

Avaliação da influência da utilização do resíduo de corte de granito (RCG), como adição, em propriedades mecânicas do concreto

Jardel Pereira Gonçalves

Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ
jardel@labest.coc.ufrj.br

Washington Almeida Moura

Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA
wam@uefs.br

Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Núcleo Orientado à Inovação da Edificação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS
dmolin@cpgec.ufrgs.br

Recebido em: 04/12/2001 aceito em: 29/01/2002

A utilização de resíduos e subprodutos industriais na Construção Civil apresenta-se como uma excelente alternativa para diminuição do impacto ambiental e maior contribuição para o desenvolvimento sustentável. O resíduo de corte de granito (RCG) é gerado no processo de serragem de blocos de rochas em placas, num equipamento denominado tear. No Brasil, a quantidade estimada de geração deste resíduo é de 165.000 toneladas por ano. Foi realizada a caracterização física, química e de risco ambiental do (RCG), bem como a avaliação do potencial de oxidação do Fe contido. Neste trabalho são apresentados resultados do aproveitamento do RCG como adição em concretos, em frações de 10% e 20% em relação à massa de cimento. Para os concretos produzidos, foram avaliadas resistência à compressão axial, a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à tração na flexão. A análise dos resultados permite concluir que o RCG é classificado como resíduo classe II – não inerte, que sua utilização como adição em concretos é viável tecnicamente, e que 10% de adição é o teor que apresenta melhor desempenho.

Palavras-chave: Resíduo de corte de granito; adições minerais; concreto.

The use of waste and industrial by-products in the building sites seems to be an excellent alternative to decrease the environmental impact of the industry as well as to contribute to sustainable development. The granite cut residue (GCR) is a result of the process of sawdusting rock blocks into plates using an equipment called loom. In Brazil, the estimated amount of residue produced annually is 165.000 tons. This article described a study in which GCR physical and chemical characterisation was carried out. Tests to evaluate the potential oxidation of existing Fe in the GCR were also performed. The results of the use of the GCR as an admixture in concrete in fractions of 10% and 20% of the cement mass are presented. The compressive strength, flexural and split tensile strength of concrete were evaluated. The analysis of the results led to the conclusions that the GCR can be classified as class II residue (non-inert), that its use as an admixture in concrete production is technically feasible, and also that the best performance is achieved with an admixture ratio of 10%.

Keywords: Granite cut residue; admixture; concrete.

Introdução

Grande parte dos processos produtivos atualmente é fonte geradora de resíduos, que se apresentam na forma de gases, líquidos ou sólidos, podendo causar grande degradação ambiental. A construção civil é o setor da atividade tecnológica que consome grande volume de recursos naturais e parece ser o mais indicado para absorver os resíduos sólidos.

No processo de beneficiamento das rochas ornamentais são gerados vários tipos de resíduos, que são: resíduos da extração do bloco; resíduos da serragem para enquadrá-los nas dimensões padronizadas; do processo de serragem e resíduos de polimento. Este artigo enfoca apenas o resíduo gerado no processo de serragem (RCG), que se apresenta em maior quantidade.

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 do RCG é de 165.000 ton/ano. Espírito Santo, Bahia, Ceará, Paraíba, são os estados que mais geram este resíduo (GONÇALVES, 2000). Como a quantidade de resíduo gerada é muito grande e tentando contribuir para um maior desenvolvimento sustentável, alguns pesquisadores já estudaram o resíduo resultante do beneficiamento de rochas ornamentais na produção de argamassas, tijolos cerâmicos, peças cerâmicas, aterros compactados e concretos.

Neste trabalho foi realizada a caracterização física, química e de risco ambiental do resíduo de corte de granito (RCG), bem como a sua avaliação do ponto de vista do potencial de oxidação do Fe contido. Foi também realizado o estudo da viabilidade técnica do seu uso como adição para concretos, em teores de 10% e 20% em relação à massa de cimento. Nos concretos produzidos foram avaliadas a resistência à compressão axial, a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à tração na flexão.

Programa experimental

O programa experimental desenvolvido visa a caracterização do RCG e avaliação da viabilidade técnica para a produção de concretos. Na caracterização do RCG, 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 e risco ambiental. A viabilidade de utilização da adição de RCG nos concretos foi verificada através de propriedades mecânicas

(resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão).

Caracterização dos materiais

RCG

O RCG foi coletado de uma empresa que utiliza apenas granitos em seu processo de beneficiamento. O processo de coleta seguiu as recomendações do item 5.1.6 da NBR 10007 (ABNT, 1987).

O RCG possui uma massa específica de 2,76 g/cm³, medida conforme a NBR 6474 (ABNT, 1984).

A caracterização química do RCG consta na Tabela 1.

A Figura 1 mostra a difração de raios X do RCG.

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

Para utilização do RCG 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, para determinação da granulometria ótima do RCG para utilização como adição em concretos, foi realizado um estudo com diferentes tempos de moagem, num moinho de bolas horizontal. O parâmetro de definição do tempo de moagem foi o diâmetro médio das partículas, determinado através da granulometria a laser.

Compostos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₂	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

Tabela 1 - Composição química do RCG

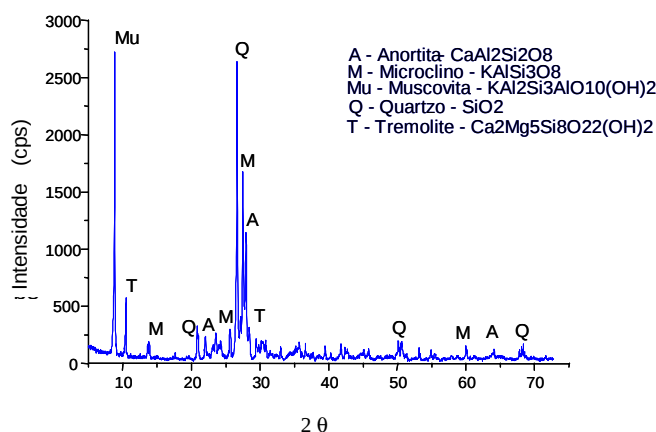


Figura 1 - Difratograma de uma amostra de RCG

Os resultados de moagem apresentados na Tabela 2 mostram que apenas com o destorroamento (num tempo de 2,5min) o RCG apresentou um diâmetro médio de 6,74 µm. Este tempo foi adotado para o destorroamento do RCG. Visando identificar a forma dos grãos do RCG, foram realizadas microscopias com MEV por elétrons secundários, conforme ilustra a Figura 2. Para avaliação do risco ambiental do RCG foram realizados os ensaios de lixiviação e solubilização do resíduo de acordo com a NBR 10005 (ABNT, 1987f) e NBR 10006 (ABNT, 1987g), respectivamente. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

A NBR 10004 (ABNT, 1987e), 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) resíduos Classe II - não inertes e c) resíduos Classe III - Inertes. 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, 1987e), apenas o flúor apresentou concentração superior. Como o flúor não é uma substância considerada perigosa, o RCG, conseqüentemente, não apresenta riscos à saúde humana, sendo classificado como Classe II - não inerte.

Agregados

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

Água

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

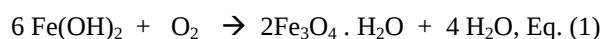
Avaliação do potencial de oxidação do RCG

Devido à presença da granalha¹ no processo de serragem dos blocos e a constatação visual da oxidação do ferro contido, foi investigado o potencial de oxidação do Fe presente no resíduo 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 quando adicionado 20% de RCG, em relação a massa de cimento, em argamassas submetidas a ciclos de imersão.

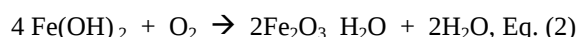
Na Figura 3 (a) e (b) são mostrados os resultados das DRX realizadas.

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 maguetita e maguemita em proporções pouco maiores que a verificada na amostra de um dia. Este fato é esclarecido por Kotz e Treichel (1998), afirmam que a química da corrosão do ferro na presença da água e oxigênio é 100 vezes mais rápida que na ausência de oxigênio, 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 RCG por ciclos de imersão e secagem

A avaliação do potencial de oxidação do Fe contido no RCG em argamassas foi realizada através da comparação do desempenho entre argamassas produzidas sem adição de RCG (referência) e com adição de 20% de RCG, 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 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.

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. Neste sentido pode-se afirmar que não houve diferença significativa das argamassas com ou sem RCG.

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 RCG.

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

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

Tabela 2 - Diâmetro médio do RCG, por granulometria laser, em função do tempo de moagem

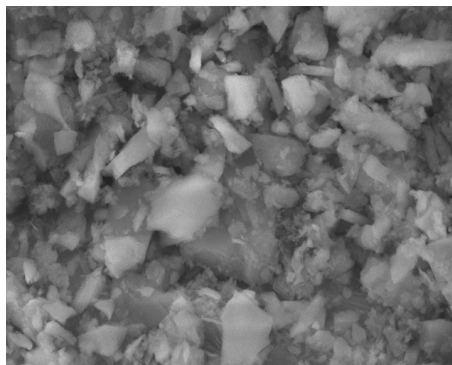
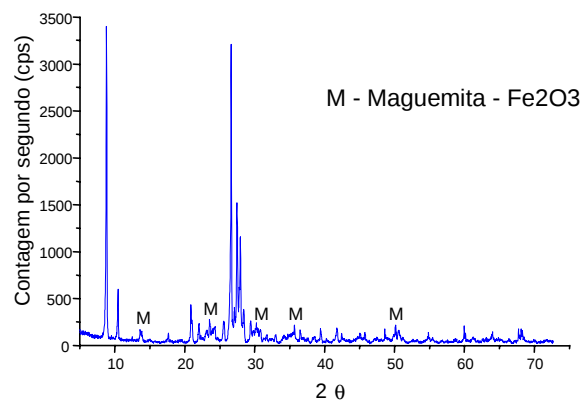


Figura 2 - MEV por elétrons secundários: grãos de RCG separados. Aumento de 5000x

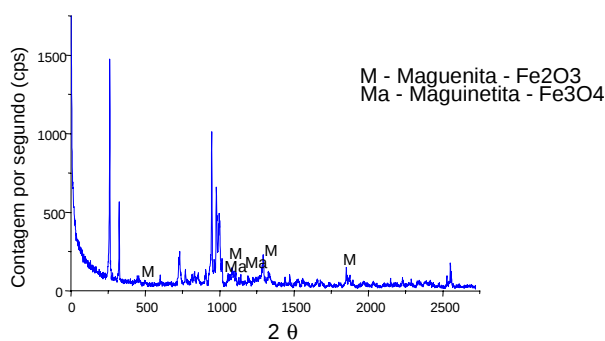
Metais Solubilizados			Metais Lixiviados		
Elemento ppm	RGC	NBR1004 (ppm) Limites máximos	Elemento (ppm)	RGC	NBR 10004 (ppm) Limites máximos
Ba	N.D.	1	Ba	0,637	100
Cd(ppb)	N.D.	0,005	Cd	0,16	0,5
Pb (ppb)	N.D.	0,05	Pb (ppb)	N.D.	5
Cr	N.D.	0,05	Cr	0,29	5
Ag (ppb)	N.D.	0,05	Ag	0,0007	5
Ou	0,0024	1	As	N.D.	5
Al	N.D.	0,2	Hg	N.D.	0,1
Fé	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			

Tabela 3 - Resultados do ensaio de lixiviação (NBR 10005, ABNT – 1987f) e solubilização (NBR 10006, ABNT – 1987g) do RG

	Agregado graúdo	Agregado miúdo
Dimensão máxima característica	19mm	2,4
Módulo de finura (NBR 7217, ABNT, 1987a)	7,0	2,45
Massa específica (NBR 9937, ABNT, 1987d) (g/cm^3)	2,710 ³	2,624
Absorção (NBR 9937, ABNT, 1987d) (%)	0,60	-
Torrões de argila (NBR 7218, ABNT, 1987b)	Sem presença	-
Índice de forma (NBR 7809, ABNT, 1983)	2,64	-
Massa unitária (g/cm^3)	1,47 ³	-

Tabela 4 - Características dos agregados utilizados

(a)



(b)

Figura 3 - Difração de raios X de amostras de RCG: (a) amostra com um dia de gerada e (b) amostra com quatro meses

Mistura	Ftf (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

Tabela 5 - Resistência à tração na flexão das argamassas com e sem adição de RCG

A semelhança de comportamento das argamassas quanto à resistência à tração na flexão se explica pelo fato de a adição fíler melhorar muito pouco o empacotamento em argamassas, devido a uma melhor uniformidade da matriz

cimentícia. Não houve influência da oxidação do Fe na resistência à tração na flexão, provavelmente devido aos seguintes fatores: pequena quantidade de RCG nas misturas (20% em relação a massa de cimento), sendo que

do teor de RCG 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 RCG.

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 RCG 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 RCG 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 RCG.

Avaliação dos concretos com adição de RCG

Dosagem dos concretos

Para a dosagem dos concretos utilizou-se a metodologia de dosagem do IPT/EPUSP, descrita por Helene e Terzian (1992), sendo que os parâmetros definidos foram a 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%. Para os concretos com adição, em consequência do aumento da quantidade de finos, a coesão e a consistência foram aumentadas, ocorrendo redução do abatimento. Para manter o abatimento na faixa adotada seria necessário aumentar a relação água / materiais secos, usar algum aditivo plastificante ou ajustar o teor de argamassa seca ideal. O uso de aditivos químicos foi

descartado, para evitar a inclusão de mais uma variável. A melhor alternativa foi o ajuste do teor de argamassa seca ideal. Os concretos com 10% e 20% de adição ficaram com teores de 49% e 48%, respectivamente, mantendo-se constante a relação água/cimento. Na Tabela 6 estão apresentados os parâmetros de dosagem.

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

As curvas de comportamento dos concretos confeccionados estão apresentadas na Figura 4.

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 RCG 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 RCG 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, pois todo material com pequeno diâmetro tem este efeito, conforme abordado por muitos pesquisadores. Cabrera et al. (1998), em seu estudo sobre concretos de alta resistência com cimento com fíler calcário, também encontrou misturas de concretos coesivos e sem indícios de exsudação.

Relação a/c	Teor de adição (%)	Cimento	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Consumo de cimento (kg/m ³)	Teor de água/materiais secos (%)
0,4	0	1	1,33	2,32	480	8,6
0,55			2,20	3,20	347	
0,7			3,07	4,07	271	
0,4			1,12	2,32	491	
0,55	10	1	1,96	3,19	360	8,8
0,7			2,79	4,06	277	
0,4			0,91	2,28	505	
0,55			1,69	3,15	364	
0,7	20	1	2,49	4,00	284	9,1

Tabela 6 - Proporcionamento (em massa) e parâmetros de dosagem dos concretos executados

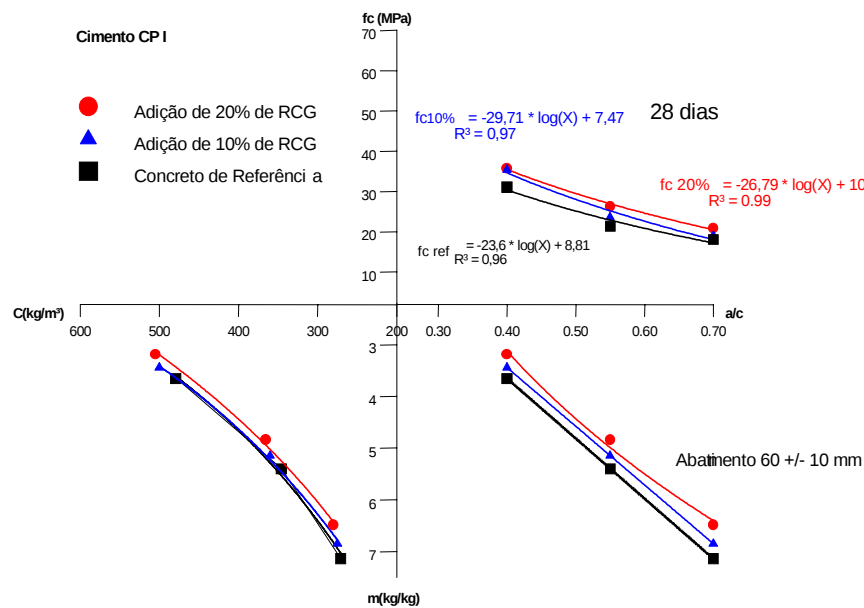


Figura 4 - Curvas de comportamento dos concretos com e sem adição de RCG

Propriedades do concreto no estado endurecido

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

Para a verificação do efeito da adição de RCG na resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral foram moldados três corpos-de-prova cilíndricos para cada idade.

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 RCG 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. Segundo Ribeiro (1995), a ANOVA permite verificar a influência das variáveis dentro de seu grupo e entre os grupos, através da média geral e os erros envolvidos.

A verificação da significância de uma determinada variável ou grupo de variáveis sobre uma variável dependente é comprovada através da comparação entre um valor calculado ($F_{\text{calculado}}$) e valores tabelados (F_{tabelado}) (distribuição de probabilidades de Fischer).

Para que a influência seja considerada significativa, o $F_{\text{calculado}}$ deverá ser maior que o F_{tabelado} . Os valores de F tabelado são em função dos graus de liberdade do grupo e/ou entre grupos e o grau de liberdade do erro, que traduz num determinado nível de significância. Para estas análises, o nível de significância adotado foi de 5%. A ANOVA foi realizada através do software Statística.

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 (1994b). Os resultados relativos à resistência à compressão axial constam na Tabela 7.

A partir dos resultados de resistência à compressão axial dos corpos-de-prova moldados aos 28 dias, de acordo com os traços mostrados na Tabela 6, elaborou-se o diagrama da Figura 4, que mostra as curvas de comportamento dos concretos estudados. Com relação aos consumos de cimento, que os concretos de referência apresentaram valores menores que os concretos com adição de RCG, conforme Tabela 6. Entretanto, para a mesma faixa de resistência à compressão axial, os concretos com adição de RCG apresentaram menores consumos, conforme verificado através da Figura 4.

Na Figura 5.(a), (b) e (c) estão apresentados os gráficos de resistência à compressão axial dos concretos produzidos. Através da ANOVA foi constatada a significância estatística das variáveis: a/c, teor de adição de RCG e idade na resistência à compressão axial.

Na Tabela 8 estão apresentadas a análise de influência dos fatores e suas possíveis interações.

Verifica-se que o teor de adição de RCG, 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, entre a relação a/c e a idade.

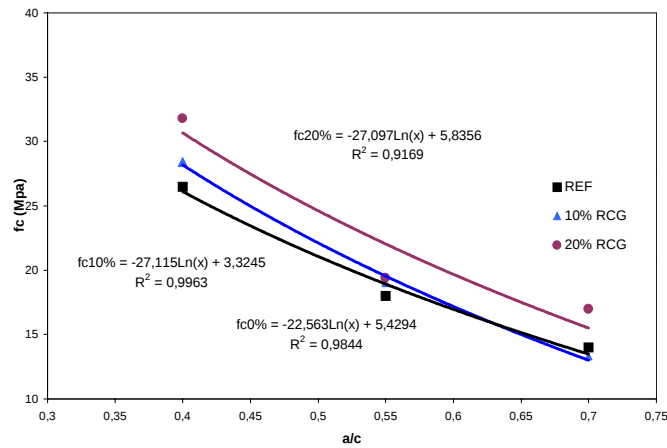
IDADE (dias)										
		7			28			63		
MISTURA	a/c	fc (MPa)	fcm (MPa)	C.V. (%)	fc (MPa)	fcm (MPa)	C.V. (%)	fc (MPa)	fcm (MPa)	C.V. (%)
REFERÊNCIA	0,40	29,0			30,4			32,4		
		24,9	26,5	8,4	30,7	31,1	3,1	33,1	33,4	3,7
		25,5			32,2			34,8		
	0,55	18,2			19,0			23,6		
		17,8	18,0	1,1	23,2	21,4	10,2	23,8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

Tabela 7 - Resistência à compressão axial dos concretos

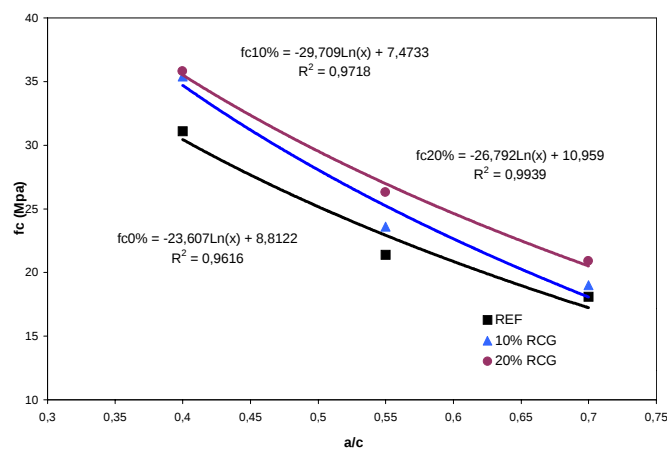
Fator	GDL	MQ	Fcalc	F0,05	Significância
1 - Teor de adição	2	120,22	44,76	3,29	S
2 - a/c	2	1591,1	592,37	3,29	S
3 - Idade	2	260,78	97,08	3,29	S
12	4	3,04	1,13	2,66	NS
13	4	3,67	1,36	2,66	NS
23	4	2,44	0,9	2,66	NS
123	8	5,06	1,88	2,24	NS
ERRO	54	2,68	-	-	-

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

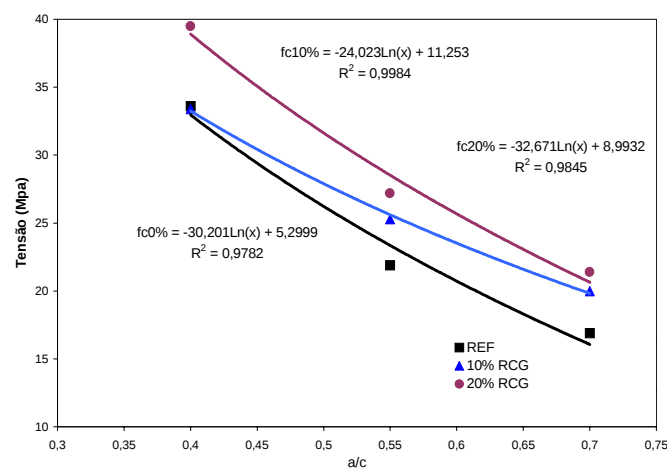
Tabela 8 - Resultados da ANOVA em relação à resistência à compressão axial dos concretos



(a)



(b)



(c)

Figura 5 - Resistência à compressão dos concretos aos (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 63 dias de idade

A falta de interação entre o teor de adição e idade significa que a adição não provoca aumentos significativos na resistência à compressão axial ao longo

do tempo. Este comportamento é esperado em adições que não possuem atividade pozolânica.

Moraes et al. (2000), em seu estudo visando identificar a influência da substituição da cinza volante, da cinza de casca de arroz e do filer calcário sobre a resistência do concreto, constatou que o efeito filer foi menor quanto maior a relação a/c e maior teor de substituição. Por outro lado, não houve variação significativa com 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 apresentaram um ganho médio de 8%, enquanto que para os concretos com adição de 20% de RCG houve um aumento médio de 19,6% em relação ao concreto de referência.

Com relação à variação de resistência à compressão axial em função do efeito isolado da relação a/c, os concretos apresentaram menores valores com o aumento da relação, conforme esperado.

A variável idade, analisada isoladamente, também mostrou influência significativa, de forma que para as idades avaliadas, os concretos apresentaram um ganho médio na resistência de 22% de 7 para 28 dias, e de 4% de 28 para 63 dias.

Pode-se explicar o aumento do desempenho dos concretos com adição de RCG em função da sinergia dos seguintes fatores:

(a) como o RCG não possui atividade pozolânica, seu efeito físico, devido a sua alta finura, promoveu um refinamento na estruturas de poros. Este efeito contribuiu para uma maior densificação da zona de transição e da matriz cimentícia e, conseqüentemente, houve um ganho de resistência à compressão. Segundo Goldman e Bentur (1993), o efeito microfíler é o principal fator para a densificação da zona de transição, contribuindo para um ganho nas propriedades mecânicas nas idades iniciais;

(b) a distribuição das pequenas partículas de RCG em todo concreto, associada à densificação da interface matriz/agregado, fez com que houvesse um preenchimento dos poros existentes e diminuição dos espaços disponíveis para a água. 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. Cabrera et al. (1998), no seu estudo de concretos de alta resistência com cimento com adição de filer calcário enfatiza que os materiais finos podem alojar-se entre os grãos de clínquer promovendo um melhor empacotamento e uma maior dispersão do mesmo dentro da mistura; e

(c) a distribuição dos grãos de RCG também pode ter promovido uma maior dispersão e aceleração da formação de produtos hidratados da matriz cimentícia, por atuarem como pontos de nucleação. Segundo Isaia (1995), a introdução de pequenas partículas na matriz cimentícia, mesmo não totalmente pozolânicas, provoca segmentação dos poros maiores e incrementa os locais de nucleação para

precipitação dos produtos de hidratação, acelerando as reações e formando cristais de hidróxido de cálcio menores.

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 constam na Tabela 9.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 9 foram elaborados os gráficos de resistência à tração por compressão diametral, para 7, 28 e 63 dias conforme Figura 6.

Na Tabela 10 estão apresentados os resultados da análise de influência dos fatores, e suas possíveis interações, realizadas através da ANOVA, dos concretos produzidos em relação à resistência à tração por compressão diametral. 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 RCG apresentaram melhor comportamento do que os concretos com adição de 20%. Os concretos com 10% de adição apresentaram um ganho na resistência à tração por compressão diametral de 7,2%, em relação aos concretos de referência, enquanto que os concretos com 20%, um decréscimo de 5,8%. Este comportamento foi diferente do verificado na resistência à compressão axial, em que as partículas de RCG promoveram ganhos nos teores analisados. Isso comprova o efeito filer da adição no concreto. Conforme esperado, a relação a/c também influenciou significativamente na resistência à tração por compressão diametral.

Os resultados mostram que há um decréscimo da resistência à tração por compressão diametral com o aumento da relação a/c.

Para cada idade avaliada, analisando o conjunto dos resultados, os concretos apresentaram um ganho significativo ao longo das idades, como era de se esperar.

No que se refere à interação entre o teor de adição de RCG e a idade, os concretos com 10% de adição apresentaram um melhor comportamento, proporcionando um aumento na resistência, em média, de 20,6% de 28 para 63 dias. Enquanto que para os concretos de referência o aumento na resistência foi de 28,6%.

A influência da adição de RCG ao longo das idades, constatada pela interação entre essas duas variáveis, não se caracteriza por uma atividade pozolânica, já que o RCG apresenta uma estrutura bastante cristalina. Houve, provavelmente, um melhor preenchimento de vazios.

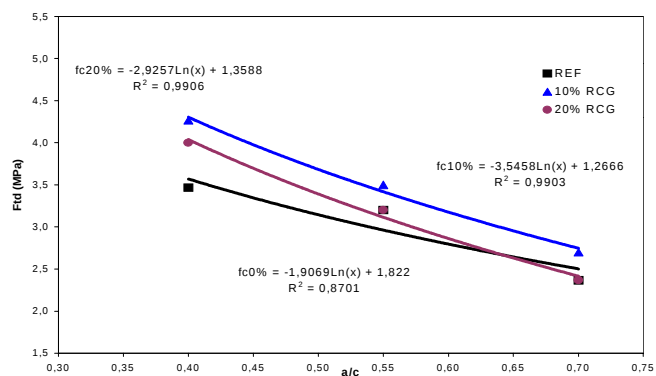
		Idade (dias)								
		7			28			63		
MISTURA	a/c	ft(MPa)	ftm(MPa)	C.V.(%)	Ft(MPa)	ftm(MPa)	C.V.(%)	ft(MPa)	ftm(MPa)	C.V.(%)
REFERÊNCIA		3,6			4,4			5,0		
	0,40	3,4	3,5	3,3	4,4	4,4	1,3	5,3	5,2	3,0
		3,4			4,3			5,2		
		3,1			3,5			4,2		
	0,55	3,3	3,2	3,1	3,4	3,4	4,5	4,0	4,1	2,4
		3,2			3,2			4,1		
		2,2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

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

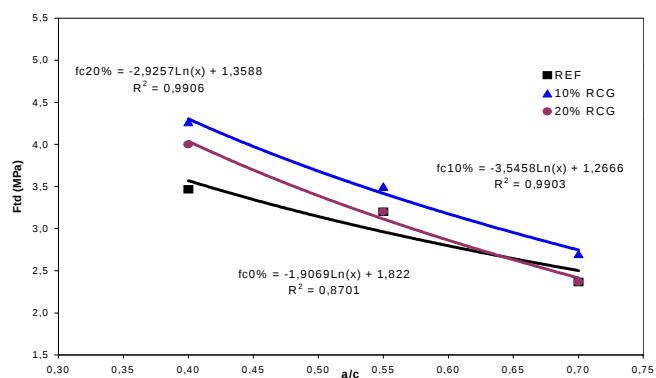
Fator	GDL	MQ	Fcalc	F0,05	Significância
1 - Teor de adição	2	1,71	29,76	3,29	S
2 - a/c	2	15,96	276,78	3,29	S
3 - Idade	2	4,97	86,17	3,29	S
12	4	0,15	0,25	2,66	NS
13	4	0,73	12,61	2,66	S
23	4	0,12	2,1	2,66	NS
123	8	0,62	1,10	2,24	NS
ERRO	54	0,57	-	-	-

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

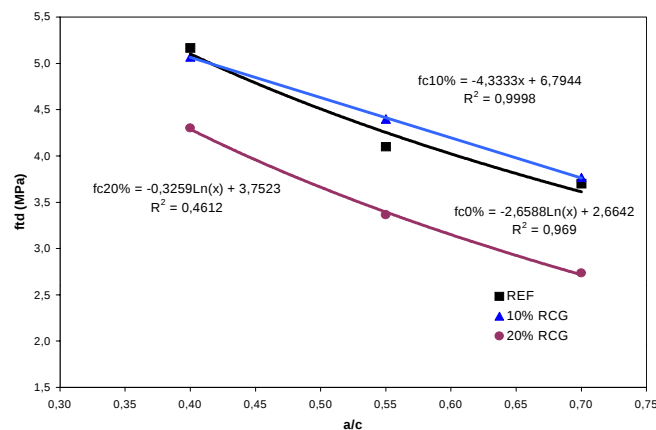
Tabela 10 - Resultados da ANOVA em relação à resistência à tração por compressão diametral dos concretos



(a)



(b)



(c)

Figura 6 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos nas idades de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 63 dias de idade

Quando os concretos são submetidos aos esforços de tração, a linha média de fratura passa pela zona de maior fragilidade. Esta zona pode ser entre o poro e o filer, no contato filer - filer ou no contato filer - produtos hidratados/produtos não hidratados, já que não há ligações

químicas entre o grão de adição e os compostos. Portanto, esse ganho ocorreu, provavelmente, devido a uma sinergia entre o efeito filer do RCG preenchendo os interstícios e devido a maior quantidade de produtos

hidratados menores e mais dispersos, gerados a partir da dispersão das partículas de RCG.

Com adição de 20% de RCG, esta aceleração do processo de hidratação gerando produtos menores também acontece. Porém, como há uma maior quantidade de partículas de RCG 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 justifica a redução dos níveis de resistência à tração dos concretos com 20% de adição de RCG. Com adição de sílica ativa, o comportamento é diferente, que além de provocar um refinamento, torna a estrutura de poros dos concretos descontínua (BARATA, 1998).

Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado segundo a norma NBR 12142 (ABNT, 1991), na idade de 28 dias. Foram ensaiados dois corpos-de-prova prismáticos, com dimensões 10x10x35cm, para cada traço de concreto.

Os resultados relativos à resistência à tração na flexão constam na Tabela 11, a partir dos quais foi elaborado o gráfico de comportamento dos concretos aos 28 dias, conforme Figura 7.

A Tabela 12, apresenta a análise de influência dos fatores e suas possíveis interações na resistência à tração na flexão, realizada através da ANOVA.

Os resultados da Tabela 12 mostram que há influência significativa na resistência à tração na flexão apenas da relação a/c, e que não há interação entre a relação a/c e o teor de adição para os concretos avaliados aos 28 dias de idade.

Pode-se observar uma grande variabilidade nos resultados. Este fato é freqüente nos ensaios de resistência à tração na flexão. A relação a/c mostrou-se significativa na resistência à tração na flexão, conforme esperado.

Embora não comprovado estatisticamente, em função da variabilidade dos resultados, os concretos com adição de 10% e 20% de RCG apresentaram um comportamento semelhante, observando-se um ganho na resistência à tração na flexão em relação ao concreto de referência.

A distribuição das partículas, o refinamento dos poros, a possível dispersão e aceleração da hidratação fizeram com que a resistência aos esforços de tração na flexão nos concretos com adição de RCG se elevassem, porém em proporção inferior ao ganho promovido na resistência à compressão.

Moura (2000), em seu estudo, verificou que a adição de 20% de escória de cobre moída em concretos provocou um aumento de 17% na resistência à tração na flexão, para concretos com relação a/c - 0,60, em relação aos concretos de referência. Ele verificou também, que o aumento na resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão foram bem menores do

que os valores obtidos para resistência à compressão axial, fato atribuído ao efeito filer da escória de cobre ser o principal responsável pelo aumento da resistência à compressão.

Foram realizadas MEV em amostras de concreto com relação a/c - 0,55 para verificar a possível influência da adição de RCG na zona de transição.

A Figura 8 (a), (b) e (c) apresenta as micrografias dos concretos. As micrografias indicam a densificação da zona de transição entre matriz e agregado nas amostras analisadas preenchida pelos grãos de RCG.

Conclusões

O RCG possui uma forma irregular, angulosa e diâmetro médio de 6,74µm.

A estrutura do RCG é tipicamente cristalina, entretanto não foi quantificada a fração vítrea. De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 1987e), 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 RCG está se oxidando. Entretanto, este processo não ficou evidenciado nos resultados do ensaio de secagem e imersão em solução contendo cloretos (avaliação visual, resistência à tração na flexão e ganho de massa).

As misturas de concretos com adição de RCG apresentaram maior coesão e consistência e uma diminuição da exsudação. O aumento do teor de adição de RCG promoveu um aumento na coesão.

Quanto à resistência à compressão axial, a adição de RCG 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 RCG apresentaram melhor comportamento em relação aos concretos de referência. Os concretos produzidos com adição de RCG em relação à resistência à tração na flexão, apresentaram um ganho em relação aos concretos de referência. Entretanto não houve diferença significativa entre os resultados.

A partir dos resultados obtidos no programa experimental pode-se dizer que o uso do resíduo de corte de granito (RCG) como adição em concretos é viável tecnicamente, do ponto de vista das propriedades mecânicas.. Considerando o comportamento global dos concretos, 10% de adição de RCG apresenta-se como o teor ideal.

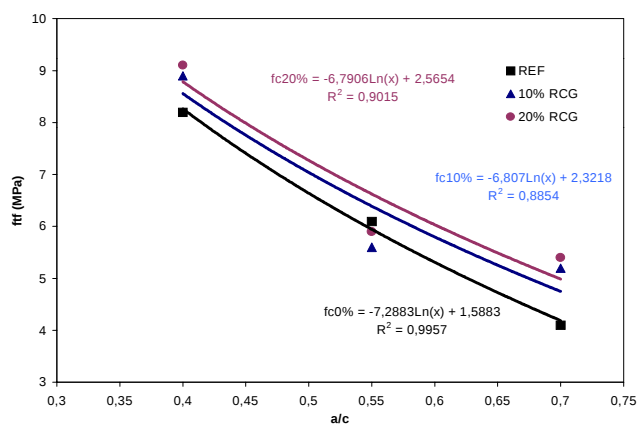


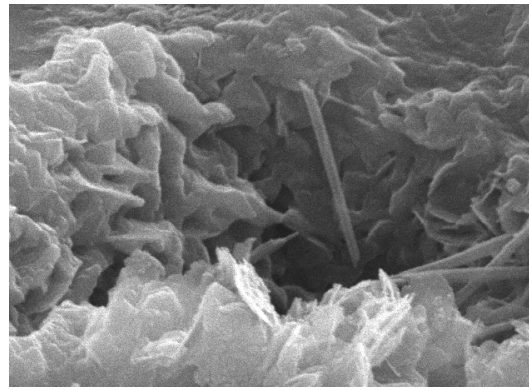
Figura 7 - Resistência à tração na flexão dos concretos produzidos aos 28 dias

IDADE (dias)				
28				
Mistura	a/c	ft(MPa)	ftm(MPa)	C.V.(%)
REFERÊNCIA	0,40	7,6	8,2	10,3
		8,8		
	0,55	6,3	6,1	4,6
		5,9		
	0,70	4,4	4,1	12,2
10% RCG	0,40	8,0	8,9	14,9
		9,9		
	0,55	6,0	5,7	8,8
		5,3		
	0,70	6,1	5,2	24,5
20% RCG	0,40	9,6	9,1	7,8
		8,6		
	0,55	5,4	5,9	12,0
		6,4		
	0,70	6,5	5,5	27,2
		4,4		

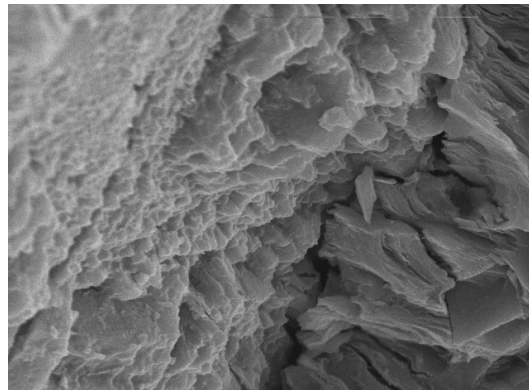
Tabela 11 - Resultados de resistência à tração na flexão dos concretos produzidos

Fator	GDL	MQ	Fcalc	F0,05	Significância
1 - Teor de adição	2	0,76	0,88	4,26	NS
2 - a/c	2	23,78	27,87	4,26	S
12	4	0,45	0,52	3,63	NS
ERRO	9	0,86	-	-	-

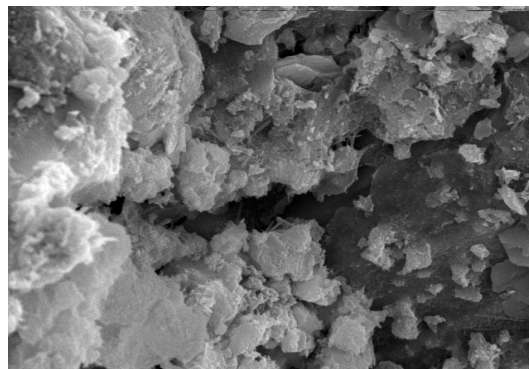
Tabela 12 - Resultados da ANOVA em relação à resistência à tração na flexão



(a)



(b)



(c)

Figura 8 - Microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários (3500X) dos concretos produzidos: (a) Referência; (b) 10% de adição de RCG; (c) 20% de adição de RCG

Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 5739**: Concreto: ensaio de compressão 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 7222:** Argamassa e concreto: determinação de resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **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 12142:** Concreto: determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, 1991

_____. **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.

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. 1998. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CABRERA, O.; BONAVETTI, V.; Donza, H.; IRASSAR, E. F. Hormigones de alta resistencia con cementos de filler calcáreo. In: CONGRESO INTERNACIONAL DE TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN, 1998, Buenos Aires, Argentina. **Anales...** Buenos Aires, Argentina: Asociación Argentina de

Tecnología del Hormigón, 1998. p. 195-204.

GOLDMAN, A.; BENTUR, A. Effects of pozzolanic and non-reactive microfillers on the transition zone in high strength concretes. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTERFACES CEMENTITIOUS COMPOSITES, 18., 1992, Toulouse. **Proceedings...** London: RILEM, 1992. p. 53-62.

GONÇALVES, J.P. **Utilização do resíduo de corte granito, como adição, em concretos.** 2000. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Núcleo Orientado para Inovação das Edificações, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle de concreto.** São Paulo: Pini, 1992. 349 p.

ISAIA, G.C. **Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo da durabilidade com vistas à corrosão da armadura.** 1995. 298 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

KOTZ, J. C.; TREICHEL, P.JR. **Química e reações químicas.** Tradução de Horácio Macedo. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998. v.2, 731p.

MORAES, R.C.; ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L.G. Efeitos da cinza de casca de arroz e fíler calcário sobre a resistência mecânica do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 43., 2000, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: IBRACOM, 2000.

MOURA, W.A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto.** 2000. 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Núcleo Orientado para Inovação da Edificação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RIBEIRO, J.L.D. **Projeto de Experimentos na Otimização de Produtos e Processos:** notas de aula. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção / UFRGS, 1995.

Agradecimentos

À FEP – Fundação Escola Politécnica da Bahia, ao LABOTEC – Laboratórios de Tecnologia da UEFS e à REDE RECICLAR BAHIA – Rede cooperativa para aproveitamento de resíduos sólidos na Construção Civil, por terem viabilizado o desenvolvimento deste trabalho.