

Uso de rejeitos de granitos como matérias-primas cerâmicas (*The use of granite wastes as ceramic raw materials*)

R. R. Menezes, H. S. Ferreira, G. de A. Neves, H. C. Ferreira

Departamento de Engenharia de Materiais

Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba

Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande, PB, 58109-970

fone: 083-310.1182/1183, fax: 083-310.1178

gelmires@dema.ufpb.br; heber@dema.ufpb.br

Resumo

A indústria do beneficiamento de granito gera uma enorme quantidade de rejeitos, que poluem e degradam o meio ambiente. Assim este trabalho tem por objetivo caracterizar e avaliar as possibilidades de utilização dos rejeitos da serragem de granitos gerados pelas indústrias de beneficiamento da Região Nordeste, como matéria-prima cerâmica alternativa na produção de blocos e revestimentos cerâmicos. Foram coletadas amostras de resíduos da serragem de granito em empresas da Paraíba, Ceará e Pernambuco, em seguida foi realizada sua caracterização através da determinação da distribuição granulométrica, massa específica real e área específica (BET) e de análise química, ATD, ATG, DRX, MEV. Após caracterização foram conduzidos ensaios tecnológicos com composições cerâmicas a fim de avaliar a possibilidade de adição dos resíduos em massas cerâmicas para confecção de blocos e revestimentos cerâmicos. Com base nos resultados verificou-se que os resíduos apresentam características físicas e mineralógicas semelhantes as das matérias-primas cerâmicas convencionais e que corpos cerâmicos formulados com resíduos apresentam características dentro das especificações da normalização brasileira tanto para blocos como para revestimentos cerâmicos.

Palavras-chave: Reciclagem, resíduo de granito, bloco cerâmico, revestimento cerâmico.

Abstract

The granite industry generates a large quantity of wastes that pollute and damage the environment. This work aim to characterize and evaluate the possibilities of the use of granite sawing wastes, generated by the industries from Northeast region, as alternative ceramic raw materials for production of ceramic bricks and tiles. Samples of granite sawing wastes were collected from industries located at Paraíba, Ceará and Pernambuco states, and afterwards were characterized for the determination of their particle size distribution, specific mass, surface area (BET) and chemical analyses, differential thermal analysis, GTA, X-ray diffraction, and scanning electron microscopy. After characterization, technological tests were performed in ceramic compositions with the objective of evaluation of the possibilities of the addition of wastes in ceramic masses for the production of ceramic bricks and tiles. The main results show that the wastes have physical and mineralogical characteristics similar to the conventional ceramic raw materials and ceramic bodies. Moreover, the ceramic pieces prepared using the wastes have technical characteristics according to the Brazilian standards for ceramic bricks and tiles.

Keywords: Recycling, granite wastes, ceramic bricks, ceramic tiles.

INTRODUÇÃO

O aproveitamento dos rejeitos através de estudos capazes de detectar suas potencialidades e viabilizar sua seleção preliminar é encarado hoje como atividade complementar, que pode contribuir para diversificação dos produtos, diminuição dos custos finais, além de resultar em “novas” matérias-primas para uma série de setores industriais.

A reciclagem dos rejeitos gerados pelas indústrias para uso como matérias-primas alternativas não é nova, e tem sido efetuada com sucesso em vários países. As razões que motivam esses países, em geral, são: o esgotamento das reservas confiáveis; a conservação de fontes não renováveis; melhoria da saúde e segurança da população [1]; a preocupação com o meio ambiente e a necessidade de compensar o desequilíbrio econômico provocado pela alta do petróleo, notadamente nos países onde há

marcante escassez de matérias-primas.

Segundo Sauterey [2], a construção civil é o ramo da atividade tecnológica que pelo volume de recursos naturais consumidos, parece ser o mais indicado para absorver rejeitos sólidos, como os das rochas graníticas ornamentais. O reaproveitamento de resíduos, de maneira integral ou como coadjuvante em ramos industriais cerâmicos, que englobam em grande parte a construção civil, pode contribuir para diversificar a oferta de matérias-primas para produção de componentes cerâmicos e reduzir os custos da construção civil, o que é de vital importância, principalmente em um país com elevado déficit habitacional como o Brasil.

A indústria da mineração e beneficiamento de granitos é uma das mais promissoras áreas de negócio do setor mineral, apresentando um crescimento médio da produção mundial estimado em 6% ao ano, nos últimos anos. Com uma

movimentação de US\$ 6 bilhões/ano, no mercado internacional e cerca de US\$ 13 bilhões na cadeia produtiva dos países produtores [3]. Todavia esse setor industrial gera elevada quantidade de rejeitos na forma de uma “lama” com elevados teores de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e CaO , que podem provocar grandes agressões ambientais, se não adequadamente descartados [4].

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de granito, tanto na forma de blocos como em produtos acabados. Toda a pujança desse setor no país, não impede e pelo contrário parece favorecer, que as indústrias brasileiras de beneficiamento atinjam níveis altíssimos de desperdício, havendo a formação de rejeitos na forma de pó de 20% a 25%, em massa, do total beneficiado, o que intensifica a quantidade de rejeitos gerados e o perigo de danos ambientais [5-6].

A lama do beneficiamento do granito é em geral descartada em córregos, ravinas, lagos e rios, havendo a formação de grandes depósitos à céu aberto. A lama da serragem enquanto fluída afoga plantas e animais e deprecia o solo, quando seca, sua poeira inspirada é danosa à saúde de homens e animais. Sendo comprovada [7] a poluição de cursos d’água e mananciais por parte dos resíduos da indústria do granito.

A Região Nordeste é uma área onde se concentra grande quantidade de indústrias de beneficiamento, sendo responsáveis pela liberação de centenas de toneladas de resíduo por ano no meio ambiente. Este quadro de descaso é agravado ainda mais, pelos indicativos de crescimento da produção, despertando a preocupação de ambientalistas e da comunidade em geral, em vista de um cenário ainda mais perigoso e danoso ao meio ambiente e à saúde da população.

Tendo em vista o aproveitamento da grande quantidade de rejeitos da serragem de granitos gerados pelas indústrias de beneficiamento da Região Nordeste do Brasil, este trabalho objetiva caracterizar e avaliar as possibilidades de utilização desses resíduos como matéria prima cerâmica alternativa na produção de blocos e revestimentos cerâmicos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

No desenvolvimento dessa pesquisa foram utilizadas matérias-primas cerâmicas convencionais e resíduos da serragem de granito. As matérias-primas convencionais foram:

- argila vermelha, proveniente do município de Santa Rita – PB, fornecida pela Companhia Industrial Cerâmica – CINCERA, localizada no Distrito Industrial de Santa Rita – PB ;
- argila “ball clay” proveniente do município de Alhandra – PB, fornecida pela Indústria Armil Minérios, localizada no Distrito Industrial de Campina Grande – PB;
- quartzo proveniente do Morro do Careca, município de Parelhas – RN, fornecido pela Indústria Armil Minérios, localizada na Cidade de Parelhas – RN;
- feldspato proveniente da cidade de Parelhas – RN, fornecido pela Indústria Armil Minérios, localizada na Cidade de Parelhas – RN;
- calcita proveniente do município de Boa Vista – PB, fornecida pela Indústria Armil Minérios, localizada no Distrito Industrial de Campina Grande – PB.

Foram selecionadas e coletadas três amostras de resíduos da serragem do granito oriundos de fábricas de beneficiamento do estado da Paraíba. Os resíduos utilizados foram:

- resíduo proveniente da Empresa Poligran, Polimentos de Granitos do Brasil, localizada no Distrito Industrial de Campina Grande – PB, identificado por Poligran;
- resíduo proveniente da Empresa Caxambu, localizada na Fazenda Caxambu município de Cabaceiras – PB, identificado por Caxambu;
- resíduo proveniente da Empresa Fuji, Mármore e Granitos, localizada no Distrito Industrial de Campina Grande – PB, identificado por Fuji.

Metodologia

Inicialmente foi realizada a caracterização física e mineralógica das amostras de resíduos através de: massa específica real segundo o método do picnômetro de hélio, utilizando picnômetro Micromeritics, modelo AccuPyc 1330; análise granulométrica por peneiramento e sedimentação pelo método do densímetro, de acordo com norma NBR 7181 [8] e pelo método de absorção de raios-X com utilização de equipamento Sedigraph, modelo 5100 da Micromeritics; área específica pelo método do BET, em equipamento da Micromeritics, modelo ASAP-2370; análise química por via úmida, segundo métodos do Laboratório de Análises Mineraias do CCT/PRAI/UFPB; análise térmica diferencial (ATD) e térmica gravimétrica (ATG) utilizando aparelho de análises térmicas da BP Engenharia, modelo RB-3000; difração de raios-X (DRX) em equipamento Siemens/Brucker, modelo AXD D5005, com radiação Cu K_α (40 kV/40 mA) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) em equipamento Leica, modelo S440.

As matérias-primas cerâmicas convencionais utilizadas nesse trabalho (argila vermelha e “ball clay”, quartzo, feldspato e calcita) foram caracterizadas seguindo a mesma sistemática aplicada na caracterização dos resíduos de granito. Descrição detalhada dos resultados obtidos pode ser encontrada em [9].

Após caracterização dos resíduos foram formuladas massas cerâmicas para produção de blocos cerâmicos (tijolos) e de revestimentos cerâmicos. As massas para cerâmica vermelha foram compostas por argila vermelha e teores de resíduos nas proporções de 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55% e 60%. As formulações para revestimento foram realizadas através do programa REFORMIX 2.0, desenvolvido no Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar e utilizado para formulação de massas cerâmicas, tendo como base a composição química de uma formulação comercial. As massas para revestimento foram compostas por argila “ball clay”, caulim, quartzo, feldspato, calcita e resíduo de granito, com o resíduo em proporções que variaram de 15% a 40% de acordo com as proporções dos outros constituintes.

Visando avaliar a utilização dos resíduos de granito como matéria-prima alternativa em cerâmica vermelha foram determinados os limites de Atterberg, segundo as normas NBR 6459 [10] e 7180 [11], das formulações com argila vermelha e resíduo. Em estas formulações foram submetidas a ensaios tecnológicos completos e em escala piloto, de acordo com a sistemática proposta por Souza Santos [12] e normas NBR 7170

[13] e 7171 [14] respectivamente. Nos ensaios completos foram confeccionados corpos de prova de 20 cm x 2 cm x 2 cm por extrusão, que foram submetidos à queima nas temperaturas de 800 °C, 900 °C e 1000 °C, em atmosfera oxidante, com um ciclo máximo de queima de 10 h e patamar na temperatura máxima de 2 h. Os ensaios em escala piloto foram conduzidos conforme as normas supracitadas, sendo a queima realizada em olaria do município de Campina Grande – PB, em uma temperatura de queima estimada entre 750 °C e 850 °C. Após confecção dos corpos de prova para ensaios completos e em escala piloto, foram determinados o módulo de ruptura à flexão (ensaios completos) resistência à compressão (ensaios em escala piloto) e absorção de água.

A fim de analisar o uso dos resíduos de granito como matéria-prima alternativa para produção de revestimentos cerâmicos, as formulações foram submetidas aos ensaios específicos segundo a sistemática proposta em [12] e em escala piloto. Nos ensaios específicos foram confeccionados corpos de prova de 12,0 cm x 6,0 cm x 1,0 cm por prensagem uniaxial a 20 MPa, que foram queimados a 1150 °C, 1175 °C e 1200 °C, com uma razão de aquecimento de 9 °C/min e patamar de queima na temperatura máxima de 30 min. Os ensaios em escala piloto foram realizados na empresa Cordeiro do Nordeste, localizada no Distrito Industrial de João Pessoa – PB, sendo os corpos conformados nas mesmas condições dos ensaios específicos, com exceção da sinterização que foi efetuada em temperatura da ordem de 1150 °C com ciclo de queima de aproximadamente 35 min. Após confecção dos corpos de prova foram determinados o módulo de ruptura à flexão e absorção de água.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ensaios de Caracterização

A Tabela I apresenta os resultados de massa específica real dos resíduos analisados. Observa-se que os valores são bastante

Tabela I – Massa específica real dos resíduos.
[Table I – Wastes specific mass.]

Amostras	Massa Específica Real (g/cm ³)
Poligran	2,69 ± 0,0005
Caxambu	2,63 ± 0,0005
Fuji	2,70 ± 0,0014

similares, variando de 2,63 g/cm³ a 2,70 g/cm³. Comparando esses resultados com dados da literatura [12, 15] para as matérias-primas cerâmicas convencionais não plásticas, quartzo e feldspato (2,60 g/cm³ a 2,70 g/cm³), observa-se que estão dentro da faixa de referência.

A Tabela II apresenta a distribuição granulométrica obtida por peneiramento e sedimentação. Observa-se que os resíduos apresentaram entre 80% a 99% em massa de partículas com diâmetro equivalente inferior a 70 µm. Verifica-se que os resíduos apresentaram valores de porcentagem em massa de partículas com diâmetro equivalente inferior a 2 µm variando de 7% a 15%, o que é bem semelhante aos resultados obtidos em [9] para as matérias-primas cerâmicas convencionais, quartzo e feldspato (5% a 8%).

Com base nas curvas de distribuição do tamanho de partículas obtidas pelo método de absorção de raios X, observa-se que os resíduos apresentaram porcentagens de massa acumulada entre 40% e 50%, para um diâmetro médio equivalente abaixo de 10 µm, sendo esses valores similares aos determinados em [9] para as matérias-primas convencionais não plásticas (DM < 10 µm em torno de 40%), quartzo e feldspato.

A Tabela III apresenta os resultados das áreas específicas obtidas pelo método de BET. Verifica-se que os resíduos estudados apresentaram valores variando de aproximadamente 6 m²/g a 11 m²/g. Estes resultados são superiores aos das matérias-primas convencionais não plásticas (quartzo, 1,33 m²/g e feldspato, 2,41 m²/g) determinados em [9]. Comparando com os dados obtidos em [12, 15] verifica-se que os valores obtidos encontram-se na faixa de caulins primários (3,33 m²/g a 19,80 m²/g).

Em relação ao uso dos resíduos como matéria-prima cerâmica alternativa, este nível de cominuição é similar aos das partículas que compõem as massas convencionais o que facilita seu uso, já que são desnecessários processos de cominuição complementares.

A Tabela IV apresenta a composição química dos resíduos

Tabela III – Área específica dos resíduos.
[Table III – Waste surface areas.]

Amostras	Área específica (BET) m ² /g
Poligran	11,41
Caxambu	6,90
Fuji	6,16

Tabela II – Distribuição granulométrica por peneiramento e sedimentação dos resíduos.*
[Table II – Waste particle size distributions by sieving and sedimentation.]

Amostras	Massa Acumulada (%)								
	Diâmetro Médio das Partículas (µm)								
	70	60	50	40	30	20	10	5	2
Poligran	99,0	97,0	96,0	90,0	86,0	77,0	57,0	34,0	15,0
Caxambu	89,0	85,0	79,0	73,0	63,0	48,0	34,0	17,0	7,0
Fuji	80,0	75,0	71,0	65,0	63,0	52,0	36,0	19,0	7,0

* Todas as amostras possuíram 100% de massa acumulada na peneira ABNT N° 200 (74 µm)

Tabela IV – Composição química dos resíduos.
[Table IV – Waste chemical compositions.]

Amostras	Porcentagem em Massa (%)							
	Pr*	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
Poligran	4,44	59,61	5,98	11,77	4,48	-	2,70	3,63
Caxambu	2,93	88,91	-	6,64	-	-	0,14	0,06
Fuji	2,57	60,20	6,30	13,80	6,02	-	3,38	3,63

* Perda ao rubro - Não encontrado

Tabela V – Limites de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade das massas.
[Table V – Liquid and plasticity limit and plasticity index.]

Resíduos	Teor de Resíduo (%)								
	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Limites de Liquidez (%)									
Poligran	45,0	43,0	30,0	39,5	39,0	37,8	36,5	35,5	34,6
Caxambu	53,0	52,0	50,0	45,0	46,0	44,0	40,0	40,0	38,0
Fuji	52,0	50,0	49,0	49,0	39,0	43,0	36,0	41,0	36,0
Limites de Plasticidade (%)									
Poligran	24,2	23,0	22,4	23,0	24,0	23,4	23,2	22,8	22,5
Caxambu	26,0	27,0	25,8	24,0	25,0	23,0	25,0	24,0	23,0
Fuji	26,5	26,2	25,0	25,0	20,0	27,0	20,0	26,0	21,0
Índices de Plasticidade (%)									
Poligran	20,8	20,0	18,9	16,5	15,4	15,5	12,9	12,7	12,4
Caxambu	27,0	25,0	25,0	21,0	21,0	21,0	15,0	16,0	15,0
Fuji	25,5	23,8	24,0	24,0	19,0	18,0	16,0	15,0	14,0

estudados. Verifica-se que os resíduos apresentaram teores de SiO₂ superiores a 59% e teores de Al₂O₃ variando de 6,40% a 13,80%. O teor de Fe₂O₃ situou-se em torno de 6%, não sendo observada sua presença no resíduo Caxambu, o que está relacionado a particularidades do processo da Empresa Caxambu, que faz uso de discos adiantados. A presença do CaO e do Fe₂O₃ encontrados nas amostras são oriundos principalmente da granalha e cal utilizados como abrasivos e lubrificantes respectivamente. O teor de fundentes, Fe₂O₃, Na₂O e K₂O, variou aproximadamente de 12% a 13%, com exceção do resíduo Caxambu, que apresentou uma quantidade de fundentes próxima de zero (0,2%).

Com base nas curvas de análises termodiferenciais dos resíduos estudados, verificou-se que os resíduos Poligran e Fuji, apresentaram: pico endotérmico de pequena intensidade a aproximadamente 560 °C, provavelmente correspondente a transformação de quartzo alfa em quartzo beta; pico endotérmico de pequena intensidade a aproximadamente 740 °C, relacionado à perda de hidroxilas da mica; pico endotérmico de pequena intensidade correspondente à recristalização da mica à 780 °C e pico endotérmico de pequena intensidade a aproximadamente 980 °C correspondente a decomposição do carbonato de cálcio.

O resíduo Caxambu apresentou pico endotérmico a 570 °C, provavelmente relacionado à transformação de quartzo alfa em beta e a perda de hidroxilas da caulinita e pico exotérmico de pequena intensidade a 980 °C correspondente a nucleação da mulita.

Com base nas curvas de análise termogravimétricas, verificou-se que a perda de massa total varia de 6% a 7%. Pode-se observar que os resíduos Poligran e Fuji apresentaram a maior perda de massa no intervalo de temperatura referente a decomposição do carbonato de cálcio, enquanto que o resíduo apresentou maior perda de massa no intervalo de decomposição de material argiloso, o que está de acordo com os dados da análise térmica diferencial.

A Fig.1 apresenta os difratogramas dos resíduos estudados. Pode-se observar que os difratogramas dos resíduos Poligran e Fuji apresentaram picos referentes ao quartzo (SiO₂), microclina (feldspato potássico – KAlSi₃O₈), albita (feldspato sódico – NaAlSi₃O₈), mica moscovita e calcita (CaCO₃). Enquanto que o difratograma do resíduo Caxambu apresentou picos referentes ao quartzo e a presença de caulinita. Verifica-se que os resultados obtidos através da difração de raios X estão de acordo com os resultados das análises térmica diferencial e gravimétrica.

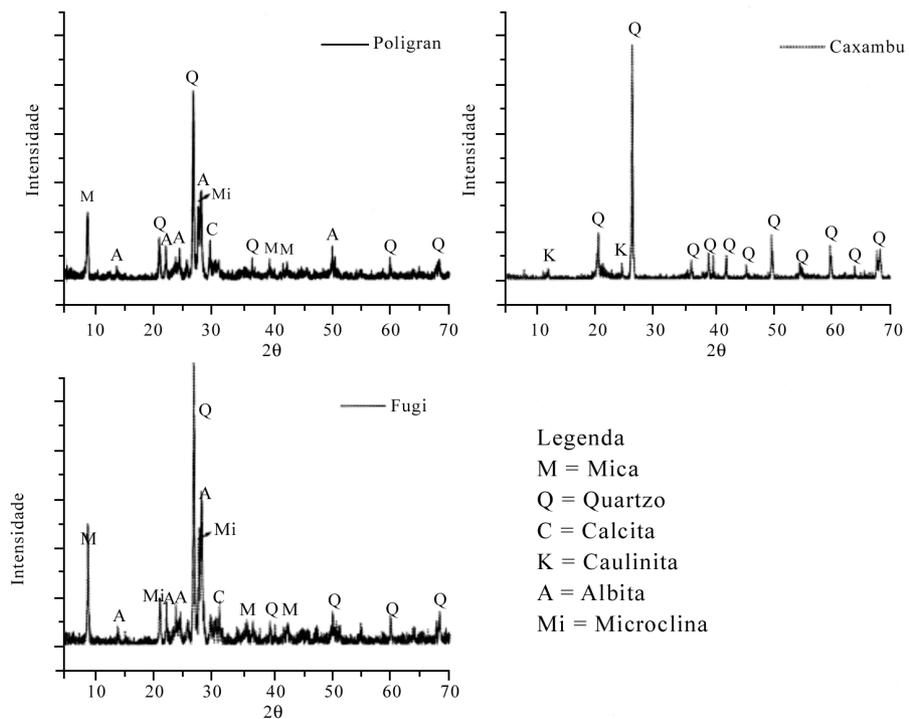


Figura 1: Difratoigramas de raios X dos resíduos.
[Figure 1: X-ray diffraction patterns of the wastes.]

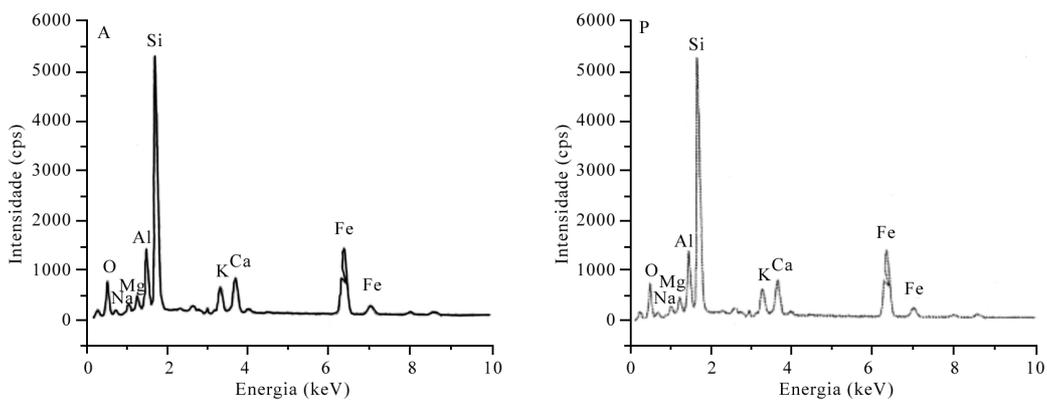
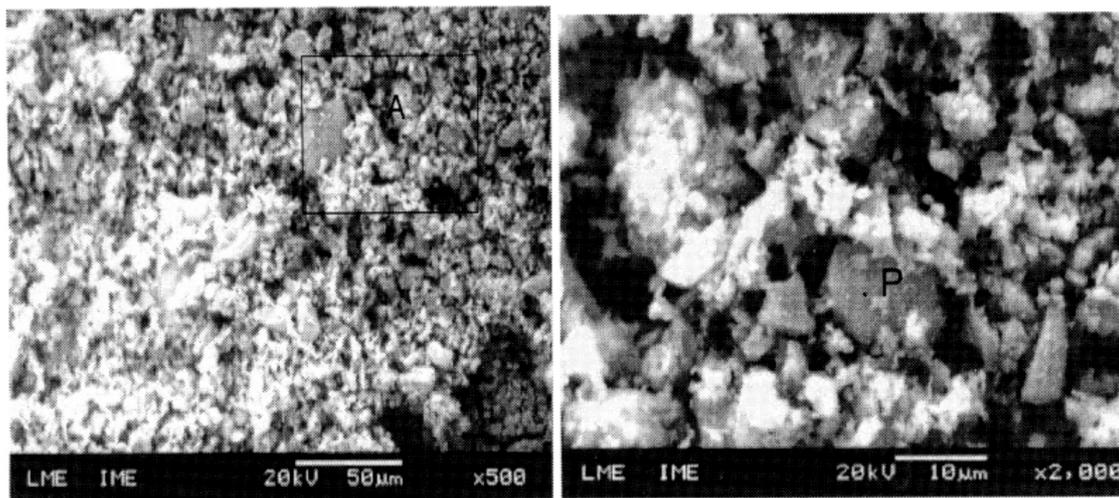


Figura 2: Micrografias MEV e espectro de EDS do resíduo Poligran.
[Figure 2: SEM micrographs and EDS spectrum of Poligran waste.]

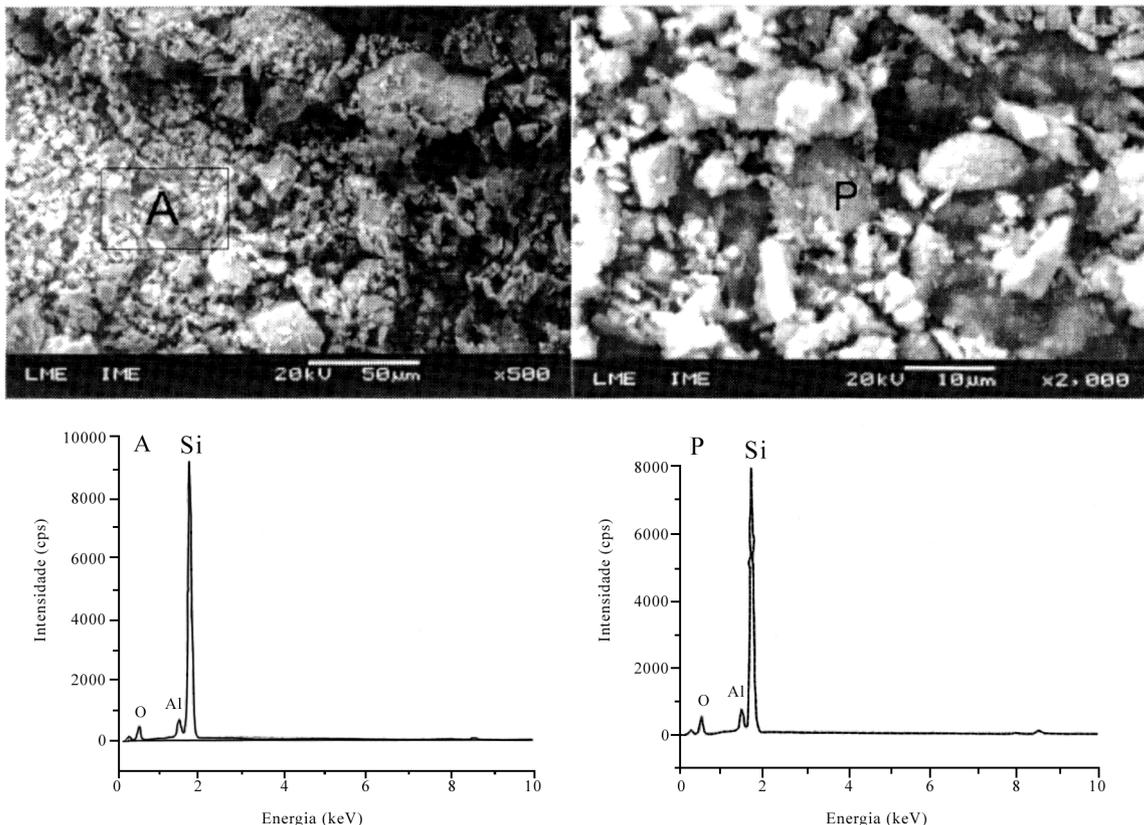


Figura 3: Micrografias MEV e espectro de EDS do resíduo Caxambu.
 [Figure 3: SEM micrographs and EDS spectrum of Caxambu waste.]

As Figs. 2 e 3 apresentam as MEVs e os espectros de EDS obtidos para os resíduos Poligran e Caxambu. Pode-se observar que o resíduo Poligran apresentou partículas com morfologia irregular e superfície arredondada e algumas outras com cantos angulosos. A análise por microsonda de energia dispersiva (EDS) ratifica os dados obtidos através da análise química, com a indicação da presença de Si, Al, Fe, Ca, K e Na. O resíduo Fuji apresentou micrografias bem semelhantes a obtida para o resíduo Poligran, inclusive no que se refere aos dados de EDS. O resíduo Caxambu à semelhança do Poligran também apresentou partículas irregulares com superfície arredondada e outras com cantos angulosos, todavia a análise por microsonda de energia dispersiva difere significativamente da análise do resíduo Poligran, com indicação de elevada proporção de Si e presença de Al.

Com base na caracterização física e mineralógica realizada nos resíduos observa-se que são materiais com características similares as matérias-primas cerâmicas convencionais não plásticas (feldspato e quartzo). Os resíduos apresentam uma distribuição granulométrica bem semelhante aos dos materiais convencionais com um “grau de finura” levemente superior ao das matérias-primas utilizadas comercialmente o que possibilita uma redução do custo energético para cominuição do quartzo e feldspato brutos, quando da substituição das matérias-primas convencionais por essas alternativas, bem como não interfere de forma significativa no grau de empacotamento das massas (após conformação). No que se refere a composição mineralógica observa-se que os resíduos Poligran e Fuji apresentaram uma certa semelhança com o feldspato, em virtude do elevado teor de sílica e fundentes, enquanto que o Caxambu

apresentou composição próxima a do quartzo.

Ensaio Tecnológicos

Massas para Cerâmica Vermelha

A Tabela V apresenta os resultados dos limites de liquidez, plasticidade e índices de plasticidade das massas formuladas com argila vermelha e resíduos. Pode-se observar que os valores dos limites de liquidez variaram de 34,6% (massa com 60% de Poligran) a 53,0% (massa com 20% de Caxambu). Comparando estes resultados com dados da literatura [12,16-18] verifica-se que estão dentro da faixa de valores (30% a 60%). Os limites de plasticidade variaram de 20,0% (massa com 50% de Fuji) a 26,5% (massa com 20% de Fuji), podendo-se observar que estão dentro da faixa de valores (15% a 30%) das massas utilizadas em cerâmica vermelha usando-se o processo de conformação por extrusão.

Com base na Tabela V verifica-se que os valores dos índices de plasticidade (IP) situaram-se entre 12,4% (massa com 60% de Poligran) e 27,0% (massa com 20% de Caxambu). As massas com até 45% de resíduo são consideradas altamente plásticas ($IP > 15\%$), enquanto que as formulações com 50%, 55% e 60% de resíduo apresentaram valores de índice de plasticidade dentro da faixa referente a massas mediantemente plásticas ($7\% < IP < 15\%$). Comparado com os dados da literatura [11, 16-18] determinados para massas utilizadas em cerâmica vermelha para conformação por extrusão ($10\% < IP < 30\%$), observa-se que os valores obtidos são apropriados.

A Fig. 4 apresenta os resultados de absorção de água e módulo

Tabela VI – Características cerâmicas dos blocos após queima em olaria.
 [Table VI – Ceramic characteristics of industrial fired bricks.]

Resíduos	Teor de Resíduo (%)							
	0	20	25	30	35	40	45	50
	Absorção de Água (%)							
Poligran	12,10	12,42	13,73	15,84	18,23	19,55	20,00	20,54
Caxambu	12,10	12,19	13,73	14,19	16,14	17,27	20,03	20,40
Fuji	12,10	15,64	17,44	18,23	19,82	20,56	20,92	21,84
	Resistência à Compressão Simples (MPa)							
Poligran	4,90	3,54	2,93	2,65	2,57	2,12	2,05	1,92
Caxambu	4,90	3,82	3,56	3,30	2,73	2,66	2,45	2,30
Fuji	4,90	4,51	3,22	3,05	2,51	2,40	2,26	2,15

de ruptura à flexão dos corpos de prova moldados por extrusão e queimados nas temperaturas de 800 °C, 900 °C e 1000 °C. Pode-se observar que o aumento no teor de resíduos conduziu a uma elevação da absorção de água em todas as temperaturas de queima estudadas. Já o módulo de ruptura à flexão apresentou um aumento seguido por decréscimo com a elevação no teor de resíduo na massa, em todas as temperaturas estudadas, sendo esse decréscimo a partir de teores em torno de 25% a 30% de resíduo.

Comparando os resultados ilustrados na Fig. 4 com os valores recomendados [19] para que a massa cerâmica possa ser utilizada na fabricação de blocos, verifica-se que todas as amostras apresentaram valores de absorção de água inferiores ao máximo indicado para blocos furados (25%). Com relação aos valores mínimos de módulo de ruptura à flexão indicados [19] para blocos furados (5,5 MPa), observa-se que todas as massas com até 50% de resíduo apresentaram valores superiores a esses mínimos, independentemente do resíduo utilizado ou da temperatura de queima.

Com base nos resultados dos ensaios completos foram conduzidos os ensaios em escala piloto com composições com até 50% de resíduo. A Tabela VI apresenta os resultados de absorção de água e resistência à compressão simples dos blocos cerâmicos após queima em olaria. Pode-se observar que todas as composições apresentaram valores de resistência à compressão simples dentro da faixa especificada [13] para tijolos maciços (resistência à compressão > 1,5 MPa), sendo os blocos com composição de 40% a 50% de resíduo enquadrados na classe A (resistência à compressão < 2,5 MPa) e os com 20% a 35% de resíduo enquadrados como classe B (resistência à compressão < 4,0 MPa) e classe C (resistência à compressão > 4,0 MPa).

De acordo com a normalização para blocos cerâmicos (tijolos furados) [14] observou-se que todas as composições apresentaram valores de absorção de água dentro da faixa especificada (8% a 25%), independentemente do resíduo utilizado. Em relação a resistência a compressão simples, os blocos cerâmicos com 40% a 50% de resíduo foram enquadrados como Classe 15 (1,5 MPa < resistência à compressão < 2,5 MPa) e os blocos com 20% a 35%

de resíduo foram enquadrados como classe 25 (2,5 MPa < resistência à compressão < 4,5 MPa).

Massas para Revestimento Cerâmico

Foram estudadas várias formulações utilizando os resíduos de granito para revestimentos, todavia não se pode fazer uma análise sistemática quanto à influência do aumento do teor de resíduo na composição, tal como feito anteriormente para cerâmica vermelha, em virtude da influência dos outros constituintes (“ball clay”, caulim, quartzo, calcita, feldspato), na determinação da composição química final da massa, já que as massas foram formuladas tendo-se como referência uma composição química pré-definida de uma massa comercial.

A Fig. 5 ilustra os valores de absorção de água e módulo de resistência à compressão de algumas formulações obtidos após queima a 1150 °C, 1175 °C e 1200 °C. A Tabela VII apresenta a composição dessas massas cerâmicas.

Com base na Fig. 5 pode-se observar que conforme se aumentou a temperatura de queima ocorreu uma diminuição da absorção de água das amostras e um aumento do módulo de ruptura à flexão. Observa-se também, que de acordo com a norma NBR 13818 [20], os corpos cerâmicos com formulações com: resíduo Poligran (MPL 1 e 4), após queima a 1150 °C possuem valores de absorção (10% > absorção de água > 20%) e de módulo de ruptura (módulo de ruptura > 15 MPa) que os enquadram no grupo BIII (poroso) enquanto que após queima a 1175 °C e 1220 °C, eles podem ser enquadrados no grupo BIIB (semiporosos, 6% > absorção de água > 10% e módulo de ruptura > 18 MPa) e no grupo BIb (grés, 0,5% > absorção de água > 3% e módulo de ruptura > 30 MPa); resíduo Caxambú (MFG 2 e 3), só após queima a 1175 °C e 1200 °C se enquadram no grupo BIIB (semiporosos) e BIIa (semigres, 3% > absorção de água > 6% e módulo de ruptura > 22 MPa); resíduo Fugui (MFG 2 e 3), após queima a 1150 °C se enquadram no grupo BIIB e após queima a 1175 °C e 1200 °C, se encaixam nos grupos BIIB e BIIa.

Com base na Fig. 5 verifica-se que apenas os corpos cerâmicos

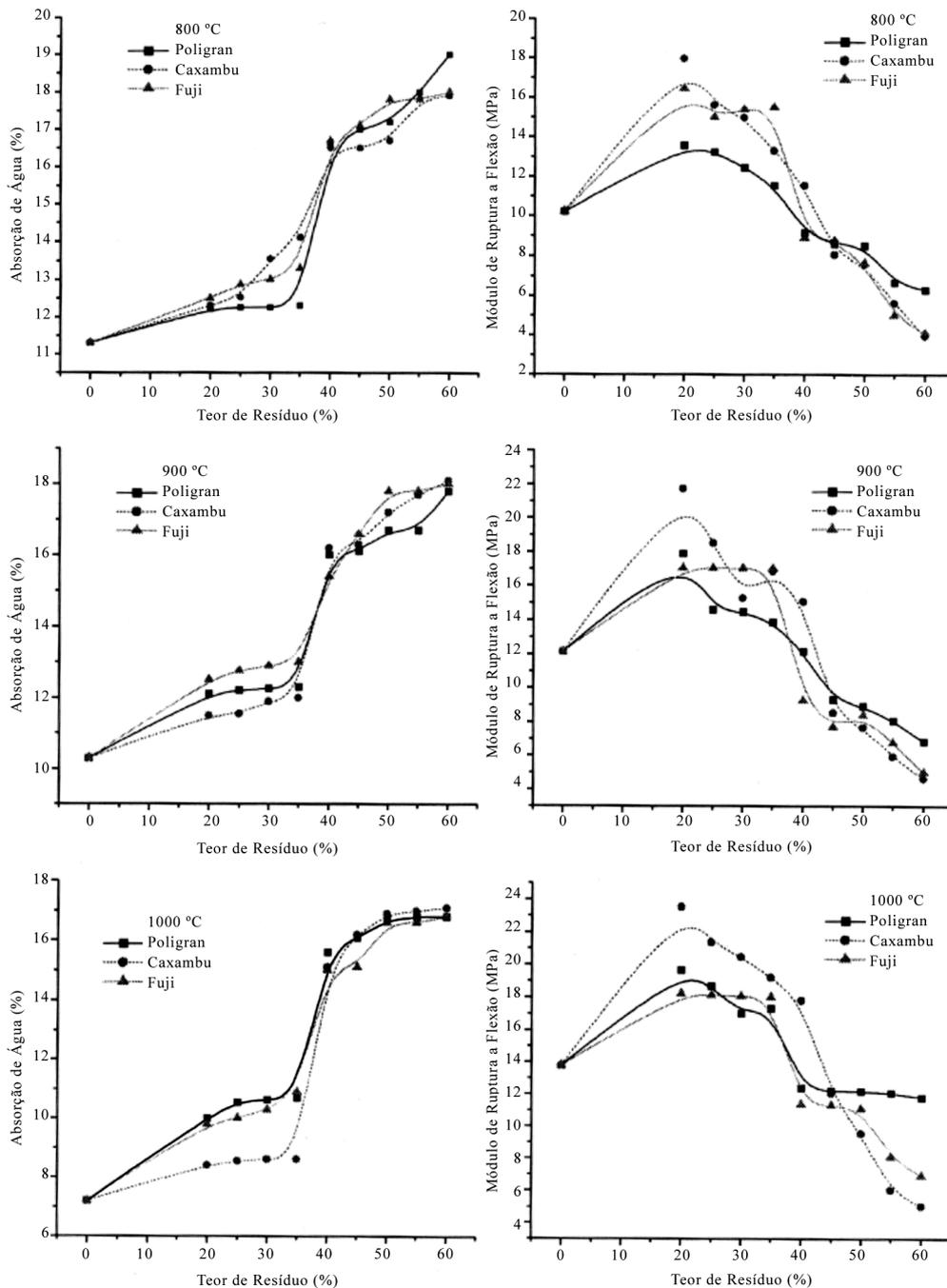


Figura 4: Absorção de água e módulo de ruptura à flexão dos corpos cerâmicos após queima nas temperaturas de 800 °C, 900 °C e 1000 °C para cerâmica vermelha.

[Figure 4: Water absorption and flexural strength of ceramic bodies fired at 800 °C, 900 °C and 1000 °C to be used as bricks.]

formulados com resíduo Caxambu, após queima a 1150 °C, não apresentaram características que os enquadravam dentro dos grupos definidos na normalização brasileira [20] e que as demais formulações mostravam-se adequadas a confecção de revestimentos cerâmicos. Partindo desses resultados foram conduzidos ensaios em escala piloto a fim de verificar o comportamento das formulações com resíduos em relação as condições industriais.

A Tabela VIII apresenta a absorção de água e o módulo de ruptura

à flexão dos corpos cerâmicos queimados em escala piloto. Pode-se observar que nas condições industriais que os corpos cerâmicos confeccionados com as massas MPL1, MFG2 e MFG3 apresentaram características que os enquadraram, segundo NBR 13818 [20], no grupo BIII (porosos), enquanto que os corpos confeccionados com a massa MPL4 podem ser enquadrados no grupo BIIb (semiporoso). O que confirma a possibilidade de utilização dos resíduos da serragem de granitos na confecção de revestimentos cerâmicos.

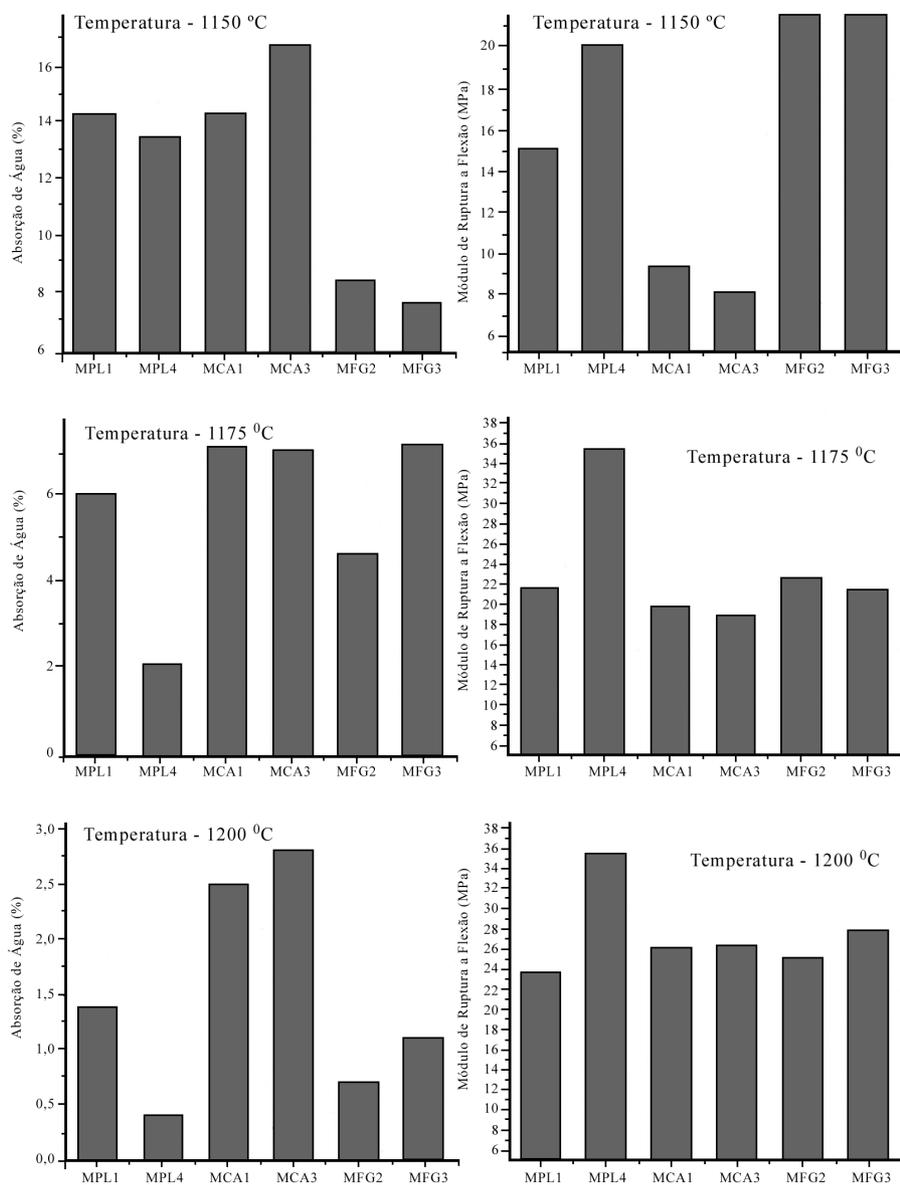


Figura 5: Propriedades físico-mecânicas de massas para revestimento.
 [Figure 5: Physico-mechanical properties of tile mass.]

Tabela VII – Composição de massas para revestimento estudadas.
 [Table VII – Compositions of the studied tile mass.]

Massas	Matérias-Primas (%)					
	Argila	Caulim	Resíduo	Feldspato	Calcita	Quartzo
MPL1*	46	10	25*	-	7	12
MPL4*	45	12	38*	-	2	3
MCA1**	32	12	30**	23	2	-
MCA3**	32	10	21**	31	5	-
MFG2#	35	15	35#	-	5	10
MFG3#	41	13	30#	-	4	12

*Resíduo Poligran **Resíduo Caxambu #Resíduo Fugi

Tabela VIII – Absorção de água e módulo de ruptura à flexão dos corpos cerâmicos queimados em escala piloto.
 [Table VIII – Water absorption and flexural strength of ceramic bodies fired in industrial conditions.]

Massas	Absorção de Água (%)	Módulo de Ruptura à Flexão (MPa)
MPL1*	13,2	15,00
MPL4*	8,9	22,67
MCA1**	17,3	8,25
MCA3**	16,6	8,15
MFG2#	13,3	17,73
MFG3#	12,7	15,00

*Resíduo Poligran **Resíduo Caxambu #Resíduo Fugi

As análises dilatométricas e de expansão por umidade dos corpos cerâmicos produzidos com massas contendo resíduos estão em andamento e serão publicadas em trabalhos posteriores

CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo caracterizar e avaliar as possibilidades de utilização dos rejeitos da serragem de granitos gerados pelas indústrias de beneficiamento da Região Nordeste como matéria-prima cerâmica alternativa na produção de blocos e revestimentos cerâmicos. Com base nos resultados pode-se chegar às seguintes conclusões: os resíduos apresentaram massas específicas reais, distribuições granulométricas e áreas específicas semelhantes às das matérias-primas cerâmicas convencionais, situando-se entre os valores das matérias-primas plásticas e não plásticas; os resíduos analisados são constituídos essencialmente por quartzo, feldspato, calcita e mica, sendo um deles composto basicamente por quartzo e caulinita; que a adição de resíduo às massas cerâmicas para blocos provoca uma elevação na absorção de água e uma redução na resistência à compressão simples dos blocos cerâmicos, e que blocos com teores de até 50% de resíduos apresentam características cerâmicas dentro das especificações da normalização; as massas cerâmicas com adições de resíduo podem ser usadas na confecção de revestimentos enquadrados nos grupos BI, BIIb, BIIa e BIII dependendo da temperatura de queima e que nas condições de queima das indústrias de queima rápida os produtos apresentam características referentes ao grupo BIII.

REFERÊNCIAS

- [1] ENBRI (1994), “Development of a framework for environmental assessment of building materials and components” (ENBRI Proposal to European Community BRITE EURAM Program).
 [2] R. Sauterey, in: Proceedings Aiaeenpc **1** (1978) 37.

- [3] C. D. Filhos, E. P. Rodrigues, Rochas de Qualidade **27**, 147 (1999) 86.
 [4] J. L. Calmon, F. A. Tristão, F. S. S. Lordello, S. A. C. Silva, F. V. Mattos, Anais II Simp. Bras. Tecnol. Argamassas, Salvador, BA (1997) 40.
 [5] N. I. W. Silva, L. M. Calarge, F. Chies, J. E. Mallmann, O. Zwonok, O., Anais 42º Cong. Bras. Cerâm., Poços de Caldas, SP (1998) 97.
 [6] A. S. Freire, J. F. Motta, Rochas de Qualidade **16**, 123 (1995) 98.
 [7] M. A. C. Caiado, A. S. F. Mendonça, Anais 18º Cong. Bras. Eng. Sanit. Amb., Salvador, BA (1995) 185.
 [8] NBR 7181, Solo, Análise Granulométrica, 1984.
 [9] G. A. Neves, Qual. Dout., UFPB (2001).
 [10] NBR 6459, Determinação do Limite de Liquidez, Método de Ensaio, 1984.
 [11] NBR 7180, Determinação do Limite de Plasticidade, Método de Ensaio, 1984.
 [12] P. Souza Santos, Ciência e Tecnologia de Argilas, 2ª Edição, Vol. I, Edgard Blücher, S. Paulo (1992) 408.
 [13] NBR 7170, Tijolo Maciço Cerâmico para Alvenaria, Especificações, 1983.
 [14] NBR 7171, Bloco Cerâmico para Alvenaria, Especificação, 1992.
 [15] H. C. Ferreira, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP (1973).
 [16] R. S. Macedo, Dissertação de Mestrado, DEQ-CCT-UFPB (1996).
 [17] L. F. A. Campos, H. C. Ferreira, R. S. Macedo, Cerâmica **45**, 295 (1999) 140.
 [18] C. M. F. Vieira, J. N. F. Holanda, D. G. Pinatti, Cerâmica **46**, 297 (2000) 15.
 [19] A. Salge, L. Barzaghi, Cerâmica **28**, 151 (1982) 45.
 [20] NBR 13818, Placas Cerâmicas para Revestimento: Métodos de Ensaio e Especificações, 1997.

(Rec. 26/02/2002, Ac. 03/05/2002)