

RECICLAGEM DO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Jardel P. Gonçalves¹ e Washington A. Moura²

¹ Eng. Civil, MSc. em Engenharia Civil, Aluno de doutorado - Laboratório de Estruturas, Programa de Engenharia Civil, COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Caixa Postal 68506 Rio de Janeiro BR, CEP 21945-970. Tel:(21) 2562-8475 – E-mail: jardel@labest.coc.ufrj.br

² Eng. Civil, Dr. em Engenharia Civil, Professor adjunto - Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana - Km 03, BR 116, Av. Universitária, Campus UEFS, Feira de Santana – Bahia - BR, CEP 44031- 460. Tel.(75) 224-8056 – E-mail: wam@uefs.br

RESUMO

A utilização de resíduos de beneficiamento de rochas na Construção Civil apresenta-se como uma alternativa para produção de materiais de construção de baixo impacto ambiental. No processo de beneficiamento de rochas ornamentais (granitos e mármore) é gerado uma grande quantidade de fragmentos que é descartado nos pátios das indústrias. Neste trabalho estão apresentados os resultados sobre a utilização do resíduo de serragem de granito (RSG) como adição para produção de concretos. Na pesquisa foi inicialmente realizada a caracterização física, química, potencial de oxidação do ferro contido no resíduo e de risco ambiental do RSG. Para os concretos produzidos, foi avaliada resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral e parâmetros de durabilidade. A análise dos resultados permite concluir que o resíduo das indústrias de mármore e de corte de granito não apresenta riscos ambientais, que sua utilização como adição em concretos é viável tecnicamente, e que 10% de adição é o teor que apresenta melhor desempenho.

INTRODUÇÃO

Atualmente, grande parte dos processos produtivos são fontes geradoras de resíduos podendo causar grande degradação ambiental. A Construção Civil é o setor da atividade de mineração que consome grande volume de recursos naturais e possui ampla variedade de produtos envolvendo uma grande diversidade de matérias-primas, sendo indicado para absorver os resíduos sólidos.

No segmento produtivo das rochas ornamentais são gerados vários tipos de resíduos, que são: da extração do bloco; da serragem para enquadrá-los nas dimensões padronizadas; do processo de corte e de polimento além dos finos da lavra e do beneficiamento. Na serragem cerca de 25% a 30% do bloco é transformado em pó, que é colocado nos pátios das empresas. No Brasil a quantidade estimada da geração deste resíduo fino é de 240.000 ton/ano (incluindo resíduo de serragem de

mármore e granitos), sendo 165.000 ton./ano referente ao resíduo de serragem de granito. Espírito Santo, Bahia, Ceará, Paraíba são os estados que mais geram este resíduo (GONÇALVES, 2000).

Preocupados com o impacto ambiental provocado pela geração de resíduos e considerando o grande volume de resíduo de serragem de granito gerado, alguns pesquisadores desenvolveram pesquisas com o resíduo resultante do beneficiamento de rochas ornamentais na produção de argamassas (CALMON *et al.*, 1997; SILVA, 1998), peças cerâmicas (LIMA FILHO *et al.* 1999; PONTES, 2000) e blocos estruturais (PONTES, 2000).

A Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS, na Bahia, vem realizando pesquisas para o desenvolvimento de produtos com a utilização de resíduos sólidos, entre eles o proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais (resíduo de serragem de granito – RSG e resíduos de serragem de mármore e granito - RSMG) como materiais de construção. Nas pesquisas realizadas constatou-se que o RSG e RSMG apresentam grande potencial de aproveitamento como material de construção para produção de concretos, argamassas de revestimento, aterros compactados e lajotas pré-moldadas para piso (GONÇALVES, 2000; MOURA e GONÇALVES, 2002; MOURA *et al.* 2002).

Neste trabalho apresenta-se a avaliação do aproveitamento do RSG como adição para produção de concretos. Foi realizada a caracterização física, química e de risco ambiental do resíduo de serragem de granito (RSG), bem como a sua avaliação do ponto de vista do potencial de oxidação do Fe contido. Foi avaliado também a influência do uso de RSG, como adição, nas propriedades mecânicas e durabilidade dos concretos, em teores de 10% e 20% em relação à massa de cimento.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

caracterização do RSG, foi realizada análise química, difração de raios X (DRX), análise granulométrica laser, microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários, avaliação do potencial de oxidação do ferro contido (DRX em diferentes períodos e ciclos de imersão e secagem) e risco ambiental (ensaios de lixiviação e solubilização do resíduo de acordo com a NBR 10005 (ABNT, 1987) e NBR 10006 (ABNT, 1987)). A utilização da adição de RSG nos concretos foi avaliada através da resistência à compressão axial (NBR 5739, 1994) e resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222, 1994)), e como parâmetros de durabilidade a absorção por sucção capilar (Método KELHAM, 1988) e absorção por imersão (NBR 9778, ABNT 1987).

Caracterização dos Materiais

RSG

O RSG foi coletado de uma empresa que utiliza apenas granitos em seu processo de beneficiamento. O processo de coleta seguiu as recomendações da NBR 10007 (ABNT, 1987).

O RSG possui uma massa específica de $2,76 \text{ g/cm}^3$, realizada conforme a NBR 6474 (ABNT, 1985). A caracterização química do RSG consta na Tabela 1, enquanto que na figura 1 mostra a difração de raios X.

TABELA 1 - Composição química do RSG

| Compostos | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | PF |
|-----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-----------------|------------------|-------------------|------|
| Teor (%) | 59,62 | 12,77 | 9,49 | 4,83 | 1,96 | 0,03 | 5,3 | 2,72 | 1,98 |

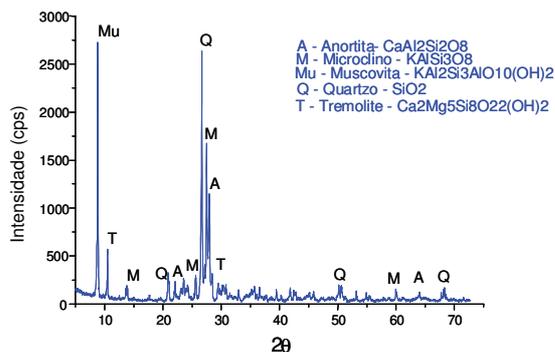


FIGURA 1 - Difratograma de uma amostra de RSG

Pode-se observar que os compostos químicos presentes no RSG se apresentam tipicamente na forma cristalina. Esta característica é típica de compostos estáveis quimicamente, portanto com baixa possibilidade de atividade pozolânica.

Para utilização do RSG como adição em concretos é imprescindível que suas partículas possuam uma granulometria compatível com os microporos, preenchendo estes interstícios e contribuindo para um maior desempenho dos concretos, o que caracteriza seu efeito fíler. Neste sentido, foi realizado um estudo com diferentes tempos de

No programa experimental desenvolvido foi realizada a caracterização do RSG e avaliação da viabilidade técnica para a produção de concretos. Na moagem, num moinho de bolas horizontal, para determinação da granulometria ótima do RSG a ser utilizado. O parâmetro de definição do tempo de moagem foi o diâmetro médio das partículas, determinado através da granulometria a laser. A Tabela 2 apresenta os resultados.

TABELA 2 - Diâmetro médio do RSG, por granulometria laser, em função do tempo de moagem

| Tempo de moagem (min.) | Diâmetro médio do RSG (μm) |
|------------------------|---|
| 2,5 | 6,74 |
| (destorroando) | |
| 40 | 4,5 |
| 50 | 4,36 |
| 60 | 4,24 |
| 80 | 3,92 |

Os resultados de moagem apresentados na tabela 2 mostram que apenas com o destorroamento (num tempo de 2,5min) o RSG apresentou um diâmetro médio de $6,74 \mu\text{m}$. Este tempo foi adotado para o destorroamento do RSG.

Visando identificar a forma dos grãos do RSG, foram realizadas, microscopias com MEV por elétrons secundários, conforme ilustra a Figura 2.

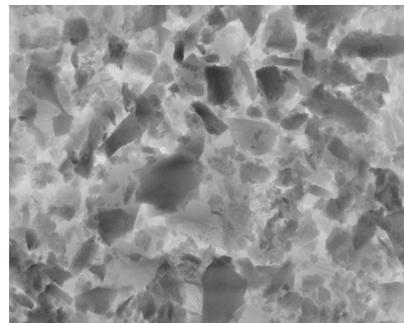


FIGURA 2 - MEV por elétrons secundários: grãos de RSG separados. Aumento de 5000x

A micrografia mostra que os grãos de RSG não apresentam uma forma definida, sendo angulosos.

Para avaliação do risco ambiental do RSG foram realizados os ensaios de lixiviação e solubilização do resíduo, de acordo com a NBR 10005 (ABNT, 1987) e NBR 10006 (ABNT, 1987), respectivamente. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

A NBR 10004 (1987), Resíduos Sólidos – Classificação, classifica os resíduos em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, que podem apresentar riscos à saúde pública e/ou ao meio ambiente, nas seguintes

classes: a) resíduos Classe I – perigosos; b) resíduo Classe II – não inertes e c) resíduo Classe III – Inertes.

TABELA 3 - Resultados do ensaio de lixiviação (NBR 10005, ABNT - 1987) e solubilização (NBR 10006, ABNT - 1987) do RSG

| Metais Solubilizados | | | Metais Lixiviados | | |
|----------------------|--------|---------------------------------|-------------------|--------|---------------------------------|
| Elemento(ppm) | RCG | NBR 10004 (ppm) Limites máximos | Elemento(ppm) | RCG | NBR 10004 (ppm) Limites máximos |
| Ba | N.D. | 1 | Ba | 0,637 | 100 |
| Cd (ppb) | N.D. | 0,005 | Cd | 0,16 | 0,5 |
| Pb (ppb) | N.D. | 0,05 | Pb (ppb) | N.D. | 5 |
| Cr | N.D. | 0,05 | Cr | 0,29 | 5 |
| Ag (ppb) | N.D. | 0,05 | Ag | 0,0007 | 5 |
| Cu | 0,0024 | 1 | As | N.D. | 5 |
| Al | N.D. | 0,2 | Hg | N.D. | 0,1 |
| Fe | 0,07 | 0,3 | F | 0,391 | 150 |
| Mn | N.D. | 0,1 | Se | N.D. | 1 |
| Zn | 0,011 | 5 | - | - | - |
| As (ppb) | 0,0069 | 0,05 | - | - | - |
| Hg (ppb) | N.D. | 0,001 | - | - | - |
| Se (ppb) | N.D. | 0,01 | - | - | - |
| Na | 32 | 200 | - | - | - |
| SO4 | 8,23 | 400 | - | - | - |
| Cl | 33,7 | 250 | - | - | - |
| F | 3,2 | 1,5 | - | - | - |
| Fenol | N.D. | 0,001 | - | - | - |
| Nitrato | N.D. | 10 | - | - | - |
| Cianeto | N.D. | 0,1 | - | - | - |

A partir dos resultados apresentados no ensaio de lixiviação, observa-se que nenhum dos seus compostos apresentou concentração superior em relação às especificações da norma. No ensaio de solubilização, comparando os resultados com os limites estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 1987), apenas o flúor apresentou concentração superior. Como o flúor não é uma substância considerada perigosa, o RSG, conseqüentemente, não apresenta riscos à saúde humana, sendo classificado como classe II - não inerte.

AGREGADOS

Os agregados utilizados para produção dos concretos foram, areia quartzosa média, de rio, e agregado graúdo de origem granítica, disponíveis comercialmente. As características físicas estão relacionadas na Tabela 4.

TABELA 4 - Características dos agregados utilizados

| | Ag.graúdo | Ag. Miúdo |
|---------------------------------------|-------------|-----------|
| Dimensão Máxima Característica (mm) | 19mm | 2,4 |
| Módulo de Finura | 7,0 | 2,45 |
| Massa Específica (g/cm ³) | 2,710 | 2,624 |
| Absorção (%) | 0,60 | - |
| Torrões de Argila | S/ Presença | - |
| Índice de Forma | 2,64 | - |
| Massa Unitária (g/cm ³) | 1,47 | - |

ÁGUA

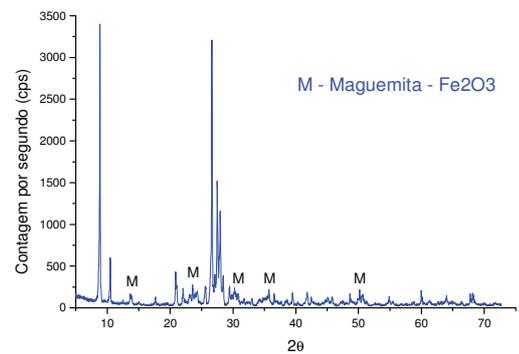
A água utilizada para a produção dos concretos atende as características da NBR 6118 (ABNT, 1980).

Avaliação do Potencial de Oxidação do Fe Contido no RSG

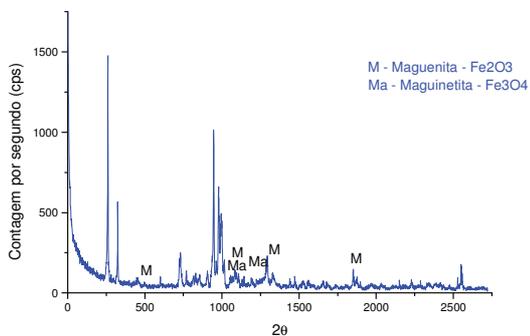
Devido à presença da granalha¹ no processo de serragem dos blocos e a constatação visual da oxidação do ferro contido no resíduo, foi investigado o potencial de oxidação do Fe através de DRX, em amostras do resíduo, após um dia de gerado e em amostras depois de quatro meses da sua geração.

Foi verificada, também, a influência do Fe, em argamassas com adição de 20% de RSG em relação a massa de cimento. As argamassas foram submetidas a ciclos de imersão e secagem.

A seguir são mostrados, na Figura 3 (a) e (b), os resultados das DRX realizadas.



(a)



(b)

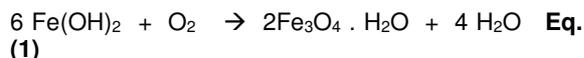
FIGURA 3 - Difração de raios X de amostras de RSG: amostra com um dia de gerada e amostra com quatro meses.

A partir dos resultados apresentados nas DRX pode-se observar que o resíduo apresenta uma fração metálica de íons ferro que estão passando de um estado menos oxidado para um estado mais oxidado. Na amostra com quatro meses após sua geração, há a formação de magnetita em proporções pouco maiores que a verificada na amostra de um dia.

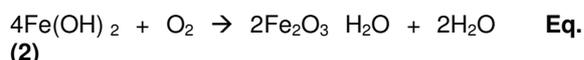
Este fato é esclarecido por KOTZ e TREICHEL (1998), que afirmam que a química da corrosão do ferro na presença da água e oxigênio é 100 vezes mais rápida que na ausência de oxigênio,

¹ Partículas de ferro fundido utilizadas para aumentar a eficiência do processo de serragem das rochas.

e que se não houver oxigênio em abundância, a continuação da oxidação do hidróxido de ferro II fica limitada pela formação de óxido magnético (óxido misto de FeO e Fe₂O₃), conforme equação 1.



Mas, se houver acesso facilitado à penetração do oxigênio e da água, forma-se o óxido de ferro III, conforme equação 2.



AValiação DO POTENCIAL DE OXIDAÇÃO DO RSG POR CICLOS DE IMERSÃO E SECAGEM

A avaliação do potencial de oxidação do Fe contido no RSG em argamassas foi realizada através da comparação do desempenho entre argamassas produzidas sem adição de RSG (referência) e com adição de 20% de RSG, submetidas a ciclos de imersão, em solução contendo 3% de cloreto de sódio, e secagem em painel de lâmpadas. Cada ciclo possui um período de sete dias, sendo que nos primeiros seis dias os corpos-de-prova foram submetidos a secagem e no sétimo dia, imersos. Foram realizados dez ciclos. Neste ensaio é feita uma análise comparativa de três diferentes formas:

- através da avaliação visual dos corpos-de-prova com vistas a identificar uma mudança de coloração devido à presença dos produtos de oxidação;
- avaliação da variação de massa dos corpos-de-prova; e
- verificação da resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova após o último ciclo.

Como parâmetros de controle das argamassas, fixou-se a consistência em 260 +/- 10 mm, que foi determinada pela mesa de consistência padrão, conforme NBR 13276 (ABNT, 1995).

Foram moldados corpos-de-prova 4x4x16cm, sendo 3 para cada traço. A idade de referência para início do ensaio de imersão e secagem foi de 28 dias.

Na Tabela 5, constam os resultados de resistência à tração na flexão das argamassas produzidas.

TABELA 5 - Resistência à tração na flexão das argamassas com e sem adição de RSG

| MISTURA | ftfm (Mpa) | CV (%) |
|-------------|------------|--------|
| 1 : 3 | 5,01 | 2,0 |
| 1 : 4 | 4,93 | 1,7 |
| 1 : 5 | 4,07 | 3,0 |
| 1 : 3 : 0,2 | 4,95 | 1,5 |
| 1 : 4 : 0,2 | 4,87 | 2,0 |
| 1 : 5 : 0,2 | 4,11 | 2,4 |

Com relação à avaliação visual não houve diferenças no aspecto dos corpos-de-prova, nem foi percebido nenhum ponto específico com tonalidade característica dos produtos de oxidação do Fe.

Observa-se na tabela que não houve diferença significativa nos resultados de resistência à tração na flexão para as argamassas com e sem adição de RSG, provavelmente, devido aos seguintes fatores: pequena quantidade de RSG nas misturas (20% em relação a massa de cimento), sendo que do teor de RSG adicionado, 9,49% são de compostos que contém o Fe; dispersão dos produtos de oxidação na mistura, uma vez que o Fe encontra-se disperso; o possível aumento do volume gerado pelos produtos de oxidação, foi muito pequeno, podendo até colmatar alguns pequenos poros; maior dificuldade de penetração dos íons cloretos na matriz devido a uma maior barreira física causada pela presença do RSG.

Com relação à variação de massa, houve um ganho de massa dos corpos-de-prova, causado, provavelmente, pela fixação dos cloretos na matriz e fixação de cloretos pelo Fe contido. Este ganho foi maior para relações agregado miúdo/cimento, maiores. Nas argamassas com adição de RSG esse ganho foi menor, provavelmente devido à dificuldade de acesso dos íons cloretos.

Com base nos resultados do ensaio, pode-se afirmar que o Fe presente no RSG está se oxidando. Esta evidência foi comprovada pelas difrações de raios X. Os parâmetros avaliados nos ciclos de imersão e secagem não apresentaram informações convincentes sobre o processo de oxidação do Fe contido no RSG.

Alguns estudos têm sido realizados tentando remover o Fe presente no resíduo e, assim, evitar a oxidação do mesmo quando reaproveitado. PONTES (2000), em seu estudo avaliou a purificação da amostra do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais através da remoção do Fe por separação magnética de alta intensidade, encontrando resultados satisfatórios.

Avaliação dos concretos com adição de RSG

DOSAGEM DOS CONCRETOS

Para a dosagem dos concretos utilizou-se o método do IPT/EPUSP, descrito por HELENE e TERZIAN (1992), sendo que os parâmetros de controle foram à obtenção de um abatimento de 60 +/- 10mm e o teor de argamassa seca ideal. Para o concreto de referência, cujos traços são apresentados na Tabela 6, o teor de argamassa seca ideal foi de 50%. Os concretos com 10% e 20% de adição ficaram com teores de 49% e 48%, respectivamente, mantendo-se constante a relação água/cimento.

TABELA 6 - Proporcionalamento (em massa) e parâmetros de dosagem dos concretos executados

| Relação a/c | Teor de adição (%) | Cimento | Ag.Miúdo | Ag. Graúdo | Consumo de cimento (kg/m3) |
|-------------|--------------------|---------|----------|------------|----------------------------|
| 0,4 | 0 | 1 | 1,33 | 2,32 | 480 |
| 0,55 | | | 2,20 | 3,20 | 347 |
| 0,7 | | | 3,07 | 4,07 | 271 |
| 0,4 | 10 | 1 | 1,12 | 2,32 | 491 |
| 0,55 | | | 1,96 | 3,19 | 360 |
| 0,7 | | | 2,79 | 4,06 | 277 |
| 0,4 | 20 | 1 | 0,91 | 2,28 | 505 |
| 0,55 | | | 1,69 | 3,15 | 364 |
| 0,7 | | | 2,49 | 4,00 | 284 |

O tempo de mistura dos concretos foi de 4 (quatro) minutos. Porém, no concreto com a/c 0,40 e com 20% de adição, este tempo se estendeu para 6 (seis) minutos, devido ao aumento da coesão e consistência, e uma maior dificuldade de homogeneização da mistura.

Apresentação e análise dos resultados

Propriedades do concreto no estado fresco

A trabalhabilidade dos concretos foi avaliada através do ensaio de abatimento de troco de cone, conforme NBR 7223 (ABNT, 1992). O abatimento foi estabelecido como uma variável controlada, fixado na faixa de 60 +/- 10 mm.

Com a adição de RSG nos concretos houve um incremento na coesão e consistência e, conseqüentemente, uma diminuição da exsudação. Este comportamento deve-se, principalmente, ao efeito das pequenas partículas de RSG difundidas pela mistura, que atuam como uma barreira física para o movimento ascendente da água. Este fato pode ser comprovado pela dificuldade de homogeneização da mistura. O comportamento foi conforme esperado.

Propriedades do Concreto no estado Endurecido

A moldagem dos corpos-de-prova de concreto, cilíndricos e prismáticos, foi de acordo às recomendações da NBR 5738 (ABNT, 1994).

Os corpos-de-prova foram desmoldados 24 horas após a moldagem, e mantidos em câmara úmida com temperatura (23°C +/- 2°C) e umidade relativa (>95%) controladas até a idade de cada ensaio.

Para uma melhor verificação da influência do RSG nos concretos e da interação entre as variáveis relacionadas, foi realizada a análise estatística pela ANOVA para todos os resultados encontrados referentes às propriedades do concreto no estado endurecido. Para as análises, o nível de significância adotado foi de 5%. A ANOVA foi realizada através do *software* *Statística*.

PROPRIEDADES MECÂNICAS

Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial foi avaliada nas idades de 7, 28 e 63 dias, de acordo com a NBR 5739 (1994). Os resultados relativos à resistência à compressão axial contam na Tabela 7.

Na Figura 4 está apresentado o gráfico de resistência à compressão axial dos concretos aos 28 dias.

Através da ANOVA foi constatado a significância estatística das variáveis relacionadas, que são a/c, teor de adição de RSG e idade, na resistência à compressão axial. Na tabela 8 está apresentada a análise de influência dos fatores e suas possíveis interações.

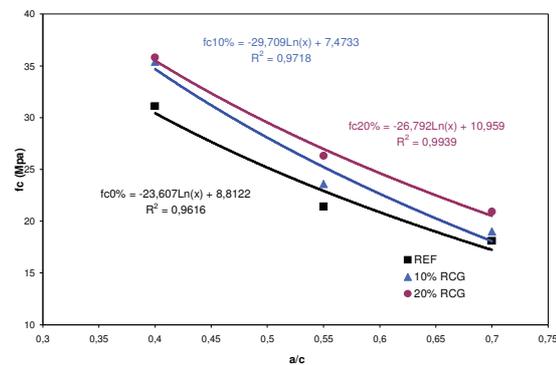


FIGURA 4 - Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias de idade

TABELA 8 - Resultados da ANOVA em relação a resistência à compressão axial dos concretos

| Fator | GDL | MQ | Fcalc | F0,05 | Significância |
|--------------------|-----|--------|--------|-------|---------------|
| 1 - Teor de adição | 2 | 120,22 | 44,76 | 3,29 | S |
| 2 - a/c | 2 | 1591,1 | 592,37 | 3,29 | S |
| 3 - Idade | 2 | 260,78 | 97,08 | 3,29 | S |
| 12 | 4 | 3,04 | 1,13 | 2,66 | NS |
| 13 | 4 | 3,67 | 1,36 | 2,66 | NS |
| 23 | 4 | 2,44 | 0,9 | 2,66 | NS |
| 123 | 8 | 5,06 | 1,88 | 2,24 | NS |
| ERRO | 54 | 2,68 | - | - | - |

GDL – Graus de Liberdade MQ – Média Quadrada Fcalc – Valor de F calculado ; F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5% S – Efeito significativo; NS – Efeito não significativo

Verifica-se que o teor de adição de RSG, a relação a/c e a idade analisados separadamente possuem efeito significativo sobre a resistência à compressão axial. Porém, não existe interação entre estes fatores. Ou seja, não há influência significativa entre o teor de adição e a idade, entre o teor de adição e a relação a/c e entre a relação a/c e a idade.

Analisando-se isoladamente a influência do teor de adição na resistência à compressão axial verifica-se que os concretos com 10% de adição obtiveram um ganho médio de 8%, enquanto que para os concretos com adição de 20% de RSG houve um aumento médio de 19,6% em relação ao concreto de referência.

O aumento do desempenho dos concretos com adição de RSG pode ser atribuído à sinergia dos seguintes fatores: a) como o RSG não possui atividade pozolânica, seu efeito físico, devido a sua alta finura, promoveu um refinamento na estruturas de poros; b) a distribuição das pequenas partículas de RSG em todo concreto, associada a densificação da interface matriz/agregado. Desta forma,

aumentou o contato entre os produtos hidratados e não hidratados da matriz, produzindo o chamado *effect packing*, ou seja, um maior empacotamento da matriz. Este maior contato representou um somatório de pequenas forças resistentes que contribuíram para o aumento da resistência à compressão

TABELA 7 - Resistência à Compressão Axial dos concretos

| | | IDADE (dias) | | | | | | | | |
|------------|------|--------------|-----------------------|---------|---------|-----------------------|---------|---------|-----------------------|---------|
| | | 7 | | | 28 | | | 63 | | |
| MISTURA | a/c | fc(MPa) | fc _m (MPa) | C.V.(%) | fc(MPa) | fc _m (MPa) | C.V.(%) | fc(MPa) | fc _m (MPa) | C.V.(%) |
| REFERÊNCIA | 0,40 | 29,0 | 26,5 | 8,4 | 30,4 | 31,1 | 3,1 | 32,4 | 33,4 | 3,7 |
| | | 24,9 | | | 30,7 | | | 34,8 | | |
| | | 25,5 | | | 32,2 | | | 34,8 | | |
| | 0,55 | 18,2 | 18,0 | 1,1 | 19,0 | 21,4 | 10,2 | 23,6 | 23,5 | 1,5 |
| | | 17,8 | | | 23,2 | | | 23,8 | | |
| | | 18,0 | | | 22,1 | | | 23,1 | | |
| 0,70 | 12,2 | 14,0 | 11,6 | 16,9 | 18,1 | 6,2 | 19,3 | 18,3 | 5,8 | |
| | 15,4 | | | 19,1 | | | 18,5 | | | |
| | 14,3 | | | 18,4 | | | 17,2 | | | |
| 10% RCG | 0,40 | 27,9 | 28,4 | 5,1 | 35,4 | 35,4 | 1,3 | 36,4 | 36,1 | 2,4 |
| | | 30,0 | | | 35,0 | | | 36,7 | | |
| | | 27,2 | | | 35,9 | | | 35,1 | | |
| | 0,55 | 18,3 | 19,0 | 6,4 | 21,8 | 23,6 | 6,7 | 26,1 | 25,6 | 5,9 |
| | | 18,3 | | | 24,7 | | | 23,9 | | |
| | | 20,4 | | | 24,4 | | | 26,8 | | |
| 0,70 | 14,8 | 13,3 | 12,6 | 18,4 | 19,0 | 3,2 | 19,8 | 20,3 | 2,3 | |
| | 11,5 | | | 19,6 | | | 20,7 | | | |
| | 13,7 | | | 19,1 | | | 20,4 | | | |
| 20% RCG | 0,40 | 32,8 | 31,8 | 4,5 | 35,3 | 35,8 | 2,8 | 39,8 | 39,4 | 1,0 |
| | | 32,5 | | | 36,9 | | | 39 | | |
| | | 30,2 | | | 35,1 | | | 39,5 | | |
| | 0,55 | 18,7 | 19,4 | 4,3 | 26,0 | 26,3 | 1,0 | 26,3 | 27,0 | 2,8 |
| | | 20,3 | | | 26,5 | | | 26,9 | | |
| | | 19,1 | | | 26,3 | | | 27,8 | | |
| 0,70 | 16,7 | 17,0 | 2,9 | 20,7 | 20,9 | 5,1 | 22,1 | 22,1 | 1,4 | |
| | 16,8 | | | 22,0 | | | 22,4 | | | |
| | 17,6 | | | 19,9 | | | 21,8 | | | |

Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral foi avaliada nas idades de 7, 28 e 63 dias, de acordo com a NBR 7222(1994). Os resultados relativos à resistência à tração por compressão diametral contam na Tabela 9.

A partir dos resultados apresentados na tabela 9 foi elaborado o gráfico de resistência à tração por compressão diametral, para 28 dias, conforme Figura 5.

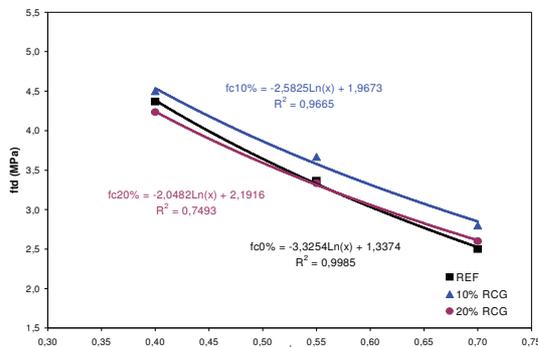


FIGURA 5 - Resistência à Tração por Compressão Diametral dos concretos na idade de 28 dias

Na Tabela 10, está apresentadas a análise de influência dos fatores e suas possíveis interações, realizadas através da ANOVA dos concretos

produzidos em relação a resistência à tração por compressão diametral.

TABELA 10 - Resultados da ANOVA em relação a resistência à tração por compressão diametral

| Fator | GDL | MQ | Fcalc | F0,05 | Significância |
|--------------------|-----|-------|--------|-------|---------------|
| 1 - Teor de adição | 2 | 1,71 | 29,76 | 3,29 | S |
| 2 - a/c | 2 | 15,96 | 276,78 | 3,29 | S |
| 3 - Idade | 2 | 4,97 | 86,17 | 3,29 | S |
| 12 | 4 | 0,15 | 0,25 | 2,66 | NS |
| 13 | 4 | 0,73 | 12,61 | 2,66 | S |
| 23 | 4 | 0,12 | 2,1 | 2,66 | NS |
| 123 | 8 | 0,62 | 1,10 | 2,24 | NS |
| ERRO | 54 | 0,57 | - | - | - |

GDL – Graus de Liberdade MQ – Média Quadrada Fcalc – Valor de F calculado ; F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5% S – Efeito significativo; NS – Efeito não significativo

Os resultados da Tabela 10 mostram que há influência significativa do teor de adição, da relação a/c e da idade na resistência à tração por compressão diametral. Verifica-se ainda que há interação entre o teor de adição e a idade.

A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que os concretos com 10% de adição de RSG apresentaram melhor comportamento em relação aos demais. Os concretos com 10% de adição obtiveram um ganho na resistência à tração por compressão diametral de 7,2%, enquanto que os concretos com 20% um decréscimo de 5,8%, em relação aos concretos de referência. Este comportamento foi diferente do verificado na

resistência à compressão axial, em que as partículas de RSG promoveram ganhos nos teores analisados. Isso comprova o efeito fíler da adição no concreto.

por CABRERA et al. (1998), em seu estudo com concretos de alta resistência com cimento com fíler calcário.

Com relação à resistência aos esforços de tração, o efeito físico do fíler é maior nas primeiras idades, devido à aceleração da hidratação do cimento nestas idades. Fato comprovado também

TABELA 9 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos

| | | IDADE (dias) | | | | | | | | |
|------------|------|--------------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|
| | | 7 | | | 28 | | | 63 | | |
| MISTURA | a/c | ft(MPa) | ftm(MPa) | C.V.(%) | ft(MPa) | ftm(MPa) | C.V.(%) | ft(MPa) | ftm(MPa) | C.V.(%) |
| REFERÊNCIA | 0,40 | 3,6 | 3,5 | 3,3 | 4,4 | 4,4 | 1,3 | 5,0 | 5,2 | 3,0 |
| | | 3,4 | | | 4,4 | | | 5,3 | | |
| | | 3,4 | | | 4,3 | | | 5,2 | | |
| | 0,55 | 3,1 | 3,2 | 3,1 | 3,5 | 3,4 | 4,5 | 4,2 | 4,1 | 2,4 |
| | | 3,3 | | | 3,4 | | | 4,0 | | |
| | | 3,2 | | | 3,2 | | | 4,1 | | |
| | 0,70 | 2,2 | 2,4 | 8,8 | 2,4 | 2,5 | 4,0 | 3,5 | 3,7 | 5,4 |
| | | 2,3 | | | 2,5 | | | 3,9 | | |
| | | 2,6 | | | 2,6 | | | 3,7 | | |
| 10% RCG | 0,40 | 4,2 | 4,3 | 1,4 | 4,2 | 4,5 | 5,9 | 5,3 | 5,1 | 6,3 |
| | | 4,3 | | | 4,6 | | | 4,7 | | |
| | | 4,3 | | | 4,7 | | | 5,2 | | |
| | 0,55 | 3,4 | 3,5 | 2,9 | 4,1 | 3,3 | 11,0 | 4,0 | 4,4 | 9,1 |
| | | 3,5 | | | 3,3 | | | 4,4 | | |
| | | 3,6 | | | 3,6 | | | 4,8 | | |
| | 0,70 | 2,9 | 2,7 | 9,8 | 2,7 | 2,8 | 9,4 | 4,0 | 3,8 | 5,5 |
| | | 2,8 | | | 2,6 | | | 3,6 | | |
| | | 2,4 | | | 3,1 | | | 3,7 | | |
| 20% RCG | 0,40 | 4,2 | 4,0 | 5,0 | 4,1 | 4,2 | 7,6 | 4,5 | 4,3 | 10,1 |
| | | 4,0 | | | 4,6 | | | 3,8 | | |
| | | 3,8 | | | 4,0 | | | 4,6 | | |
| | 0,55 | 3,5 | 3,2 | 8,3 | 3,3 | 3,0 | 10,5 | 3,6 | 3,4 | 3,4 |
| | | 3,1 | | | 3,0 | | | 3,4 | | |
| | | 3,0 | | | 3,7 | | | 3,1 | | |
| | 0,70 | 2,3 | 2,4 | 4,9 | 2,8 | 2,6 | 7,7 | 2,5 | 2,7 | 7,6 |
| | | 2,5 | | | 2,6 | | | 2,9 | | |
| | | 2,3 | | | 2,4 | | | 2,8 | | |

Como a estrutura dos compostos do RSG é cristalina, não há reação química, ocorre apenas um preenchimento dos vazios. Quando os concretos são submetidos aos esforços de tração, a linha média de fratura passa pela zona de maior fragilidade, que são entre o poro e o fíler, no contato fíler – fíler ou no contato fíler – produtos hidratados/produtos não hidratados, já que não há ligações químicas entre o grão de adição e os compostos adjacentes.

Esse ganho ocorreu, provavelmente, devido a uma sinergia entre o efeito fíler preenchendo os interstícios, com uma maior quantidade de produtos hidratados menores e mais dispersos, gerados a partir da dispersão das partículas de RSG. Este efeito é evidenciado pelos níveis de resistência dos concretos com adição aos 7 dias.

Com adição de 20% de RSG, esta aceleração do processo de hidratação gerando produtos menores, também acontece. Porém, como há uma maior quantidade de partículas de RSG dispersas na mistura, provavelmente há uma maior dispersão dos produtos hidratados. Este fato pode conduzir a uma diminuição da ligação entre os produtos hidratados causando uma deficiência na estrutura da matriz. Isso não acontece com a incorporação da sílica ativa, que além de provocar um refinamento, torna a estrutura de poros dos concretos descontínua (BARATA, 1998).

Parâmetros de Durabilidade

Absorção por sucção capilar

Segundo KELHAM (1988), a absorvidade é a penetração de água num concreto não saturado em função da raiz quadrada do tempo. A absorvidade apresenta-se como uma característica muito importante para a verificação da influência de uma adição no concreto, pois os efeitos causados são refletidos nesta característica. Ou seja, através da absorvidade pode-se constatar o ganho no refinamento da estrutura de poros, promovido pela incorporação da adição. Para avaliação desta característica, utilizou-se o ensaio de absorção por sucção capilar, desenvolvido por KELHAM (1988), adaptado por GOPALAN (1996), o qual baseia-se no monitoramento, ao longo do tempo, do acréscimo na massa aparente de um corpo-de-prova submerso em água e devidamente condicionado. Foram realizados ensaios em concreto com e sem adição de RSG.

A partir dos gráficos de ganho de massa em função da raiz quadrada do tempo, calcula-se a taxa de absorção, resistência capilar e porosidade efetiva. A taxa de absorção, em $g/h^{1/2}$, é obtida através da inclinação da reta ajustada na fase inicial de absorção. A resistência capilar é obtida através do ponto de interseção entre as duas retas, chamado de ponto de saturação. Calcula-se a resistência capilar, em h/m^2 , utilizando a seguinte fórmula (GJORV, 1994):

$$M = ts / e^2 \quad (\text{Eq. 3})$$

onde: M - Resistência capilar (h/m^2); ts - abcissa do ponto de saturação ($h^{1/2}$); e - espessura do corpo-de-prova (m)

A porosidade efetiva representa a porosidade aberta dos concretos em avaliação, uma vez que a porosidade absoluta não se pode medir, pois nem todos os poros estão acessíveis. Para o cálculo da porosidade efetiva utilizou-se a seguinte fórmula, proposta por KELHAM (1988):

$$\text{Pefet.} = (\text{Ganho de Massa} / A.L.\gamma_a) \times 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

onde: Pefet. -- porosidade efetiva em %; A - área da seção transversal do corpo-de-prova (cm^2); L - espessura (cm); γ_a - massa específica da água (g/cm^3).

Devido à variação dos resultados apresentados em alguns corpos-de-prova de uma mesma amostra de concreto, adotou-se, o conceito de tempo de saturação potencial, ou seja, é o tempo necessário para que se inicie o estágio de saturação das amostras analisadas. Sendo este tempo maior quanto mais refinada for a estrutura de poros do concreto em análise. Os resultados de taxa de absorção potencial, resistência capilar potencial e os tempos de saturação dos concretos estão apresentados na Tabela 11.

TABELA 11 - Taxa de absorção e resistências capilares potenciais dos concretos produzidos com e sem adição de RSG

| CONCRETOS | TEMPO SATURAÇÃO POTENCIAL (h) | TX DE ABSORÇÃO Potencial ($g/h^{1/2}$) | RESIST. CAPILAR h/m^2 |
|--------------|-------------------------------|--|-------------------------|
| REF 0,40 | 13,23 | 6,54 | 21161,25 |
| REF 0,55 | 10,43 | 9,13 | 16768,08 |
| REF 0,70 | 7,61 | 10,65 | 12126,27 |
| RCG 10% 0,40 | 10,28 | 5,45 | 16449,64 |
| RCG 10% 0,55 | 10,14 | 8,44 | 16224,05 |
| RCG 10% 0,70 | 12,01 | 8,10 | 19210,51 |
| RCG 20% 0,40 | 16,36 | 7,57 | 26693,8 |
| RCG 20% 0,55 | 13,25 | 8,53 | 21211,34 |
| RCG 20% 0,70 | 12,31 | 9,44 | 19698,53 |

A partir dos resultados apresentados na Tabela 11 foram elaborados os gráficos de comportamento dos concretos, conforme figura 6: (a) taxa de absorção potencial e (b) resistência capilar potencial.

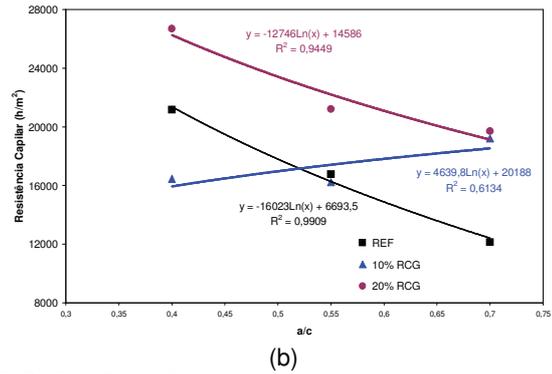
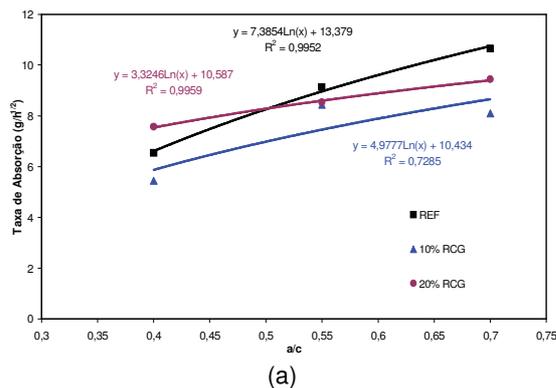


FIGURA 6 - Concretos produzidos com e sem adição de RSG: (a) Taxa de absorção potencial (b) Resistência capilar potencial

Outro parâmetro calculado a partir do ensaio de absorção por sucção capilar foi a porosidade efetiva, que neste caso será a porosidade efetiva potencial, conforme consta na Tabela 12 e representado pela Figura 7.

Para o cálculo do ganho de massa foi necessário realizar uma regressão linear para verificação da massa aparente inicial do corpo-de-prova.

TABELA 12 - Resultados dos acréscimos de massa de cada corpo-de-prova e suas respectivas porosidades efetivas

| Traco | Porosidade Efetiva | | | |
|-------------------|---------------------------------|----------------|-------|-----------|
| | Acréscimo de massa Unitário (g) | Porosidade (%) | | |
| | | Unitário | Média | Potencial |
| REF 0,40 / 01 | 28,26 | 11,30 | | |
| REF 0,40 / 02 | 42,41 | 16,96 | 14,13 | 11,3 |
| REF 0,55 / 01 | 31,66 | 12,66 | | |
| REF 0,55 / 02 | 32,77 | 13,11 | 12,89 | 13,11 |
| REF 0,70 / 01 | 34,93 | 13,97 | | |
| REF 0,70 / 02 | 36,94 | 14,78 | 14,37 | 14,78 |
| RCG 10% 0,40 / 01 | 20,65 | 8,26 | | |
| RCG 10% 0,40 / 02 | 26,26 | 10,50 | 9,38 | 10,5 |
| RCG 10% 0,55 / 01 | 33,19 | 13,28 | | |
| RCG 10% 0,55 / 02 | 29,74 | 11,90 | 12,59 | 11,9 |
| RCG 10% 0,70 / 01 | 30,07 | 12,03 | | |
| RCG 10% 0,70 / 02 | 32,82 | 13,13 | 12,58 | 12,03 |
| RCG 20% 0,40 / 01 | 33,89 | 13,56 | | |
| RCG 20% 0,40 / 02 | 34,42 | 13,77 | 13,66 | 13,77 |
| RCG 20% 0,55 / 01 | 33,22 | 13,29 | | |
| RCG 20% 0,55 / 02 | 32,26 | 12,90 | 13,10 | 13,29 |
| RCG 20% 0,70 / 01 | 34,93 | 13,97 | | |
| RCG 20% 0,70 / 02 | 35,88 | 14,35 | 14,16 | 14,35 |

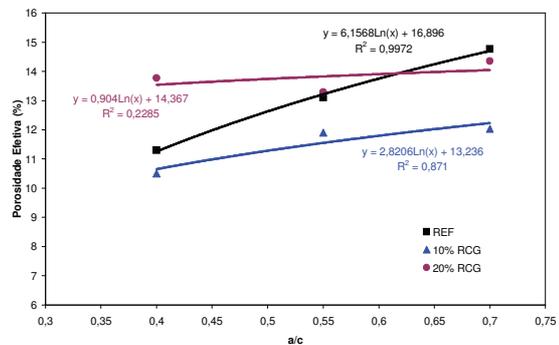


FIGURA 7 - Porosidade efetiva potencial dos concretos produzidos com e sem adição de RSG

Com os resultados mostrados nas Tabelas 11 e 12, realizou-se a ANOVA, encontrando os valores descritos na Tabela 13 para (a) taxa de absorção por sucção capilar, (b) resistência capilar e (c) porosidade efetiva dos concretos avaliados.

TABELA 13 - Resultados da ANOVA em relação: (a) à taxa de absorção; (b) resistência capilar; (c) porosidade efetiva dos concretos avaliados

(a)

| Fator | GDL | MQ | Fcalc | F0,05 | Significância |
|--------------------|-----|-------|----------|-------|---------------|
| 1 - Teor de adição | 2 | 3,55 | 71021,8 | 4,26 | S |
| 2 - a/c | 2 | 13,51 | 270259,1 | 4,26 | S |
| 12 | 4 | 1,11 | 22321,8 | 3,63 | S |
| ERRO | 9 | 0,00 | - | - | - |

(b)

| Fator | GDL | MQ | Fcalc | F0,05 | Significância |
|--------------------|-----|----------|----------|-------|---------------|
| 1 - Teor de adição | 2 | 6,20E+07 | 1,24E+12 | 4,26 | S |
| 2 - a/c | 2 | 3,20E+07 | 6,40E+11 | 4,26 | S |
| 12 | 4 | 2,07E+07 | 4,14E+11 | 3,63 | S |
| ERRO | 9 | 0,00 | - | - | - |

(c)

| Fator | GDL | MQ | Fcalc | F0,05 | Significância |
|--------------------|-----|------|-----------|-------|---------------|
| 1 - Teor de adição | 2 | 8,49 | 169569,80 | 4,26 | S |
| 2 - a/c | 2 | 5,21 | 104179,10 | 4,26 | S |
| 12 | 4 | 1,43 | 28522,40 | 3,63 | S |
| ERRO | 9 | 0,00 | - | - | - |

GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; Fcalc – Valor de F calculado; F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5% ; S – Efeito significativo; NS – Efeito não significativo.

Os valores obtidos através da ANOVA, apresentados na Tabela 13 (a), (b) e (c), constata-se que há influência significativa do teor de adição, da relação a/c e a interação entre estas duas variáveis sobre a taxa de absorção dos concretos analisados, resistência capilar e porosidade efetiva.

Com relação ao teor de adição, 10% de adição proporcionou uma redução da taxa de absorção de aproximadamente 20,2%. Porém, com adição de 20% houve um aumento na taxa de absorção em relação ao teor de adição de 10%. As partículas de RSG preenchem os pequenos poros ocasionando uma barreira física ao movimento ascendente da água. Porém, com adição de 20% de RSG houve um incremento bem maior de finos, causando um maior refinamento da estrutura de poros, formando caminhos preferenciais, contribuindo para a absorção por sucção capilar.

MOURA (2000), em seu estudo, verificou que a taxa de absorção capilar para os concretos com adição de 20% escória de cobre diminuiu. Principalmente para relações a/c maiores chegando a reduzir em até 33%, para a relação a/c 0,60. O autor atribuiu este comportamento ao efeito filler da escória de cobre que proporcionou um melhor preenchimento e distribuição dos vazios no concreto. BARATA (1998) verificou que com a adição de 10% de sílica ativa e adição de 10% de metacaulim, as taxas de absorção dos concretos diminuíram 45% e 50%, aproximadamente. Fato atribuído a formação de uma estrutura de poros mais refinada, proporcionada pelo efeito das adições utilizadas.

Segundo COUTINHO (1994), uma elevada percentagem de finos, sem atividade química, favorece ao aumento da absorção capilar.

A adição de RSG também promoveu influência significativa na resistência capilar. Com 10% de adição houve um aumento de 9,6%, e com 20% um incremento de 40,3%, em relação aos concretos sem adição.

Poder-se-ia esperar uma diminuição da resistência capilar com adição de 20% de RSG devido ao aumento da taxa de absorção e porosidade. Este aumento na taxa de absorção deve-se a um maior preenchimento de vazios e maior refinamento da estrutura de poros contribuindo para formação de caminhos preferenciais, favorecendo a absorção por sucção capilar. O aumento na resistência capilar deve-se, provavelmente, a maior dificuldade de penetração da água nesses concretos devido a este maior refinamento, fazendo com que o tempo de saturação seja bem maior.

Nos estudos realizados por MOURA (2000) a adição de 20% escória de cobre no concreto proporcionou um aumento de 17%, em média, na resistência capilar. Este aumento foi atribuído a uma melhor distribuição dos poros e uma maior resistência à passagem de líquidos dos concretos com adição.

O teor de adição de RSG mostrou-se significativamente influente na porosidade efetiva potencial dos concretos. Houve uma redução de 12% na porosidade com a adição de 10% de RSG, e um aumento de 6% com adição de 20% de RSG, em relação aos concretos de referência.

Apesar do incremento na porosidade dos concretos com 20% de adição de RSG em relação aos concretos de referência, não significou redução na resistência à compressão axial. Este comportamento pode ser atribuído à barreira física das partículas de RSG, que contribui para resistência aos esforços de compressão.

Absorção por Imersão

Diferente do ensaio de absorção por sucção capilar, o ensaio de absorção por imersão expressa a absorção de um determinado concreto num tempo e seu índice de vazios, através da relação entre a massa seca e saturada da amostra. Portanto, não considera a velocidade de absorção. Este ensaio foi realizado a frio, conforme a NBR 9778 (ABNT, 1987), com o tempo de permanência de imersão de 96 horas. Foram ensaiados três corpos-de-prova na idade de 35 dias.

A Tabela 14 apresenta os resultados do ensaio realizado com concretos sem adição (referência) e com adição de 10% e 20% de RSG.

Os resultados do ensaio de absorção por imersão estão apresentados na Tabela 14. Na tabela 15 estão apresentados a ANOVA para os índices de vazios.

TABELA 14 - Resultados do ensaio de absorção por imersão dos concretos estudados

| CONCRETO | a/c | Absorção (%) | C.V. (%) | Índice de Vazios (%) |
|------------|------|--------------|----------|----------------------|
| | 0,40 | 5,21 | 2,66 | 12,13 |
| REFERÊNCIA | 0,55 | 5,69 | 1,27 | 13,01 |
| | 0,70 | 6,15 | 1,73 | 13,94 |
| | 0,40 | 4,53 | 2,82 | 10,71 |
| 10% RSG | 0,55 | 5,14 | 1,02 | 11,95 |
| | 0,70 | 5,59 | 4,49 | 12,81 |
| | 0,40 | 5,53 | 1,67 | 12,70 |
| 20% RSG | 0,55 | 5,81 | 3,99 | 13,31 |
| | 0,70 | 6,16 | 6,41 | 14,01 |

TABELA 15 - Resultados da ANOVA em relação ao índice de vazios

| Fator | GDL | MQ | Fcalc | F0,05 | Significância |
|--------------------|-----|------|---------|-------|---------------|
| 1 - Teor de adição | 2 | 0,94 | 2080,05 | 4,26 | S |
| 2 - a/c | 2 | 1,15 | 2563,31 | 4,26 | S |
| 12 | 4 | 0,27 | 59,68 | 3,63 | S |
| ERRO | 9 | 0,01 | - | - | - |

GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; Fcalc – Valor de F calculado; F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5% ; S – Efeito significativo; NS – Efeito não significativo.

Como a absorção por imersão está diretamente relacionada com o índice de vazios, os valores obtidos pela ANOVA para ambos, mostram que o teor de adição, a relação a/c e a interação entre estas variáveis exercem influência significativas. Como o índice de vazios está relacionado com a quantidade de água absorvida pelos poros acessíveis do concreto endurecido, este tende a apresentar as mesmas proporções de ganho ou perda em relação à absorção por imersão.

Conforme esperado, o aumento da relação a/c promoveu um aumento no índice de vazios. A interação entre o teor de adição e a relação a/c apresentou-se significativa. O teor de 10% de adição apresentou melhor comportamento tanto em relação

- comportamento em relação aos concretos de referência.
- A adição de 10% RSG proporcionou uma diminuição da taxa de absorção, um incremento na resistência capilar e diminuição da porosidade efetiva potencial.
- Portanto, a partir dos resultados obtidos no programa experimental pode-se dizer que, o uso do resíduo de corte de granito (RSG) como adição em concretos é viável tecnicamente, do ponto de vista das propriedades mecânicas e parâmetros de durabilidade avaliados. Com relação ao comportamento global do resíduo de corte de granito como adição em concretos, 10% de adição apresenta-se como o teor ideal.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Escola Politécnica da Bahia (FEP), aos Laboratórios de Tecnologia da UEFS (LABOTEC) e a Rede cooperativa para aproveitamento de resíduos

aos concretos de referência quanto aos concretos com adição de 20% de RSG.

Comparando-se os resultados encontrados na porosidade efetiva potencial, pelo método do KELHAM (1988), com o índice de vazios do ensaio de absorção por imersão, verifica-se que ambos resultados apresentaram mesmo comportamento: o teor de 10% de adição de RSG apresentou um melhor desempenho. Verificou-se também, conforme esperado, o aumento da porosidade com o aumento da relação a/c.

CONCLUSÕES

- O RSG possui uma forma irregular, angulosa e diâmetro médio de 6,74µm. A estrutura do RSG é tipicamente cristalina, entretanto não foi quantificado a fração vítrea. De acordo a NBR 10004 (ABNT, 1987) pode ser considerado como um resíduo classe II – não Inerte, não apresentando risco ambiental nem à saúde humana.
- Com relação ao potencial de oxidação, de acordo com as DRX, o Fe presente no RSG está se oxidando. Entretanto, nos estudos em argamassa verificou-se que o nível de oxidação de RSG não influenciou o seu desempenho.
- As misturas de concretos com adição de RSG apresentaram maior coesão e consistência e uma diminuição da exsudação.
- Quanto à resistência à compressão axial, a adição de RSG proporciona ao concreto desempenho melhor que o do concreto de referência, em todas as relações a/c e em todos teores.
- No que se refere à resistência à tração por compressão diametral, os concretos com 10% de adição de RSG apresentaram melhor sólidos na Construção Civil (REDE RECICLAR BAHIA) por terem viabilizado o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – NBR 5738 -Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- NBR 6118 - Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado. Rio de Janeiro. 1980.
 - NBR 6474 - Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.
 - NBR 7217 - Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.
 - NBR 7218 - Agregados: determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 1987.

- NBR 7220 - Agregados: determinação de impurezas húmicas em agregado miúdo. Rio de Janeiro, 1987.
 - NBR 7223 - Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1992.
 - NBR 9937 - Agregados: determinação da absorção e massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1987.
 - NBR 10004 - Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 1987.
 - NBR 10005 - Lixiviação de resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, 1987.
 - NBR 10006 - Solubilização de resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, 1987.
 - NBR 10007 - Amostragem de resíduos, Rio de Janeiro, 1987.
 - NBR 13276 - Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência-padrão. Rio de Janeiro, 1995.
 - NBR 7809 - Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 1983.
 - NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecido: determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.
- BARATA, M.S., Concreto de alto desempenho no estado do Pará: estudo da viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com materiais disponíveis em Belém e através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998. 153p.
- CALMON, J.L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÉLLO, F.S.S.; SILVA, S.A. Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento. In: II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas, **Anais**. Salvador, BA: ANTAC, 1997, p. 64-75.
- COUTINHO, A. S., Fabrico e propriedades do betão. V. III. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 1997. 342p.
- GJORV, O, Important Test Methods for Evaluation of Reinforced Concrete Durability. In: Concrete Technology – Past, Present and Future. Proceedings of V.M. Malhotra (ed.). American Concrete Institute, Detroit, 1994.
- GONÇALVES, J.P., Utilização do resíduo de corte granito, como adição, em concretos. Dissertação de mestrado, NORIE, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2000. 135p.
- GOPALAN, M. K., Sorptivity of Fly Ash Concretes. Cement and Concrete Reseach, v.26, nº8, 1996, p. 1189-1197.
- HELENE, P.R.L., TERZIAN, P., Manual de Dosagem e Controle de Concreto. Ed. Pini, São Paulo, 1992, 349p.
- KELHAM, S. A, Water Absortion test for concrete. Magazine of Concrete Research, v. 40, nº 10. Jun/1988, p. 106 – 110.
- KOTZ, J. C., TREICHEL, P. JR., Química e Reações químicas. Rio de Janeiro, Ed. LTC, 3ªed., 1998, vol. II, 731p. (Tradução – Horacio Macedo).
- LIMA FILHO, V. X., BEZERRA, A. C., SANTOS, F. C., NOGUEIRA, R. E. F. Q., FERNANDES, A. H. M., Determinação de parâmetros para a racionalização do processamento de rochas graníticas por abrasão. In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. Anais. nov/1999, São Paulo.
- MOURA, W. A., Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS. 2000. p.192. Tese (doutorado).
- MOURA, W. A; GONÇALVES, J. P., “Utilização do Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (Mármore e Granitos) na Construção Civil”. In: IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Foz do Iguaçu/PR, maio/2002.
- MOURA, W. A; GONÇALVES, J. P., LEITE, R. S., “Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas para revestimento e confecção de lajotas para piso”. In: Revista Sitientibus, UEFS, Feira de Santana/Ba, v.26, p.49 - 62, 2002.
- PONTES, I., F., “Aproveitamento de finos gerados nas serragens de mármore e granitos”. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, EPUSP, 200. 150p.
- SILVA, S.A.C, Caracterização do resíduo da serragem de blocos de granito – Estudo do potencial de aplicação na fabricação de argamassas de assentamento e de tijolos de solo-cimento. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória/ES, 1998, 159 p.

APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS FINOS DAS SERRARIAS DE SANTO ANTÔNIO DE PÁDUA/RJ

Eduardo Augusto de Carvalho¹, Antônio Rodrigues de Campos¹, Carlos César Peiter¹ e José Carlos da Rocha²

¹ Centro de Tecnologia Mineral – Av. Ipê 900, Cid. Universitária . Ilha do Fundão. Rio de Janeiro.RJ.
ecarvalho@cetem.gov.br; acampos@cetem.gov.br; cpeiter@cetem.gov.br;

² Instituto Nacional de Tecnologia – Av. Venezuela, 82 . Santo Cristo. Rio de Janeiro. RJ.
techmat@techmat.com.br

RESUMO

A extração de rochas ornamentais em Santo Antônio de Pádua, RJ, teve o seu início nos primeiros anos da década de 50. A produção cresceu substancialmente nos últimos dez anos, quando as rochas ornamentais de Santo Antônio de Pádua passaram a ser utilizadas principalmente nos revestimentos de paredes e pisos, contrastando com o uso inicial de piso de currais. Em Santo Antônio de Pádua são comercializadas dois tipos de rochas: a pedra paduana (também chamada de miracema) e a pedra madeira.

O grande volume de perdas na lavra e no beneficiamento dessas rochas, estimado em cerca de 80% do extraído, vem ocasionado graves problemas ambientais na região. Um destes problemas é o lançamento no Rio Pomba e seus afluentes dos finos de serragem provenientes do corte das rochas em serras de disco diamantado. Após o tratamento do efluente das serrarias é gerado um resíduo sólido, que após uma etapa de secagem e desagregação pode ser utilizado na formulação de argamassas, em cerâmica vermelha e na formulação de borrachas.

O presente trabalho dará ênfase no estudo de alternativas tecnológicas para aproveitamento desses resíduos finos. Os melhores resultados foram obtidos na formulação de argamassas comum e colantes. As propriedades alcançadas pela argamassa gerada com os finos das serrarias de Santo Antônio de Pádua, nos estudos realizados até o momento, são no mínimo idênticas às das argamassas produzidas pelos fabricantes líderes desse segmento no mercado. A utilização dos finos dos resíduos do corte das rochas de Santo Antônio de Pádua na formulação de argamassas colantes e comum, além de mitigar o impacto ambiental, proporcionará um aumento do número de empregos na região, cuja economia hoje está bastante centrada na exploração, beneficiamento e comercialização das rochas ornamentais.

INTRODUÇÃO

Localizada a cerca de 300 quilômetros da cidade do Rio de Janeiro, Santo Antônio de Pádua apresenta uma população de 39.000 habitantes e um Produto Interno Bruto em torno de R\$ 4.360,00. Sua economia está centrada na indústria de papel, na oleicultura e, principalmente, na indústria de rochas

ornamentais. O número de empregos diretos no setor está estimado em torno de 2.000, em empresas registradas. Na economia informal desse setor estima-se mais 4.000 empregos diretos em empresas que não se encontram legalizadas (Villaschi et al., 2000).

A extração de rochas ornamentais na região de Santo Antônio de Pádua começou a crescer a partir de 1980, com o início da utilização dessas rochas na construção civil. A rocha existente na região é classificada geologicamente como um milonito gnaise, sendo oriundo de um metamorfismo de rochas ígneas à semelhança dos gnaisses. A rocha apresenta variedades localmente conhecidas comercialmente como pedra madeira, olho de pombo, pinta rosa e granito fino. As três últimas variedades são comercializadas como pedra “paduana” e apresenta uma cor cinza. Esse tipo de material é o mais abundante na região, sendo utilizada no revestimento de paredes, muros, pisos, paralelepípedos e brita para construção civil. A pedra “madeira” apresenta como cores predominantes o rosa, o amarelo e o branco, sendo também utilizada no revestimento de paredes, muros e pisos.

O beneficiamento é feito manualmente e de maneira bastante rudimentar, com a presença de pouquíssimos especialistas. Nas serrarias, as lajes são serradas e abertas em lajotas de 47 x 47 x 4 cm (Figura 1), sendo em seguida desdobrada em lajinhas de 23 x 23 x 1,5 cm e 11,5 x 11,5 x 1,5 cm e bloquinhos de 23 x 11,5 x 4 cm. As perdas nas pedreiras e serraria da região são estimadas em torno de 80%, ocasionando profundos problemas ambientais, como acúmulo de rejeitos próximos a lavra e as serrarias, poluição sonora além da contaminação do Rio Pomba e seus afluentes com finos de serraria (resíduos sólidos) provenientes do corte das serras.

Recentemente, com a instalação de 46 unidades de tratamento de efluentes (Figura 2) nas serrarias de Santo Antônio de Pádua provocou uma forte redução da contaminação do Rio Pomba e seus afluentes. As 46 serrarias que apresentam unidades de tratamento de efluentes apresentam um total de 138 unidades operacionais de serras, gerando cerca de 720 t/mês de produto fino. Cerca de 95% da água presente nos efluentes das serrarias passou a ser reciclada, enquanto o resíduo sólido é removido dos tanques de decantação, através do uso de bombas auto-escovante, até uma área próxima aos tanques onde é realizado a pré-secagem do mesmo. O resíduo sólido após um período de secagem de cerca de 15 dias, apresenta cerca de 40% de