



## Atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria

Romualdo R. Menezes<sup>1</sup>, Gelmires A. Neves<sup>1</sup>, Jozilene Souza<sup>1</sup>, Weyne A. Melo<sup>1</sup>, Heber S. Ferreira<sup>1</sup> & Heber C. Ferreira<sup>1</sup>

### RESUMO

A indústria do beneficiamento do caulim gera enorme quantidade de resíduos, descartados indiscriminadamente no meio ambiente; assim, este trabalho tem por objetivo analisar a viabilidade técnica e a atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para a produção de argamassas. Os resíduos foram caracterizados através da determinação de sua distribuição granulométrica e composição química, difração de raios X e análise térmica diferencial e gravimétrica; em seguida, determinou-se o índice de atividade pozolânica dos resíduos de caulim com a cal e o cimento Portland. Argamassas de cimento:cal:areia foram preparadas e o resíduo, na condição natural e após queima a 600 °C por 2 h, substituiu parcialmente o cimento nas proporções de 5, 10, 15 e 20% em massa. Corpos-de-prova foram moldados e determinada sua resistência a compressão simples. Conclui-se, com base nos resultados, que os resíduos são constituídos de caulinita, mica e quartzo e que a utilização do resíduo calcinado aumenta a resistência das argamassas após 28 dias de cura em até 150%.

**Palavras-chave:** reciclagem, reação pozolânica, caracterização

## Pozolanic activity of kaolin processing residues for use in masonry mortars

### ABSTRACT

The kaolin processing industry generates large amounts of waste, which is indiscriminately dumped in open-air sites. This work evaluates the technical suitability and pozzolanic activity of kaolin processing wastes for the production of mortars. The wastes were characterized by particle size distribution and chemical composition determination, X-ray diffraction and thermal differential and gravimetric analyses. The pozzolanic activity index was determined using lime and Portland cement. Cement:lime:sand mortars were formulated and the kaolin wastes replaced cement by 5, 10, 15 and 20% on weight basis. The kaolin wastes were used in their natural condition and after thermal treatment at 600 °C for 2 h. Test specimens were produced and their compression strength determined. The results indicated that the waste consists of quartz, kaolinite and mica, and that the use of the fired waste improves the mortar strength at 28 days by up to 150%.

**Key words:** recycling, pozzolanic reaction, characterization

<sup>1</sup> UAEMA/UFCEG, Av. Aprígio Veloso 882, Bodocongó, Campina Grande, PB, CEP 58109-970. Fone: (83) 3310-1183, Fax: (83) 3310-1178. E-mail: [romualdomenezes@dema.ufcg.edu.br](mailto:romualdomenezes@dema.ufcg.edu.br); [gelmires@dema.ufcg.edu.br](mailto:gelmires@dema.ufcg.edu.br); [jozilenedesouza@yahoo.com.br](mailto:jozilenedesouza@yahoo.com.br); [weyneam@hotmail.com](mailto:weyneam@hotmail.com); [heber@labdes.ufcg.edu.br](mailto:heber@labdes.ufcg.edu.br); [heber@dema.ufcg.edu.br](mailto:heber@dema.ufcg.edu.br)

## INTRODUÇÃO

O grande crescimento populacional e o elevado déficit habitacional em todo o mundo fazem com que um dos maiores desafios para o século XXI seja a necessidade de se obter materiais de construção com baixo consumo de energia e capazes de satisfazer aos anseios de infra-estrutura da população, sobretudo nos países em desenvolvimento (Anjos et al., 2003a).

Neste sentido, um dos grandes problemas com que se deparam as populações dos países em desenvolvimento é a falta de habitações dignas em virtude, principalmente, dos elevados preços dos materiais de construção (Lima Júnior et al., 2003); surge, então a necessidade de se utilizar materiais alternativos que sejam ecológicos, de baixo custo e com disponibilidade local (Anjos et al., 2003b), de modo a baratear os custos das habitações.

Vários pesquisadores (Dallacort et al., 2002; Bertolini et al., 2004; Monteiro et al., 2004; Menezes et al., 2005) se têm dedicado à busca de alternativas para baratear os materiais de construção; dentre essas alternativas se tem a utilização de resíduos minerais como materiais de baixo custo e que possibilitam obter produtos com desempenho técnico semelhante àqueles produzidos com matérias-primas convencionais (Menezes et al., 2002a).

As maiores vantagens da utilização de resíduos minerais na produção de materiais de construção são: a sua abundância, particularmente nas regiões que concentram empresas mineradoras e de beneficiamento mineral; a diversificação de matérias-primas e a possibilidade de redução dos custos de produção (Menezes et al., 2002b).

A inserção dos resíduos em um ciclo produtivo representa não apenas uma alternativa de barateamento da produção, mas também, uma opção de reciclagem e reutilização desses materiais, sendo interessante tanto no aspecto ambiental como no econômico (Andreola et al., 2002). A reciclagem e a reutilização estão entre as principais alternativas na busca pelo desenvolvimento sustentável, possibilitando a economia de matérias-primas não renováveis e de energia, reduzindo os impactos ambientais dos resíduos à sociedade moderna.

A utilização de resíduos com atividade pozolânica para a produção de materiais de construção como argamassas, cimentos e blocos de solo-cimento, pode trazer ainda outros benefícios ao processo de reciclagem. A principal propriedade de uma pozolana é a sua capacidade de reagir e de se combinar com o hidróxido de cálcio, formando compostos estáveis de poder aglomerante, tais como: silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (Zampieri, 1989); desta forma, resíduos com atividade pozolânica podem ser utilizados em substituição ao cimento, contribuindo para a redução dos custos energéticos de produção ou agindo em sinergia com o cimento na melhora das propriedades mecânicas do produto final.

Ressalta-se que, além da ação química, as pozolanas finamente pulverizadas possuem ação física (tal como vários resíduos), uma vez que atuam nos concretos e argamassas como material de preenchimento, melhorando o empacotamento do sistema (filler effect). Tal fato é particularmente

importante na densificação do sistema e no conseqüente aumento de resistência do material final (Baronio & Binda, 1997; Farias Filho et al., 2000).

Vem-se observando nos últimos anos, em todo o mundo, crescente interesse no uso de pozolanas, aditivos minerais e materiais alternativos como substitutos do cimento Portland para a produção de argamassas e concretos (Wild et al., 1996; Farias Filho et al., 2000; Kula et al., 2002; Pacewska et al., 2002; Oliveira & Barbosa, 2006; Vargas et al., 2006).

O resíduo do beneficiamento do caulim é um material alternativo que, aparentemente, apresenta elevado potencial para utilização em argamassas, em virtude de suas características físicas e mineralógicas (Silva et al., 2001; Rocha, 2005). A extração e o beneficiamento do caulim primário, por conseqüência do alto teor de materiais acessórios no mineral, produzem enormes quantidades de resíduos, fazendo com que cerca de 80 a 90% do volume total explorado sejam descartados no meio ambiente como resíduo.

Dois tipos de resíduo são gerados durante o processamento do caulim primário, um oriundo da etapa de separação do quartzo do minério caulim, que representa cerca de 70% do total do resíduo produzido e é gerado pelas empresas mineradoras na etapa logo após a extração, sendo comumente chamado resíduo grosso (Menezes et al., 2007a); o outro resíduo se origina na segunda fase do beneficiamento, que objetiva separar a fração fina do minério, purificando o caulim e gerando um resíduo denominado, em geral, resíduo fino (Menezes et al., 2007a; 2007b). Esses resíduos são, quase sempre, descartados indiscriminadamente em campo aberto, desprezando-se as exigências de utilização de aterros e provocando uma série de danos ao meio ambiente, com impactos ambientais ao meio físico e biótico e à saúde da população residente nas regiões circunvizinhas aos “depósitos” de resíduos; isso faz com que os moradores rurais, pequenos agricultores em geral, sejam os mais afetados pelo inadequado gerenciamento de resíduos da indústria do beneficiamento do caulim.

Todavia, a abordagem ambiental mais recente objetiva exatamente a conservação e o desenvolvimento sustentável, com a minimização do descarte dos materiais oriundos das atividades industriais; então, alternativas de reciclagem e/ou reutilização devem ser investigadas e, sempre que possível, implementadas (Raupp-Pereira et al., 2006).

Visando buscar alternativas para o impacto ambiental na região do entorno das indústrias de beneficiamento de caulim e produzir materiais com custo reduzido para construções rurais e habitações populares, este trabalho tem por objetivo analisar a atividade pozolânica e a viabilidade dos resíduos do beneficiamento do caulim para a produção de argamassas com vistas à alvenaria.

## MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho se utilizaram os seguintes materiais: resíduo grosso do beneficiamento do caulim (RCG) e resíduo fino do beneficiamento do caulim (RCF), resultantes dos primeiro e segundo processos de beneficiamento do caulim,

respectivamente, sendo o caulim oriundo da Província Pegmatítica da Borborema. Os resíduos de caulim foram provenientes de indústrias de beneficiamento existentes no município de Juazeirinho, PB, pólo produtor de caulim do Estado; as amostras foram coletadas através da técnica de quarreamento e, em seguida, cominuídas e passadas em peneira ABNT nº 200 (abertura de 0,074 mm). Foram utilizados, também: cal calcítica hidratada, cedida pela empresa Limoeiro do Norte, da cidade de Limoeiro do Norte, CE; areia, como agregado miúdo, oriunda do Rio Paraíba, passada em peneira ABNT nº 4 (abertura de 4,8 mm) e cimento Portland composto com filler, CII-F NBR 11578 (ABNT, 1991) da marca Nassau, fabricado pela Companhia de Cimento Nassau, Recife, PE, para a formulação das argamassas.

Os resíduos foram caracterizados através de determinação de sua distribuição de tamanho de partículas (Cilas, 1064LD), análise química por fluorescência de raios X (Shimadzu EDX-90), difração de raios X (Shimadzu, XRD 6000) e análise térmica diferencial e gravimétrica (BP Engenharia RB3020).

Após a caracterização se avaliaram as atividades pozolânicas dos resíduos do beneficiamento do caulim, conforme as normas NBR 5751 (ABNT, 1992a) e NBR 5752 (ABNT, 1992b). Os índices de atividade pozolânica (IAP) foram determinados com os resíduos no estado natural e após calcinação na temperatura de 600 °C durante 2 h; o ensaio para determinar o índice de atividade pozolânica é uma medida direta do grau de pozolanicidade através da determinação da resistência à compressão simples, segundo a NBR 7215 (ABNT, 1996) de corpos-de-prova de argamassa preparada com o material em estudo, cal, areia e água, após 7 dias de cura. O ensaio para determinação da atividade pozolânica com o cimento fornece o índice de atividade pozolânica, dado pela relação entre a resistência a compressão simples, segundo a NBR 7215 (ABNT, 1996) de corpos-de-prova de argamassa preparada com o material em estudo, cimento, areia e água com o material pozolânico e a resistência à compressão simples da argamassa de referência após 28 dias de cura, devendo ser de no mínimo 75%.

Realizada a avaliação da atividade pozolânica dos resíduos, as argamassas foram preparadas nos traços de 1:4:28 (cimento:cal:areia), para assentamento de blocos e de 1:2:9 (cimento:cal:areia), para revestimentos argamassados. Às argamassas alternativas se incorporaram teores de resíduos (mistura de RCG e RCF) nas proporções de 5, 10, 15 e 20%, em massa, em substituição ao cimento Portland. Os resíduos RCG e RCF foram utilizados na forma de mistura na proporção de 50% de RCG e 50% de RCF, tanto na condição natural como após calcinação a 600 °C por 2 h.

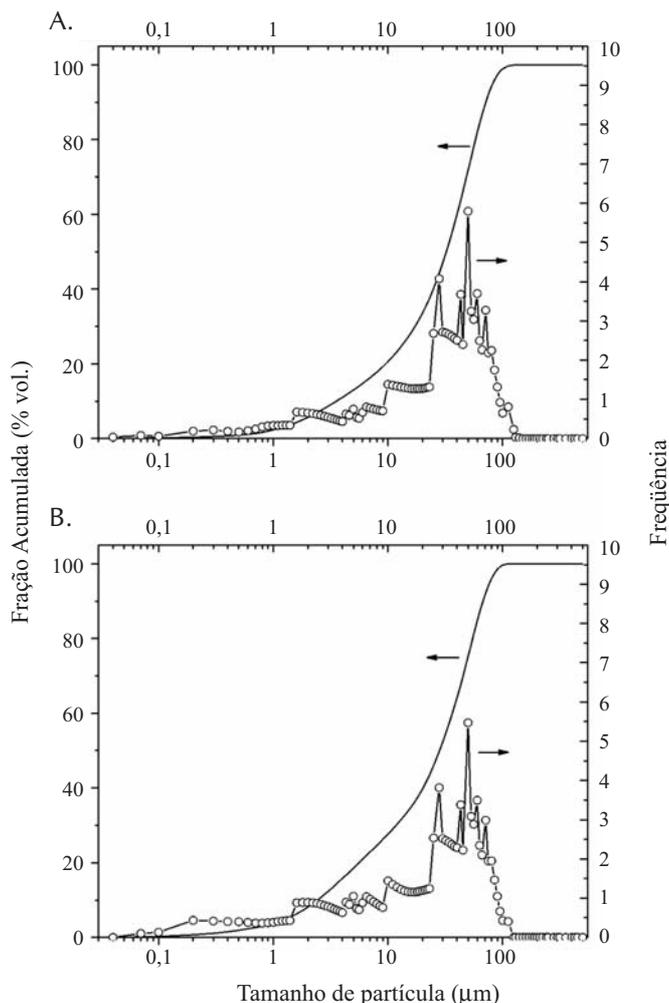
Corpos-de-prova cilíndricos, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, foram moldados de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996) e, em seguida, curados em câmara úmida, por 28 e 63 dias. Após a cura se determinou as resistências a compressão simples (RCS), de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996). Para o ensaio de resistência foram moldados 5 corpos-de-prova para cada composição e período de cura. Após cada período de cura os corpos

foram ensaiados em equipamento (prensa Contenco), calibrado periodicamente, conforme a NBR 6674 (ABNT, 1999).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As distribuições de tamanho de partículas do resíduo grosso e fino do beneficiamento do caulim (RCG e RCF respectivamente) são apresentadas na Figura 1, na qual se observa que os resíduos apresentam após cominuição largas e semelhantes distribuições granulométricas, com uma grande concentração das partículas em torno dos 50-60  $\mu\text{m}$ . O RCG possui tamanho médio de partícula de 35,36  $\mu\text{m}$  e  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{90}$  de 3,54, 32,26 e 71,29  $\mu\text{m}$ , respectivamente; enquanto o RCF apresenta um tamanho médio de partícula de 31,71  $\mu\text{m}$  e  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{90}$  de 2,43, 28,21 e 67,47  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

Apesar do alto teor de partículas com dimensão inferior a 45  $\mu\text{m}$  nos dois resíduos, cerca de 68-70% em volume, verifica-se, comparativamente aos dados de cimentos Portland CII-F presentes na literatura (Farias Filho et al., 2000; Lima Júnior et al., 2003; Rocha, 2005), que os resíduos apresentam distribuição mais grosseira que a dos cimentos Portland



**Figura 1.** Distribuição granulométrica do resíduo grosso do caulim (RCG), A e resíduo fino do caulim (RCF), B

que, em geral, mostram teor de aproximadamente 95% das partículas com dimensões inferiores a 45  $\mu\text{m}$ . Por outro lado e de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 1992c) e a ASTM (1992), um material para ser considerado pozolânico deve apresentar um máximo de 34% retidos na peneira ABNT nº 325, que apresenta abertura de 45  $\mu\text{m}$ ; assim, apesar de ser mais grosso que os cimentos comerciais observados, os resíduos apresentam características granulométricas de acordo com a normalização para uso como pozolanas.

Apresenta-se na Tabela 1 as composições químicas dos resíduos analisados e se nota que os resíduos apresentam teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , superando o valor mínimo de 70% requerido na NBR 12653 (ABNT, 1992c) e na ASTM (1992). Observa-se, também, que a perda ao fogo, inferior a 10%, o teor de  $\text{MgO}$ , inferior a 3% e o teor de álcalis em  $\text{Na}_2\text{O}$ , inferior a 1,5%, também atendem às exigências da normalização (ABNT, 1992c; ASTM, 1992).

Constata-se que os resíduos apresentam elevado teor de  $\text{K}_2\text{O}$ , o que, pela formação geológica de onde é extraído o caulim, deve estar associado a micas e feldspatos presentes no material; este elevado teor de  $\text{K}_2\text{O}$ , caso provenha realmente de mica ou feldspatos, não deve interferir na sua aplicação em argamassas, porque esse potássio estará “imobilizado” na estrutura desses materiais.

**Tabela 1.** Composição química dos resíduos estudados (% em massa)

	PF <sup>a</sup>	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	CaO	MgO	$\text{Na}_2\text{O}$
RCG	7,65	70,19	15,12	0,64	6,10	- <sup>b</sup>	- <sup>b</sup>	- <sup>b</sup>	0,27
RCF	9,30	51,25	32,65	0,91	5,56	0,12	- <sup>b</sup>	- <sup>b</sup>	- <sup>b</sup>

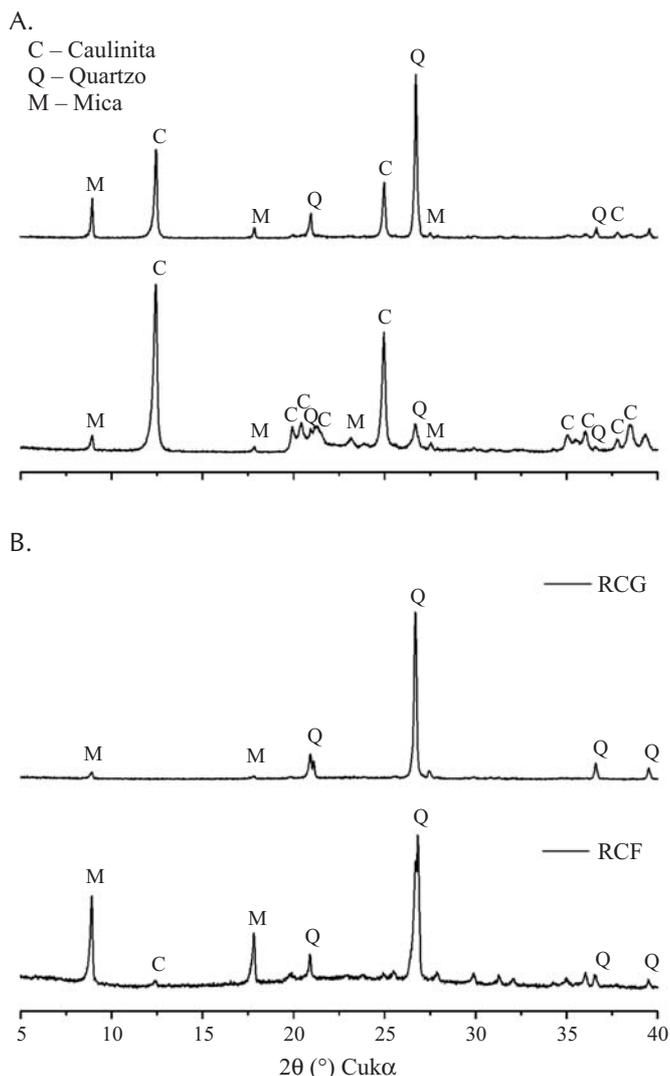
<sup>a</sup> perda ao fogo; <sup>b</sup> traços

Os padrões de difração de raios X dos resíduos estudados, Figura 2, indicam que ambos os resíduos são constituídos de mica, caulinita e quartzo; esses resultados são semelhantes aos obtidos por Almeida (2006) ao estudar resíduos de caulins da Província Pegmatítica da Borborema.

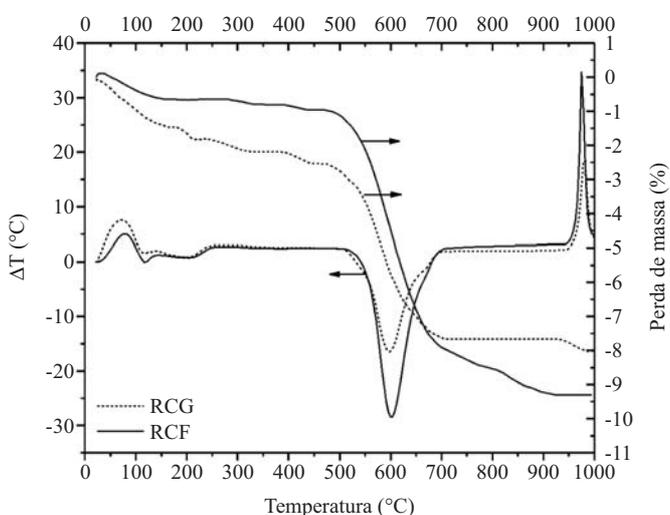
Com base nos resultados obtidos com a difração de raios X, tem-se que o elevado teor de  $\text{K}_2\text{O}$  nos resíduos é oriundo da mica presente nesses materiais. Os dados da difração de raios X, juntamente com a composição química dos resíduos, Tabela 1, indicam que o RCG é constituído predominantemente de quartzo e pequenos teores de caulinita e mica, enquanto o RCF é constituído predominantemente de caulinita.

As curvas das análises térmica diferencial (ATD) e gravimétrica (TG) estão apresentadas na Figura 3, observando-se que os resíduos têm comportamento térmico semelhante, com picos endotérmicos por volta de 110 °C associados à eliminação de água livre, picos endotérmicos em torno de 600 °C, relacionados à desidroxilação da caulinita e da mica e picos exotérmicos por volta de 975-980 °C, característicos da nucleação da mullita.

As curvas da análise térmica gravimétrica dos resíduos evidenciam uma perda de massa distinta entre os dois resíduos, com o RCF apresentando perda de massa muito mais acentuada na região relacionada à desidroxilação dos argilominerais, o que indica que o teor de argilominerais é maior no RCF, tal como já observado.



**Figura 2.** Padrão de difração de raios X dos resíduos estudados na condição natural (A) dos resíduos após calcinação (B)



**Figura 3.** Curvas de análise térmica diferencial e gravimétrica dos resíduos estudados

Observa-se, com base nos resultados de caracterização, que os resíduos apresentam não apenas granulometria e composição mineralógica que, por sua vez, indicam um elevado potencial de utilização em argamassas, mas também, algum teor de argilominerais, particularmente o RCF, evidenciando que se pode após calcinação, produzir materiais com maior atividade pozolânica, tal como na produção da metacaulinita através da queima do caulim e desidroxilação da caulinita. Referidos dados permitem agregar maior valor ao resíduo e preservar matérias-primas de melhor qualidade, como o caulim.

Os padrões de difração de raios X dos resíduos após calcinação a 600 °C por 2 h, Figura 2, evidenciam que a estrutura cristalina da caulinita presente no RCG foi totalmente destruída com a queima e no RCF restou apenas uma pequena quantidade de caulinita; nota-se que a queima produziu metacaulinita com a desidroxilação da caulinita, o que, provavelmente aumentará, em muito, a atividade pozolânica dos resíduos.

Os índices de atividade pozolânica dos resíduos de caulim com cal e com cimento, estão apresentados nas Tabelas 2. Observa-se que as argamassas contendo resíduos na condição natural apresentam resistência à compressão simples inferior a 1 MPa aos 7 dias de cura, mas, segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992c), são considerados pozolânicos os materiais que apresentam o índice de atividade pozolânica com cal, aos 7 dias, igual ou superior a 6,0 MPa. De acordo com esta especificação, os resíduos de caulim calcinados podem ser considerados materiais pozolânicos, pois apresentam valores superiores àquele limite, fato relacionado à desidroxilação da caulinita após tratamento a 600 °C por 2 h, que provocou modificação nas suas estruturas cristalinas, transformando-as em amorfas ou com alto grau de desordem estrutural (Souza Santos, 1992), o que, em ambos os casos, aumenta a sua reatividade e lhes fornece um caráter pozolânico.

Tabela 2. Atividade pozolânica com cal e com cimento

Resíduos	RCS <sup>a</sup> (MPa) <sup>b</sup>		IAP <sup>c</sup> (%) <sup>d</sup>
	7 dias	28 dias	28 dias
RCG	0,60	2,45	87,52
RCF	0,47	2,90	79,43
50% RCG+50% RCF	0,46	2,55	78,07
50% RCG+50% RCF (calcinado)	15,63	18,68	98,80

<sup>a</sup> RCS – Resistência à compressão simples; <sup>b</sup> atividade pozolânica com cal; <sup>c</sup> IAP – Índice de atividade pozolânica; <sup>d</sup> atividade pozolânica com cimento

Analisando-se os resultados da Tabela 2, tem-se que os índices de atividade pozolânica com cimento variam de 78 a 98,8%, sendo a mistura dos resíduos calcinados o material que apresenta o maior índice de atividade pozolânica. Segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992c) materiais com índice superior a 75% com o cimento podem ser considerados pozolânicos; assim, observa-se que os resíduos naturais e após calcinação mostram valores de atividade com cimento de acordo com os requisitos da normalização. A maior atividade dos resíduos calcinados está relacionada, como já referido, à desidroxilação do argilomineral caulinita presente no resíduo.

Os valores das resistências à compressão simples dos corpos-de-prova das argamassas 1:4:28 (cimento:cal:areia) e 1:2:9 (cimento:cal:areia), após período de cura de 28 e 63 dias, estão apresentados na Figura 4.

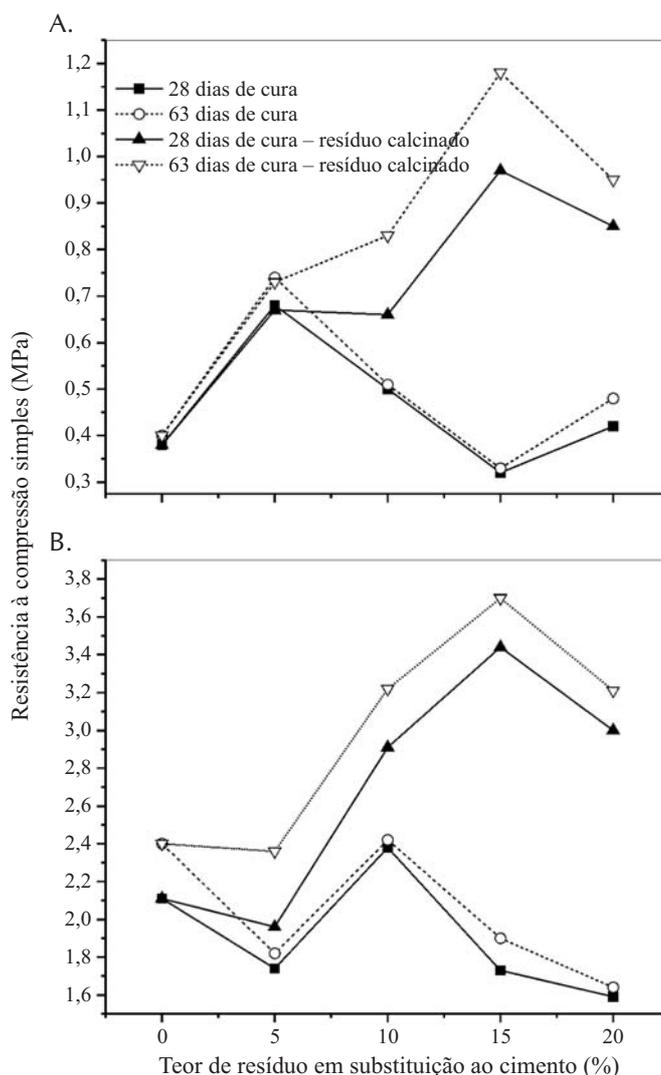


Figura 4. Resistência a compressão simples dos corpos-de-prova contendo resíduos naturais e calcinados, A) argamassa 1:4:28 (assentamento de blocos de alvenaria) incorporada com resíduos (50% RCG + 50% RCF), B) argamassa 1:2:9 (revestimento argamassado) incorporada com resíduos (50% RCG + 50% RCF)

Verifica-se, com base na Figura 4, que a incorporação de resíduos RCG + RCF, tanto na condição natural como após a calcinação, possibilita aumentar a resistência da argamassa. Quando se utilizam resíduos naturais, o maior aumento na resistência, superior a 78% aos 28 dias de cura, ocorre com a adição de 5% de resíduos em substituição ao cimento; já quando se utilizam resíduos calcinados, o aumento mais elevado na resistência ocorre com a substituição de 15% do cimento, sendo superior a 150% aos 28 dias de cura, em relação à argamassa sem resíduo.

De forma geral, as argamassas contendo resíduos calcinados apresentam resistência superior àquelas que contêm resíduos naturais, fato este relacionado à maior atividade

pozolânica do resíduo calcinado; acredita-se que, neste sentido e pelas características físicas dos resíduos, o aumento na resistência das argamassas contendo resíduo natural está bastante associado a uma ação física dos resíduos, que produz um arranjo mais eficiente na interface agregado-pasta de cimento, densificando esta zona e, conseqüentemente, aumentando a resistência da argamassa (Baronio & Binda, 1997). Por outro lado, o aumento na resistência das argamassas contendo resíduos calcinados está relacionado tanto ao efeito de densificação como à ação química dos resíduos, já que apresentam elevada atividade pozolânica.

Comparando-se os resultados de resistência obtidos para as argamassas aos 28 dias de cura com a normalização NBR 13281 (ABNT, 1995), verifica-se que elas podem ser classificadas como argamassas Tipo I, em virtude de apresentarem resistência superior a 0,1 MPa e inferior a 4 MPa. Os resultados de resistência obtidos são superiores àqueles apresentados por Rocha (2005), o que evidencia que a utilização de resíduos na forma de uma mistura de RCG e RCF e após calcinação, possibilita produzir argamassas com desempenho mecânico superior àquelas obtidas utilizando-se apenas RCF na condição natural.

Conclui-se, através da Figura 4, que a incorporação dos resíduos na condição natural provocou diminuições na resistência da argamassa de traço 1:2:9 quando da utilização de 5, 15 e 20% de resíduos. Uma melhora na resistência em relação à argamassa sem resíduo, só foi observada no teor de 10% de resíduos e após 28 dias de cura, sendo tal valor de apenas 12%; este comportamento mecânico é diferente do observado com a utilização de resíduos no estado natural na argamassa de traço 1:4:28, quando se observam aumentos significativos na resistência com a incorporação de 5 e 10% de resíduos, fato que pode estar relacionado com as características distintas de empacotamento das argamassas 1:2:9 e 1:4:28, quando da adição do resíduo.

Por outro lado, a utilização dos resíduos após calcinação possibilita elevar consideravelmente a resistência da argamassa, observando-se aumentos superiores a 60%, aos 28 dias de cura, ao se utilizar 15% de resíduos. Este aumento na resistência é semelhante ao constatado na argamassa de traço 1:4:28, quando da incorporação de resíduos calcinados atingindo-se, inclusive, a maior resistência nas duas argamassas quando da utilização de 15% de resíduos em substituição ao cimento.

Tem-se, na Figura 4, que as argamassas podem ser classificadas como sendo do Tipo I, de acordo com a normalização NBR 13281 (ABNT, 1995), por apresentarem resistência superior a 0,1 MPa e inferior a 4,0 MPa; observa-se ainda que os resultados são bem superiores àqueles obtidos por Rocha (2005), ao utilizar resíduo fino na condição natural para a produção de argamassas.

Em alguns estudos (Farias Filho et al., 2000; Coimbra et al., 2002; Oliveira & Barbosa, 2006) foram observadas melhoras na resistência a compressão simples de argamassas de cimento:areia, quando da utilização de materiais pozolânicos à base de metacaulinita (produzidos pela desidroxilação de caulinitas presentes em caulins ou em resíduos caulínticos) em substituição parcial ao cimento. Verificou-se que o

material pozolânico poderia substituir o cimento em teores de até 40%, representando grande economia energética, já que o material pozolânico requer temperaturas de queima significativamente inferiores àquelas utilizadas para produzir clínquer, fato que leva a grandes implicações ecológicas e econômicas, favorecendo o desenvolvimento sustentável e possibilitando a redução dos custos dos materiais de construção; nota-se que a presente pesquisa vem ao encontro dos dados da literatura, na busca por alternativas ecológica e energeticamente mais eficientes para a produção de materiais de construção de baixo custo, evidenciando a adequação de uma matéria-prima alternativa com elevada potencialidade para produção de pozolanas e utilização em argamassas.

## CONCLUSÕES

1. Os resíduos do beneficiamento do caulim são constituídos por caulinita, quartzo e mica e apresentam distribuição granulométrica e composição química que se encontram de acordo com os requisitos da normalização para materiais pozolânicos.
2. Os ensaios que determinam o índice de atividade pozolânica com a cal e com o cimento demonstraram que os resíduos na condição natural apresentam baixa atividade pozolânica, enquanto os resíduos após calcinação indicam índices de atividade acima do exigido pelas respectivas normas.
3. As resistências a compressão simples das argamassas contendo resíduos calcinados foram superiores às das argamassas sem resíduo, havendo grande potencial para utilização dos resíduos em argamassas em substituição parcial ao cimento.

## AGRADECIMENTOS

À FAPESQ/MCT/CNPq (edital 001/06, projeto 004/06) pelo apoio financeiro.

## LITERATURA CITADA

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11578, Cimento portland composto, Rio de Janeiro: ABNT, 1991. 5p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5751, Índice de atividade pozolânica com a cal. Rio de Janeiro: ABNT, 1992a. 3p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5752, Materiais Pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland. – Índice de atividade pozolânica com o cimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1992b. 5p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12653, Materiais pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1992c. 5p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13281, Argamassa industrializada para assentamento de paredes e revestimentos de paredes e tetos – Especificação e métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 1995. 7p.

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7215, Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996. 8p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6674, Materiais metálicos – Calibração de instrumentos de medição de força utilizados na calibração de máquinas de ensaios uniaxiais. Rio de Janeiro: ABNT, 1999. 16p.
- Almeida, R. R. Reciclagem de resíduo de caulim e granito para produção de blocos e telhas. Campina Grande: UFCG, 2006. 116p. Dissertação Mestrado
- Andreola, F.; Barbieri, L.; Corradi, A.; Lancellotti, I.; Manfredini, T. Utilisation of municipal incinerator grate slag for manufacturing porcelainized stoneware tiles manufacturing. *Journal of the European Ceramic Society*, v.22, p.1457-1462, 2002.
- Anjos, M. A. S.; Ghavami, K.; Barbosa, N. P. Compósitos à base de cimento reforçado com polpa celulósica de bambu. Parte II: Uso de resíduos cerâmicos na matriz. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n.2, p.346-349, 2003a.
- Anjos, M. A. S.; Ghavami, K.; Barbosa, N.P. Compósitos à base de cimento reforçados com polpa celulósica de bambu. Parte I: Determinação do teor de reforço ótimo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n.2, p.339-345, 2003b.
- ASTM – American Society for Testing and Materials. ASTM 618C Fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete. Philadelphia: ASTM, 1992. 3p.
- Baronio, G.; Binda, L. Study of the pozzolanicity of some bricks and clays. *Construction and Building Materials*, v.11, n.1, p.41-46, 1997.
- Bertolini, L.; Carsana, M.; Cassago, D.; Curziob, A. Q.; Collepardi, M. MSWI ashes as mineral additions in concrete. *Cement and Concrete Research*, v.34, p.1899-1906, 2004.
- Coimbra, M. A.; Santos, W. N. dos; Morelli, M. R. Recuperação de resíduos inorgânicos para a construção civil. *Cerâmica*, v.48, n.306, p.44-48, 2002.
- Dallacort, R.; Lima Júnior, H. C.; Willrich, F. L.; Barbosa, N. P. Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.3, p.511-518, 2002.
- Farias Filho, J.; Rolim, J. S.; Toledo Filho, R. D. Potencialidades da metacaolinita e do tijolo queimado moído como substitutos parciais do cimento Portland. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, n.3, p.437-444, 2000.
- Kula, I.; Olgun, A.; Sevinc, V.; Erdogan, Y. An investigation on the use of tincal ore waste, fly ash, and coal bottom ash as Portland cement replacement materials. *Cement and Concrete Research*, v.32, p.227-232, 2002.
- Lima Júnior, H. C.; Willrich, F. L.; Barbosa, N. P. Structural behavior of load bearing brick walls of soil-cement with the addition of ground ceramic waste. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n.3, p.552-558, 2003.
- Menezes, R. R.; de Almeida, R. R.; Santana, L. N. L.; Ferreira, H. S.; Neves, G. A.; Ferreira, H. C. Utilização do resíduo do beneficiamento do caulim na produção de blocos e telhas cerâmicos. *Revista Matéria*, v.12, n.1, p.226-236, 2007a.
- Menezes, R. R.; de Almeida, R. R.; Santana, L. N. L.; Neves, G. A.; Lira, H. L.; Ferreira, H. C. Análise da co-utilização do resíduo do beneficiamento do caulim e serragem de granito para produção de blocos e telhas cerâmicos. *Cerâmica*, v.53, p.192-199, 2007b.
- Menezes, R. R.; Ferreira, H. S.; Neves, G. A.; Lira, H. L.; Ferreira, H. C. Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles. *Journal of the European Ceramic Society*, v.25, p.1149-1163, 2005.
- Menezes, R. R.; Neves, G. A.; Ferreira, H. C. O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.2, p.303-317, 2002a.
- Menezes, R. R.; Neves, G. A.; Ferreira, H. C.; Lira, H. L. Recycling of granite industry waste from the northeast region of Brazil. *Environmental Management and Health*, v.13, p.134-142, 2002b.
- Monteiro, S. N.; Peçanha, L. A.; Vieira, C. M. F. Reformulation of roofing tiles body with addition of granite waste from sawing operations. *Journal of the European Ceramic Society*, v.24, p.2349-2356, 2004.
- Oliveira, M. P.; Barbosa, N. P. Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland em argamassas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n.2, p.490-496, 2006.
- Pacewska, B.; Wilinska, I.; Bukowska, M.; Nocun-Wczelik, W. Effect of waste aluminosilicate material on cement hydration and properties of cement mortars. *Cement and Concrete Research*, v.32, p.1823-1830, 2002.
- Raupp-Pereira, F.; Hotza, O.; Segadães, A. M.; Labrincha, J. A. Ceramic formulations prepared with industrial wastes and natural sub-products. *Ceramics International*, v.32, n.2, p.173-179, 2006.
- Rocha, A. K. A. Incorporação de resíduo de caulim em argamassa de alvenaria. Campina Grande: UFCG, 2005, 87p. Dissertação Mestrado
- Silva, A. C.; Vidal, M.; Pereira, M. G. Impactos ambientais causados pela mineração e beneficiamento de caulim. *Revista Escola de Minas*, v.54, n.2, p.133-136, 2001.
- Souza Santos, P. Ciência e tecnologia de argilas. v.1, 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1992. 408p
- Vargas, A. S. de; Masuero, A. B.; Vilela, A. C. F. Investigations on the use of electric-arc furnace dust (EAFD) in pozzolan-modified portland cement I (MP) pastes. *Cement and Concrete Research*, v.36, p.1833-1841, 2006.
- Wild, S.; Khatib, J. M.; Jones, A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. *Cement and Concrete Research*, v.26, n.10, p.1537-1544, 1996.
- Zampieri, V. A. Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas. São Paulo: USP, 1989. 191p. Dissertação Mestrado