rio de Janeiro - Physical, mineralogical and geomechanical characterization. *Engineering Geology*, 111:1-18.

Nascimento R.R. 2005. Utilização de agregados de argila calcinada em pavimentação; uma alternativa para o Estado do Acre. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 165p.

Pracidelli S. & Melchiades F. G. 1997. Importância da composição granulométrica de massas

para a cerâmica vermelha. *Cerâmica Industrial*, 2:31-35.

Theisen A.A. & Harward M.E. 1962. A paste method for preparation of slides for clay mineral identification by X-Ray diffraction. *Soil Science of America Proceedings*, 26:90-91.