

Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas

(Granite sawing waste recycling for mortar production)

R. R. Menezes, J. Farias Filho, H. S. Ferreira, G. A. Neves, H. C. Ferreira
Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande
Av. Aprígio Veloso 882, Bodocongó, Campina Grande, PB 58 109-970
romualdomenezes@dema.ufgc.edu.br, gelmires@dema.ufgc.edu.br

Resumo

O volume de resíduos inorgânicos gerados a cada ano vem crescendo em todo mundo e apresenta um dos maiores problemas da sociedade moderna. Este trabalho tem por objetivo analisar a viabilidade de utilização do resíduo da serragem do granito e de resíduos da construção civil como materiais alternativos para a produção de argamassas. Os resíduos foram caracterizados física e mineralogicamente por meio da determinação de distribuição e tamanho de partículas, massa e área específica, composição química, difração de raios X e análise térmica diferencial. Foi determinado o índice de atividade pozolânica com cal dos resíduos da construção. Foram formuladas composições de argamassas substituindo parcialmente a cal pelos resíduos, e moldados corpos-de-prova. Os corpos-de-prova foram curados por 7, 14, 28 e 60 dias e, em seguida, foi determinada a resistência à compressão simples. Os resíduos apresentam elevados teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 e possuem as fases cristalinas quartzo, mica, feldspato, carbonato de cálcio e óxido de ferro. A substituição do aglomerante por resíduos na produção de argamassas pode ser efetuada com sucesso em teores de até 50% e os resíduos com atividade pozolânica propiciam aumentos significativos na resistência à compressão simples das argamassas.

Palavras-chave: reciclagem, resíduo da construção, resíduo de granito, argamassa.

Abstract

Around the world the amount of inorganic wastes has increased dramatically and is one of the most important issues for modern society. This work has as aim to analyze the suitability of granite sawing waste and construction wastes as alternative raw materials for the production of mortars. The wastes were physically and mineralogical characterized by the determination of particle size distribution, specific mass and specific area, chemical composition, X-ray diffraction, and differential thermal analysis. The pozzolanic activity index with hydrated lime of construction wastes was determined. Mortar compositions were formulated replacing the lime by waste. Test samples were produced, cured for 7, 14, 28 and 60 days, and characterized in terms of compression strength. The results show that the wastes are composed by high amounts of SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , and presented quartz, mica, feldspar, calcite and iron oxide as crystalline phases. It could also be concluded that it is possible to replace up to 50% of the lime by wastes, and that the pozzolanic wastes improve the compression strength of the mortars.

Keywords: recycling, construction wastes, granite sawing wastes, mortar.

INTRODUÇÃO

O grande desenvolvimento tecnológico dos últimos anos aumentou significativamente a produção de bens industrializados e volume de recursos minerais explorados. Associado a essa grande expansão produtiva houve um enorme aumento na quantidade de resíduos produzidos, fazendo com que milhões de toneladas de resíduos inorgânicos sejam produzidas a cada dia em todo mundo [1, 2]. Tradicionalmente esses resíduos são descartados indiscriminadamente no meio ambiente ou depositados em aterros. No entanto, alternativas de reciclagem e reutilização devem ser sempre pensadas como as primeiras alternativas para o seu gerenciamento, a fim de buscar re-introduzir-los no ciclo produtivo [2-4]. Já é um consenso que o gerenciamento dos resíduos é uma das questões mais importantes tanto para

a saúde pública como para o desenvolvimento industrial no século 21. O que faz com que o desenvolvimento de novas tecnologias de reciclagem de resíduos sólidos tenha grande importância não apenas ambiental, mas também econômica [5-7] nos dias atuais.

O setor da construção civil é um segmento que se destaca pelo elevado desperdício de material e geração de resíduos. Tais resíduos são descartados em aterros, no entanto, na estrutura das grandes cidades não há mais espaços para essas disposições, em virtude da aglomeração de pessoas e alta valorização do espaço físico [8]. O resíduo da construção e demolição é composto por fragmentos ou restos de tijolos, argamassas, concretos, aço, madeiras, gesso, etc. Estudos evidenciaram [9, 10] que esse resíduo é uma fonte de materiais alternativos de grande utilidade e que sua reciclagem pode reduzir custos, consumo de matérias-primas e os gastos com

energia do setor da construção civil [9, 10]. O segmento de beneficiamento mineral também gera elevadas quantidades de resíduos em todo mundo. O beneficiamento do granito para produção de chapas, produz um significativo volume de rejeito na forma de “lama” proveniente da serragem dos blocos. Essa lama é constituída pelo pó oriundo da serragem e por partículas de granalha e cal que são utilizados durante o processo, apresentando elevados teores de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e CaO . A lama do beneficiamento do granito é, em geral, descartada em córregos, ravinas e lagos, havendo a formação de grandes depósitos a 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 [5, 11]. 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 [12]. 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, e a redução dos impactos ambientais dos resíduos na sociedade moderna. Aliado às necessidades de reciclagem e reutilização dos resíduos inorgânicos, há o grande crescimento populacional e o elevado déficit habitacional em todo o mundo, que acentuam a necessidade de se obter materiais de construção com baixo custo e capazes de satisfazer aos anseios de infra-estrutura da população, sobretudo nos países em desenvolvimento [13]. A incorporação dos resíduos da construção civil e do beneficiamento mineral em produtos para construção civil vem se mostrando uma ótima alternativa para diversificar a oferta de matérias-primas e para a economia de recursos naturais [14-16]. Nesse sentido, vários pesquisadores [15-19] têm se dedicado à busca de alternativas para baratear os materiais de construção, dentre essas, tem-se o uso de resíduos minerais e da construção. Seguindo essa abordagem, observou-se [20] que dependendo da composição química e distribuição do tamanho de partículas, vários resíduos industriais podem ser usados em argamassas para a construção civil, seja em substituição parcial ao cimento ou ao agregado miúdo. Diversos estudos [8, 20-24] vêm apresentando sucessos na utilização de resíduos inorgânicos para a produção de argamassas, evidenciando sua adequabilidade como matérias-primas alternativas para

a construção civil. Assim, este trabalho tem por objetivo analisar a viabilidade de utilização do resíduo da serragem do granito e de resíduos da construção civil como materiais alternativos para a produção de argamassas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados os seguintes materiais: resíduo da serragem do granito, identificado por RG (cedido pela empresa Fuji S.A., Campina Grande, PB); três resíduos da construção civil, coletados em obras de edificações em Campina Grande, PB e identificados por RC-01, RC-02 e RC-03; cal hidratada cálcica, CH-I [25] (Carbomil, Fortaleza, CE) e areia (do Rio Paraíba, município de Barra de Santana, PB), com diâmetro máximo de 1,2 mm (determinado segundo normalização [26]) e módulo de finura de 0,36% (determinado segundo normalização [27]). A composição química da cal, determinada por via úmida, está apresentada na Tabela I.

Os resíduos foram coletados segundo normalização [28]. Após coleta os resíduos da construção passaram por um processo de separação de materiais para retirada de materiais não cerâmicos, como madeira, ferro, plásticos, etc. Em seguida o resíduo da serragem do granito e os resíduos da construção foram moídos, passados em peneira malha ABNT 200 (0,074 mm) e caracterizados através de análise granulométrica por espalhamento laser (Cilas 1064), determinação da massa específica real [29], área específica pelo método do permeâmetro de Blaine [30], análise química via úmida, difração de raios X (Shimadzu XRD 6000) e análise térmica diferencial (BP Engenharia 3020).

Após caracterização, foi determinado o índice de atividade pozolânica com cal dos resíduos da construção civil, conforme normalização [31]. O ensaio para determinar o índice de atividade pozolânica com cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) é uma medida direta do grau de pozolanicidade através da determinação da resistência à compressão simples (segundo a normalização [31]) de corpos-de-prova de argamassa padrão preparada com o material em estudo, cal, areia e água, após 7 dias de cura.

Em seguida, foram preparadas argamassas utilizando a proporção 1:3 (uma parte de cal e três de areia), usando fator água/aglomerante de 0,48. As argamassas contendo resíduo foram obtidas incorporando teores de 25, 35 e 50%

Tabela I - Composição química dos materiais (% massa).
[Table I - Chemical composition of the materials (wt.%).]

Materiais	PF	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	PbO	SO_4	Total
Cal	24,15	0,02	-	0,04	74,9	0,79	-	-	0,02	0,08	100,00
RG	4,44	63,30	15,46	5,98	4,48	-	2,70	3,63	-	-	99,99
RC-01	4,06	67,90	14,87	4,79	2,80	4,00	0,65	1,18	-	-	100,25
RC-02	3,77	68,66	15,52	5,40	2,52	1,80	0,68	1,46	-	-	99,81
RC-03	5,32	68,36	11,65	4,10	3,36	4,63	0,82	1,26	-	-	99,50

PF - Perda ao fogo determinada com a queima a 1000 °C após secagem a 110 °C.

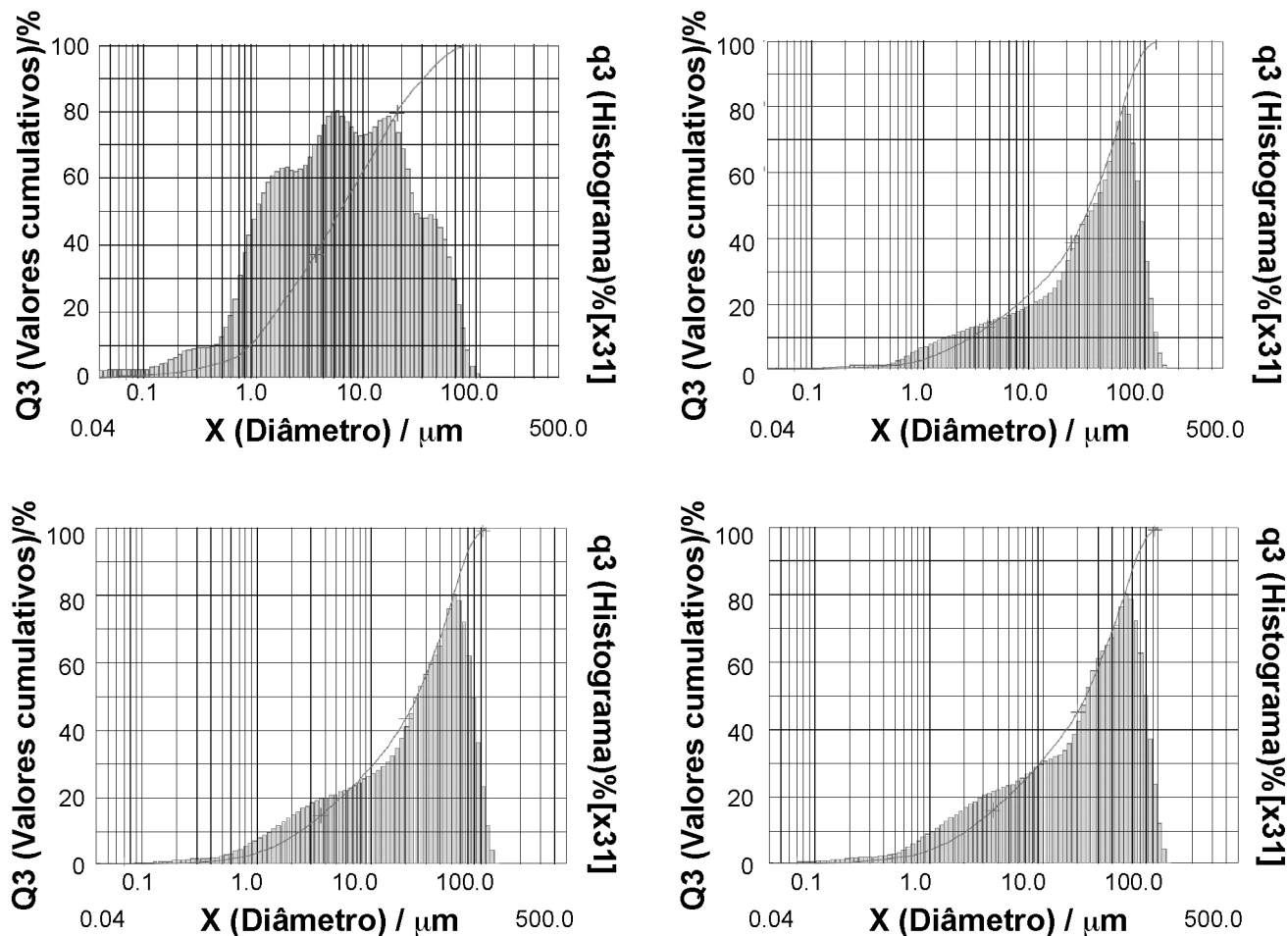


Figura 1: Distribuição de tamanho de partículas dos resíduos.
 [Figure 1: Particle size distribution of the wastes.]

em massa de resíduo em substituição ao aglomerante (cal) no traço da argamassa convencional. Em seguida, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos com 5 cm x 10 cm conforme normatização [32]. Os corpos-de-prova foram curados em imersão em água por 7, 14, 28 e 60 dias. Após cura, foram determinadas suas resistências a compressão simples (RCS) [32].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As distribuições de tamanho de partículas dos resíduos são apresentadas na Fig. 1. Os resíduos apresentam, após moagem, largas distribuições granulométricas. Os resíduos da construção possuem distribuições semelhantes, aparentemente mono-modal, com concentração de partículas em torno de 70 μm . O resíduo de granito é o mais fino, apresentando uma distribuição multimodal com concentração de partículas em torno de 2, 8, 20 e 40 μm . Os resíduos RC-01, RC-02, RC-03 e RG apresentaram D_{10} , D_{50} e D_{90} de 3, 30 e 80 μm , de 2,3, 15 e 65 μm , de 2, 23 e 60 μm e de 1, 6 e 30 μm , respectivamente.

Os resíduos apresentam fração de partículas com dimensão acima de 74 μm semelhante à indicada pelo

fabricante para a cal utilizada (% superior a 74 μm de 1,8%). Verifica-se também, que a fração abaixo dos 45 μm de todos os resíduos também é muito elevada, variando de 63 a 95% em volume, o que pode favorecer a reatividade dos resíduos estudados, particularmente os da construção, com relação ao desenvolvimento de suas características pozolânicas [33]. De acordo com a normalização [34, 35] um material para ser considerado pozolânico deve apresentar um máximo de 34% em massa retida na peneira ABNT 325 (45 μm). Os resultados apresentados na Fig. 1 (fração acumulada) são em porcentagem volumétrica, no entanto, considerando-se que a densidade dos constituintes do resíduo são semelhantes, acredita-se que a porcentagem de partículas com dimensões acima de 45 μm de todos os resíduos estão de acordo com a normalização para materiais pozolânicos [34, 35], a exceção do resíduo RC-01 que apresenta um valor próximo dos 34%, mas superior.

Na Tabela II são apresentados os valores de massa e área específica dos resíduos estudados. Os resíduos apresentam massas específicas levemente superiores aos valores observados [36, 37] para cal usadas na produção de argamassas (2,3 a 2,4 g/cm^3). Em relação à área específica, tem-se que os resíduos apresentam variação de 0,34 a

Tabela II - Massa específica real e área específica^a dos resíduos.

[Table II - Specific mass and specific area of the wastes.]

Resíduo	Massa Específica Real (g/cm ³)	Área Específica (m ² /g)
RG	2,79	1,18
RC-01	2,43	0,48
RC-02	2,52	0,34
RC-03	2,69	0,37

^aMétodo do permeâmetro de Blaine

1,18 m²/g, sendo o resíduo de granito o que apresentou a maior área específica, tal como esperado com base nas curvas de distribuição granulométrica. O resíduo de granito apresentou valor de área específica semelhante ao das caixas utilizadas na construção civil (1,2 a 1,7 m²/g) [33], entretanto, os resíduos da construção apresentaram valores significativamente inferiores. O que pode vir a comprometer o desenvolvimento das características pozolônicas nesses materiais [33].

A Tabela I mostra as composições químicas dos resíduos analisados. Os resíduos contêm SiO₂ e Al₂O₃ como principais constituintes e Fe₂O₃, óxidos alcalinos e alcalinos terrosos em menores proporções. O elevado teor de Fe₂O₃ e CaO no resíduo de granito é devido à utilização de granalha e cal como agentes abrasivos e lubrificantes, respectivamente, durante o processo de serragem. Nota-se que os resíduos apresentam teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, superando o valor mínimo de 70% requerido na normalização para materiais pozolônicos [34, 35]. Observa-se, também, que a perda ao fogo, inferior a 10%, também atende às exigências da normalização. No que se refere aos teores de MgO e os teores de álcalis em Na₂O, que a normalização estabelece tendo como máximos 3 e 1,5%, respectivamente, observa-se que o resíduo de granito e os resíduos RC-01 e RC-03 apresentam valores superiores aos exigidos. Pelo conhecimento da origem geológica de onde é extraído o granito, acredita-se que seus álcalis devem estar associados a micas e feldspatos presentes no material e, assim, não tendo interferência na aplicação em argamassa do granito, porque os álcalis estariam “imobilizados” na estrutura desses materiais. Com referência a elevada porcentagem de MgO nos resíduos, acredita-se que ela pode estar associada a presença de silicatos de magnésio ou dolomita na argila, o que é comum nas argilas usadas na região para produção de blocos cerâmicos e telhas.

Os difratogramas de raios X dos resíduos analisados são apresentados na Fig. 2. O resíduo de granito é constituído por quartzo, feldspato, mica, carbonato de cálcio e óxido de ferro. Os resíduos da construção possuem constituição semelhante, à exceção dos resíduos RC-02 e RC-03, que não apresentam óxido de ferro. Não se observam picos residuais de caulinita, o que indica que a estrutura cristalina da caulinita, (ou de outros argilominerais presentes na argila original), foi totalmente destruída com a queima. Nos difratogramas não há picos relacionados a fases cristalinas formadas com o aquecimento de argilominerais, como

mulita ou cristobalita, o que evidencia que a temperatura de queima foi suficiente apenas para provocar a dexidroxilação dos argilominerais e a formação de material amorfo e vítreo. A presença de mica nos resíduos da construção vem ao encontro dessa análise, sendo mais um indicador da baixa temperatura de queima dos resíduos analisados, já que a total destruição da estrutura cristalina da mica ocorre em temperaturas entre 800 e 1000 °C. Assim, os resíduos apresentam, provavelmente, elevado teor de argilominerais dexidroxilados, que são muito reativos e propícios ao desenvolvimento de atividade pozolônica quando em contato com cal ou cimento. Com base nos resultados obtidos com a difração de raios X, tem-se que o elevado teor de álcalis nos resíduos é oriundo dos feldspatos e mica presentes nesses materiais. Na Fig. 2 há picos de calcita nos difratogramas dos resíduos de construção o que justificaria o elevado teor de CaO nesses resíduos. O teor de MgO pode estar associado a calcita, em virtude da presença de uma calcita magnésiana e/ou também a presença de silicatos magnésianos nas matérias-primas, que após queima não apresentam estrutura cristalina, não podendo ser identificados por difração de raios X.

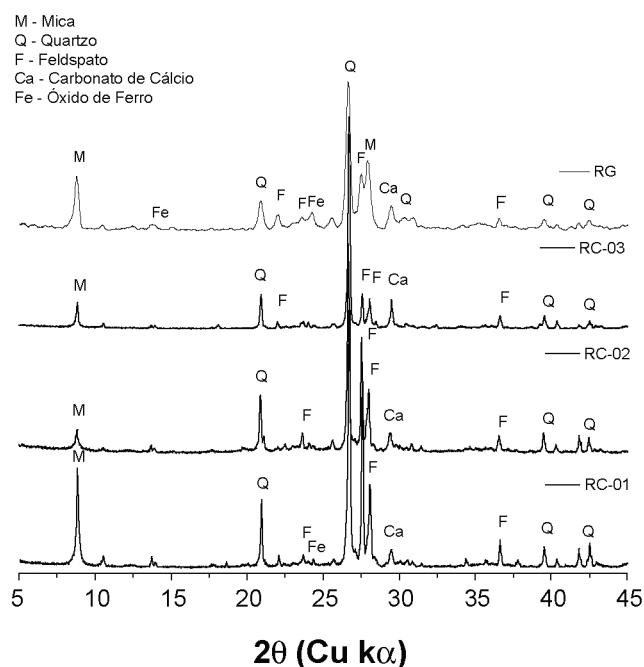


Figura 2: Difratogramas de raios X dos resíduos.

[Figure 2: X-ray diffraction patterns of the wastes.]

Caso o magnésio esteja imerso em uma matriz vítreo no resíduo ele não interferirá na aplicação dos resíduos para a produção de argamassa, no entanto, caso ele possa se hidratar e formar fases expansíveis, ele poderá comprometer o uso dos resíduos para esse fim. Isto poderá ser avaliado por difração de raios X após a produção das argamassas.

Na Fig. 3 estão as curvas de análise térmica diferencial dos resíduos analisados. Os resíduos apresentam picos endotérmicos entre 110 e 120 °C, relacionados à perda de

água livre e adsorvida. Há picos endotérmicos em ~ 570 °C em todos os resíduos, que é indicativo da transformação do quartzo α em β . Os resíduos da construção apresentam picos endotérmicos em 800 e 840 °C, relacionados, provavelmente, à decomposição do carbonato de cálcio. Os resíduos da construção analisados apresentam resultados similares aos reportados [33], o que indica o elevado grau de reprodutibilidade mineralógica desses resíduos independentemente da obra da qual foram coletados. É interessante salientar que não se observam picos associados à nucleação de mulita, (picos exotérmicos em ~ 975 °C [38]), apesar de acreditar-se que o resíduo apresenta em sua constituição elevada fração de metacaulnita (formada durante a queima dos blocos e telhas cerâmicos), que poderia ser transformada em mulita durante o aquecimento da análise térmica. No resíduo de granito observa-se um pequeno pico endotérmico por volta de 820 °C possivelmente relacionado à decomposição do carbonato de cálcio, uma banda endotérmica por volta de 740 °C, possivelmente relacionada a desidroxilação da mica e um pico exotérmico por volta de 850 °C provavelmente associado à destruição total da estrutura da mica [39, 40]. Esse pico exotérmico em algumas micas/ilita pode não ser bem pronunciado ou ocorrer em temperaturas acima de 1000 °C [39], o que pode justificar a não observação desse pico nos resíduos da construção, apesar desses materiais apresentarem mica em sua constituição. Vale salientar que nos resíduos da construção não se observa picos ou bandas relacionados a desidroxilação da mica porque, provavelmente, esse fenômeno já se processou durante a queima dos seus materiais argilosos.

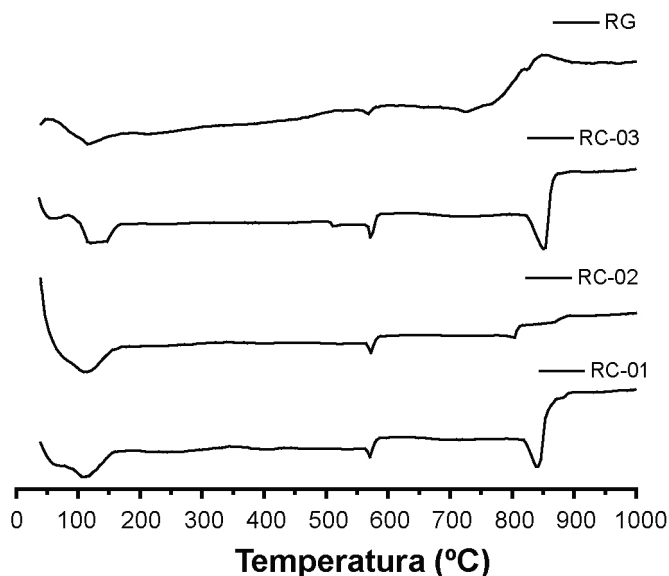


Figura 3: Curvas de análise térmica diferencial dos resíduos.
[Figure 3: Differential thermal analysis curves of the wastes.]

Os índices de atividade pozolânica dos resíduos da construção são apresentados na Tabela III. A atividade do resíduo do granito não foi determinada porque em estudos [41] observou-se que esse resíduo não apresenta atividade

pozolânica, em virtude de ser composto basicamente por materiais cristalinos (que possuem baixa reatividade com hidróxido de cálcio). Pode-se observar que o resíduo RC-01 é o que apresenta o maior índice de atividade, superior a 16 MPa. Segundo a normalização [34] são considerados pozolânicos os materiais que apresentam índice de atividade pozolânica com cal, aos 7 dias de cura, igual ou superior a 6,0 MPa. De acordo com esta especificação, os resíduos RC-01 e RC-02 podem ser considerados materiais pozolânicos, pois apresentam valores superiores àquele limite, fato relacionado, provavelmente, à desidroxilação dos argilominerais presentes nos blocos e telhas cerâmicos após queima, que provocou modificação nas suas estruturas cristalinas transformando-as em amorfas ou com alto grau de desordem estrutural [38], o que, em ambos os casos, aumenta a sua reatividade e lhes fornece um caráter pozolânico.

Tabela III - Índice de atividade pozolânica com cal dos resíduos da construção.

[Table III - Pozzolanic activity index with hydrated lime of the construction wastes.]

Resíduo	Índice de Atividade Pozolânica (MPa)
RC-01	16,23
RC-02	7,41
RC-03	1,68

O RC-03 apresenta um índice de atividade pozolânica inferior a 2 MPa, o que pode estar associado à presença de apenas uma pequena quantidade de material oriundo de restos de blocos e telhas cerâmicos. Estudos [33] também observaram resíduos da construção com baixos índices de atividade pozolânica com cal, inferiores ao indicado pela normalização para se considerar o material pozolânico. Assim, apesar da similaridade das características mineralógicas dos resíduos estudados, bem como dos analisados em outras pesquisas [33], como mencionado anteriormente, verifica-se que o teor de material reativo aparentemente pode variar significativamente de acordo com o resíduo analisado. Esse material amorfo ou com alto grau de desordem cristalina é difícil de ser identificado e quantificado através das técnicas de análises mineralógicas tradicionais, evidenciando-se a necessidade do desenvolvimento de estudo tecnológico paralelamente a análise mineralógica a fim de se avaliar com exatidão o caráter pozolânico dos resíduos oriundos de construção.

A Fig. 4 apresenta a resistência mecânica à compressão simples das argamassas estudadas. A argamassa produzida utilizando-se o resíduo RC-01 apresenta um desempenho mecânico superior ao das demais argamassas contendo resíduos, bem como, da argamassa convencional, em todos os dias de cura. No entanto, esse melhor desempenho acentua-se a partir do vigésimo oitavo dia de cura e conforme se aumenta o teor de resíduo incorporado, o que está possivelmente associado à elevada pozolanicidade

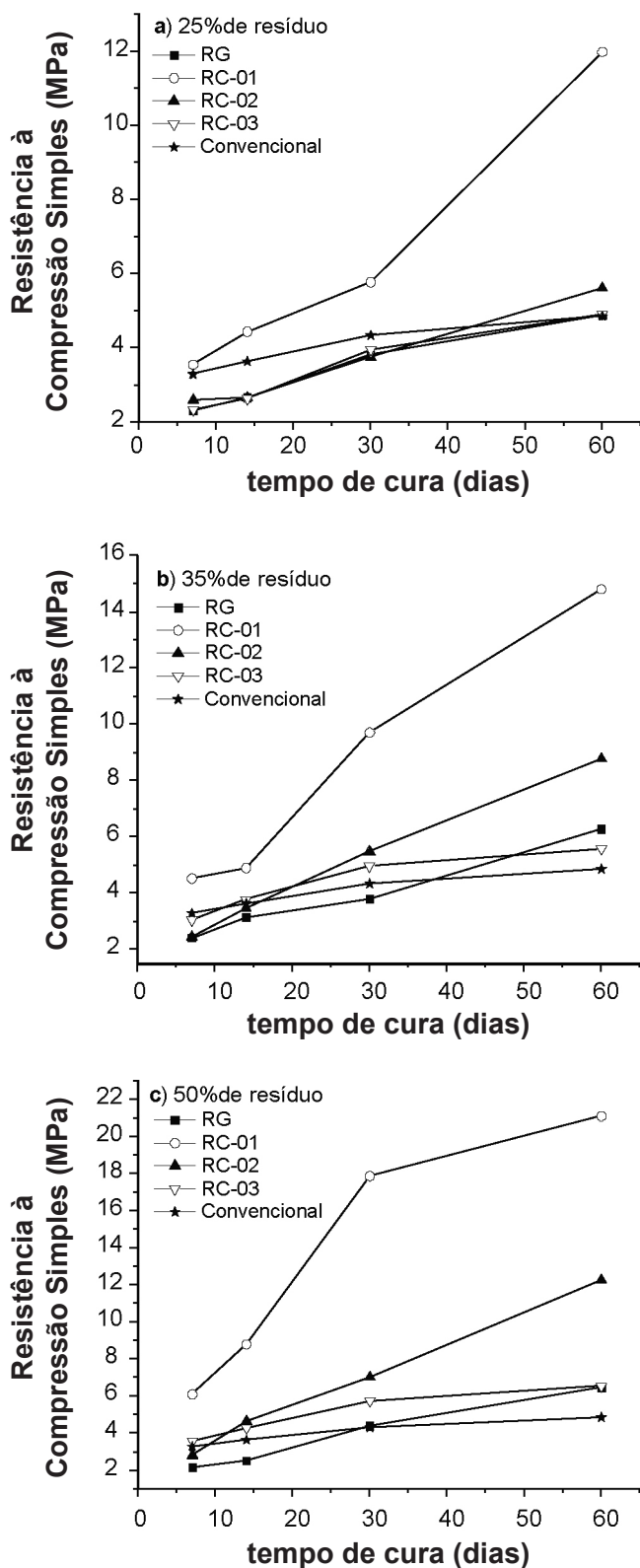


Figura 4: Resistência à compressão simples das argamassas estudadas, a) com incorporação de 25% de resíduo, b) com incorporação de 35% de resíduo, c) com incorporação de 50% de resíduo.

[Figure 4: Compressive strength of the studied mortars, a) with incorporation of 25% of waste, b) with incorporation of 35% of waste, c) with incorporation of 50% of waste.]

desse resíduo (Tabela III). O comportamento mecânico da argamassa contendo o resíduo RC-02 é similar ao da argamassa convencional quando da adição de 25% de resíduo, entretanto, com o aumento da quantidade de resíduo, verificase um aumento significativo da resistência das argamassas com resíduo após 28 dias de cura com relação a resistência da argamassa convencional. O que indica que quando o resíduo não apresenta elevado índice de atividade pozolânica (tal como o RC-01) é necessária uma adequada dosagem no teor de resíduo a fim de se ter uma melhora na resistência da argamassa e que, essa melhora na resistência só se pronunciará após um tempo necessário ao desenvolvimento das reações pozolânicas, que nesse caso, aparente ser da ordem de 28 dias.

Nos últimos anos vem se observando em todo o mundo um interesse crescente no uso de pozolanas como substituto parcial do cimento Portland para produção de concretos e argamassas. A presença desses materiais produz, em geral, redução na segregação e exudação das misturas no estado plástico e aumento na resistência e durabilidade no estado endurecido. Estudos [17, 22] observaram melhoras na resistência a compressão simples de argamassas quando da utilização de pozolanas em substituição parcial do cimento, sendo possível substituir o cimento em teores de até 40%. Nesse sentido, verifica-se que a substituição parcial da cal por materiais com características pozolânicas vem ao encontro dos resultados da literatura para argamassas contendo cimento como material aglomerante, possibilitando a melhora nas características mecânicas das argamassas produzidas. A utilização do RC-03 não propicia melhora significativa no comportamento mecânico das argamassas produzidas. No entanto, e, aparentemente, tão importante, é que não ocorre redução na resistência apesar da redução de até 50% do material aglomerante da argamassa, a cal. Nesse sentido, é interessante mencionar que materiais com baixa atividade pozolânica podem, quando finamente pulverizados, desempenhar ação física, atuando como material de preenchimento e melhorando o empacotamento do sistema. Tal fato é importante na densificação do sistema e no conseqüente aumento da resistência do produto final. Assim, acredita-se que o resíduo RC-03 apesar de não possuir atividade pozolânica com a cal (Tabela III) agiu como um “filler”, o que fez com que não houvesse uma redução na resistência das argamassas, apesar da redução no teor de aglomerante. A incorporação do resíduo de granito em substituição a cal não conduz a melhoras no desempenho mecânico da argamassa produzida. Entretanto, tal como observado com o resíduo RC-03, praticamente não ocorreu alteração no desempenho mecânico das argamassas quando da adição do resíduo RG. Estudos [41] já haviam indicado que o resíduo RG não possui atividade pozolânica, tal como mencionado anteriormente, no entanto, trabalhos [41] evidenciaram que resíduos de granito quando utilizados em concretos e argamassas produzem refino na estrutura dos poros, com o preenchimento dos poros e diminuição dos espaços disponíveis para a água, aloja-se entre grãos dos agregado, contribuindo para uma densificação da zona de transição (matriz-agregado) e da matriz aglomerante. Assim,

acredita-se que o resíduo RG agiu de forma semelhante ao do resíduo RC-03 nas argamassas produzidas, como um “filler”.

A Fig. 5 apresenta os difratogramas de raios X das argamassas produzidas após 28 dias de cura. As fases cristalinas observadas nas argamassas são semelhantes às presentes nas matérias-primas iniciais, com a adição do hidróxido de cálcio (portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Observa-se uma grande quantidade de carbonato de cálcio na argamassa convencional, que é oriundo da carbonatação do hidróxido de cálcio. Nesse sentido, verifica-se que o teor de carbonato de cálcio nas argamassas produzidas com resíduos é menor que na convencional, o que retrata o efeito da reação pozolânica de consumo do hidróxido de cálcio e o efeito “filler” de melhora do empacotamento do sistema diminuindo a permeabilidade e carbonatação da argamassa. Não há picos relacionados ao silicato de cálcio hidratado (CSH), produto da reação pozolânica entre os resíduos e a cal, o que está provavelmente relacionado a baixa cristalinidade do silicato formado. Não há também fases cristalinas associadas ao MgO , detectado na análise química, o que indica que o magnésio possivelmente não participou da formação de fases cristalinas e assim, provavelmente, não comprometerá o uso dos resíduos da construção analisados como materiais alternativos para a produção de argamassas.

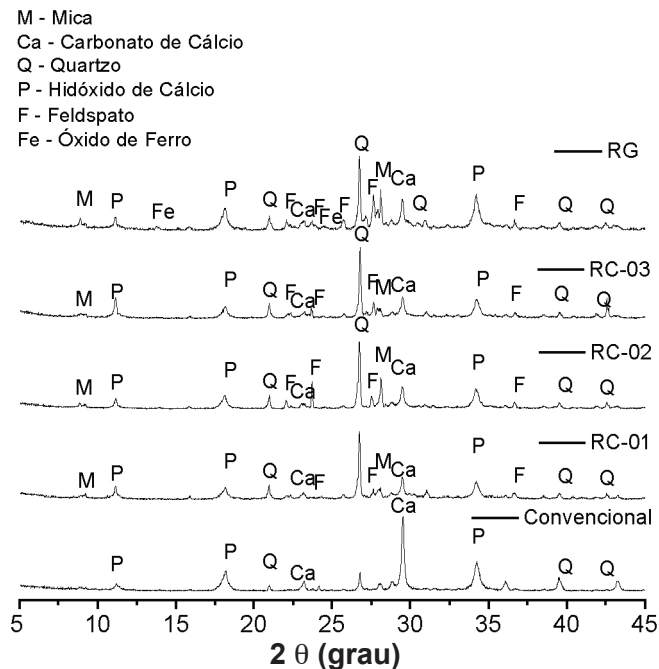


Figura 5: Difratogramas de raios X das argamassas após 28 dias de cura.

[Figure 5: X-ray diffraction patterns of the mortars cured for 28 days.]

CONCLUSÕES

Os resíduos possuem elevados teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , mas também pequenos teores de óxidos alcalinos e alcalinos terrosos e que apresentam como fases cristalinas,

quartzo, mica, feldspato e carbonato de cálcio, com o resíduo de granito apresentando também um pequeno teor de óxido de ferro; os resíduos apresentam elevada fração de partículas com dimensões inferiores a $45 \mu\text{m}$; nem todos os resíduos da construção possuem atividade pozolânica com a cal; a substituição do aglomerante por resíduo na produção de argamassas pode ser efetuada com sucesso em teores de até 50% e os resíduos com atividade pozolânica propiciam aumentos significativos na resistência à compressão simples das argamassas.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (475010/07-8) e à FAPESQ/MCT/CNPq (Projeto DCR 001/06) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] L. F. A. Campos, R. R. Menezes, D. Lisboa, L. N. L. Santana, G. A. Neves, H. C. Ferreira, *Cerâmica* **53** (2007) 373.
- [2] R. R. Menezes, M. F. Oliveira, L. N. L. Santana, G. A. Neves, H. C. Ferreira, *Cerâmica* **53** (2007) 388.
- [3] F. Raupp-Pereira, O. Hotza, A. M. Segadães, J. A. Labrincha, *Ceram. Int.* **32**, 2 (2006) 173.
- [4] E. Ozel, S. Turan, S. Çoruh, O. N. Ergun, *Waste Management & Res.* **24** (2006) 125.
- [5] R. R. Menezes, H. S. Ferreira, G. A. Neves, H. C. Ferreira, *Cerâmica* **48** (2002) 1.
- [6] R. R. Menezes, M. I. Brasileiro, L. N. L. Santana, G. A. Neves, H. L. Lira, H. C. Ferreira, *Waste Management & Res.* **26** (2008) 362.
- [7] D. G. Pinatti, R. A. Conte, M. C. Borlinic, B. C. Santos, I. Oliveira, C. M. F. Vieira, S. N. Monteiro, *J. Eur. Ceram. Soc.* **26**, 3 (2005) 305.
- [8] V. A. S. Ribeiro, A. L. da Silva, M. R. da Silva, J. C. Dias, *Rev. Matéria* **12**, 2 (2007) 339.
- [9] V. M. John, *Reciclagem de resíduos na construção civil - contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*, Tese de Livre Docência, Escola Politécnica, USP, S. Paulo, SP (2000).
- [10] R. R. Menezes, G. A. Neves, H. C. Ferreira, *Rev. Bras. Eng. Agr. Amb.* **6**, 2 (2002) 303.
- [11] R. R. Menezes, H. S. Ferreira, G. A. Neves, H. L. Lira, H. C. Ferreira, *J. Eur. Ceram. Soc.* **25** (2005) 1149.
- [12] F. Andreola, L. Barbieri, A. Corradi, I. Lancellotti, T. Manfredini, *J. Eur. Ceram. Soc.* **22** (2002) 1457.
- [13] M. A. S. Anjos, K. Ghavami, N. P. Barbosa, *Rev. Bras. Eng. Agr. Amb.* **7**, 2 (2002) 346.
- [14] R. R. Menezes, G. A. Neves, H. C. Ferreira, H. L. Lira, *Environm. Manag. Health* **13** (2002) 134.
- [15] S. N. Monteiro, L. A. Peçanha, C. M. F. Vieira, *J. Eur. Ceram. Soc.* **24** (2004) 2349.
- [16] G. E. Oliveira, J. N. F. Holanda, *Waste Management & Res.* **22** (2004) 358.
- [17] J. Farias Filho, J. S. Rolim, R. D. Toledo Filho, *Rev. Bras. Eng. Agr. Amb.* **4**, 3 (2000) 437.

- [18] I. Kula, A. Olgun, V. Sevinc, Y. Erdogan, *Cement Concrete Res.* **32** (2002) 227.
- [19] L. Bertolini, M. Carsana, D. Cassago, A. Q. Curziob, M. Collepari, *Cement Concrete Res.* **34** (2004) 1899.
- [20] E. Gemelli, S. Lourenci, M. V. Folgueras, N. H. Almeida Camargo, *Cerâmica* **50** (2004) 336.
- [21] E. Gemelli, N. H. Almeida Camargo, J. Brescansin, *Mater. Res.* **4**, 4 (2001) 297.
- [22] M. A. Coimbra, W. N. dos Santos, M. R. Morelli, *Cerâmica* **48** (2002) 44.
- [23] B. Pacewska, I. Wilinska, M. Bukowska, W. Nocun-Wzelik, *Cement Concrete Res.* **32** (2002) 1823.
- [24] M. A. Coimbra, W. Libardi, M. R. Morelli, *Cerâmica* **50** (2004) 300.
- [25] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7175, Cal Hidratada para Argamassas, Rio de Janeiro, RJ (1992).
- [26] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7200, Revestimento de Paredes e Tetos com Argamassas - Materiais, Preparo, Aplicação e Manutenção - Procedimento, Rio de Janeiro, RJ (1982).
- [27] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7211, Agregado para Concreto - Especificação, Rio de Janeiro, RJ (2005).
- [28] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 10007, Amostragem de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, RJ (2004).
- [29] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6474, Determinação da Massa Específica Real - Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ (1984).
- [30] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NM 76, Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine), Rio de Janeiro, RJ (1996).
- [31] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 5751, Índice de atividade pozolânica com a cal. Rio de Janeiro, RJ (1992).
- [32] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7215, Cimento Portland - Determinação da Resistência à Compressão. Rio de Janeiro, RJ (1996).
- [33] L. V. Amorim, A. S. G. Pereira, G. A. Neves, H. C. Ferreira, *Rev. Bras. Eng. Agr. Amb.* **3**, 2 (1999) 222.
- [34] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12653, Materiais pozolânicos - Especificação, Rio de Janeiro, RJ (1992).
- [35] 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. EUA (1992).
- [36] A. K. A. Rocha, Incorporação de resíduo de caulim em argamassa de alvenaria, Diss. Mestrado, UFCG, Campina Grande, PB (2005).
- [37] N. G. Silva, Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária, Diss. Mestrado, UFPR, Curitiba, PR (2006).
- [38] P. Souza Santos, Ciência e Tecnologia de Argilas, 3ª Ed., Vol. 1, Edgard Blücher, S. Paulo, SP (1992).
- [39] R. E. Grim, R. A. Rowland, Differential thermal analysis of clay minerals and other hydrous materials, Part 1, Disponível em www.minsocam.org/ammin/AM27/AM27_746.pdf, acesso em 07/11/2007.
- [40] J. H. de Araújo, N. F. da Silva, W. Acchar, U. U. Gomes, *Mater. Res.* **7**, 2 (2004) 359.
- [41] J. P. Gonçalves, Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos, Diss. Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RS (2000). (Rec. 10/09/2008, Ac. 05/12/2008)