



## MODELAGEM DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE RCD

**Antonio Eduardo Bezerra Cabral**

USP-EESC, Doutorando do Programa de Pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental (PPG-SEA), Professor do Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará (CEFET/CE), e-mail: eduardo@cefetce.br

**Valdir Schalch**

USP-EESC, Professor do Programa de Pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental (PPG-SEA), e-mail: vschalch@sc.usp.br

**Denise Carpena Coitinho Dal Molin**

UFRGS – NORIE, Professora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), e-mail: dmolin@ufrgs.br

**José Luis Duarte Ribeiro**

UFRGS – LOPP, Professor do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção (PPGEP), e-mail: ribeiro@produção.ufrgs.br

### Resumo

O depósito irregular dos resíduos de construção e demolição (RCD) é um problema que aflige as autoridades e atinge as populações não somente no Brasil, mas também em outros países do mundo. Aliado a isso, a demanda por matéria-prima pela indústria da construção civil é crescente. A reciclagem dos RCDs aparece como uma solução para estes problemas. Com o intuito de modelar o comportamento do concreto confeccionado com agregados reciclados foi realizado um projeto experimental fracionado variando-se os teores dos três tipos de agregados reciclados testados (concreto, argamassa e cerâmica vermelha), uma vez que esses três constituintes representam mais de 70% de todo o RCD na maioria das cidades brasileiras. Além do tipo de agregado, também variou-se a relação água/cimento de 0,4 a 0,8. Fixou-se também o teor de água na pré-umidificação dos agregados reciclados, para que os mesmos não absorvessem a água de amassamento, modificando assim a relação água/cimento. O modelo apresentado aponta que os agregados graúdos reciclados influem negativamente de maneira mais incisiva sobre a resistência à compressão que os miúdos reciclados, embora se tenha observado que exclusivamente o agregado miúdo reciclado de cerâmica vermelha age de maneira positiva sobre a resistência à compressão.

*Palavras-chave:* RCD, reciclagem, agregados reciclados, modelagem, resistência à compressão.

### Introdução

O depósito irregular dos resíduos de construção e demolição é um problema que aflige as autoridades e atinge as populações não somente no Brasil, mas também em outros países do mundo. Tal deposição afeta diretamente o meio ambiente, sendo co-responsável por enchentes, em virtude do assoreamento do leito dos córregos, por danos à paisagem, obstrução de vias de tráfego, proliferação de doenças, dentre outros prejuízos à saúde e à vida humana (John, 2000).

Aliado a isso, a superexploração das jazidas minerais, de onde se extraem os agregados (recursos naturais não-renováveis) que se utilizam na construção civil, vem, paulatinamente, trazendo prejuízos ao meio ambiente. No Brasil, estima-se que sejam consumidos anualmente 210 milhões de toneladas de agregados somente para produção de argamassas e concretos, devendo, ainda, somar-se o volume utilizado em pavimentações e as perdas (John, 2000). No Reino Unido, em 1992, foram consumidos aproximadamente 240 milhões de toneladas de agregados,

sendo a grande maioria obtida por meio de dragagem ou extração em pedreiras (Khalaf & DeVenny, 2004).

Uma solução, que a cada dia ganha mais força dentre os pesquisadores do assunto, é a reciclagem do resíduo de construção e demolição (RCD) e sua reutilização na própria construção civil como matéria-prima alternativa. Há escassez crítica de agregados naturais para a produção de concreto em muitas áreas urbanas, ao mesmo tempo o aumento das quantidades de RCD gerados nessas mesmas áreas é considerável (Hansen & Bøegh, 1985). Portanto, com a reciclagem, outra fonte de matéria-prima é utilizada, além de propiciar redução na disposição e no volume final dos resíduos (Sani *et al.*, 2005).

Os RCD caracterizam-se por possuírem composição variável com a localidade e, quando em uma mesma localidade, com o tempo. Entretanto, os resíduos de concreto, de argamassa e de cerâmica vermelha aparecem como os principais constituintes dos RCD, representando acima de 70% da massa total (Pinto, 1999; Zordan, 1997; Leite, 2001; Vieira, 2003). Essa heterogeneidade dos RCD influi diretamente nas características dos agregados reciclados com eles produzidos. Portanto, se faz necessário conhecer o comportamento das características dos concretos produzidos com esses agregados reciclados quando se variam os teores dos constituintes.

## Metodologia

### *Projeto experimental*

Desejava-se pesquisar qual a influência da substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados desses três maiores constituintes na resistência à compressão dos concretos. Também se desejava saber a influência da variação da relação água/cimento (*a/c*) nessas mesmas propriedades, com a presença ou não desses agregados reciclados. Portanto, foram identificadas sete variáveis independentes (fatores): o agregado miúdo e graúdo reciclado de cerâmica vermelha, o agregado miúdo e graúdo reciclado de argamassa, o agregado miúdo e graúdo reciclado de concreto e a relação água/cimento.

O projeto experimental completo para estudar o efeito conjunto de todos esses 7 fatores sobre a variável de resposta é o projeto de experimentos fatoriais  $2^k$  (Ribeiro & Caten, 2001). A execução desse projeto consiste em realizar  $2^7$  traços de concreto, ou seja, 128 traços. Em função de limitações de tempo e custo, a solução encontrada para viabilizar a execução da parte experimental, com elevado grau de confiabilidade dos resultados, foi o uso do projeto composto de segunda ordem.

O projeto composto de segunda ordem tem por base um projeto fatorial  $2^k$ , fracionado ou completo, em

que se soma a este último todos os 2k vértices de uma estrela e os pontos centrais da estrela e do projeto fatorial (Ribeiro & Caten, 2001). Para o experimento em questão, adotaram-se um projeto fatorial fracionado e os pontos centrais.

O uso dos experimentos fatoriais fracionados são muito úteis quando há grande número de fatores a serem investigados sobre uma ou mais variáveis de resposta e se deseja otimização de tempo e custos para a obtenção dos resultados, pois o fracionamento consiste em dividir o projeto completo em dois ou mais blocos e ensaiar somente um desses blocos, escolhido aleatoriamente (Werkema & Aguiar, 1996). Este tipo de estudo utilizando ferramentas estatísticas já foi previamente executado por outras diversas pesquisas nacionais e internacionais (Leite, 2001; Vieira, 2003; Liu *et al.*, 2004). Para o projeto completo exposto, este foi dividido em 4 blocos, sendo ensaiado somente um bloco, ou seja, 32 traços, que consistem nos traços 1 ao 32 da Tabela 1.

Como o experimento em questão possui 7 fatores, a estrela possui 14 vértices, que correspondem aos traços 33 ao 46. Os traços 47 e 48 correspondem aos pontos centrais, que são iguais, uma vez que o ponto central do projeto fatorial fracionado é o mesmo da estrela de sete pontas. Os traços 49 e 50 foram inseridos no projeto experimental, uma vez que representam os momentos em que todos os agregados (reciclados e naturais) estão presentes no concreto, atribuindo como valores para a relação água/cimento as duas médias dos terços inferior e superior, ou seja, 0,46 e 0,74. A Tabela 1 concatena todos os traços de concreto definidos no planejamento de experimentos.

Como variável de resposta, ou seja, variável dependente, tem-se a resistência à compressão axial dos concretos produzidos, de acordo com os procedimentos descritos na NBR 5739/94 – Concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Algumas outras variáveis foram fixadas, como a idade de execução dos ensaios (28 dias) e a pré-umidificação dos agregados reciclados, para que os mesmos não absorvessem a água de amassamento, modificando assim a relação água/cimento (*a/c*).

A absorção de água dos agregados miúdos reciclados e do miúdo natural foi medida através do método proposto pela NM 30/00 – Absorção do agregado miúdo, e a absorção de água dos agregados graúdos reciclados e do graúdo natural foi medida através do método proposto pela NM 53/02 – Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Para cada agregado, determinou-se a absorção duas vezes, através de duas amostras. A média dos resultados encontra-se na Tabela 2, para os agregados miúdos, e na Tabela 3, para os agregados graúdos.

**Tabela 1** Traços de concreto definidos pelo fracionamento do experimento.

Traço	a/c	Agregado graúdo				Agregado miúdo			
		N	C	CV	A	N	C	CV	A
01	0,46	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%
02	0,74	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%
03	0,74	100%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%
04	0,46	100%	0%	0%	0%	0%	50%	50%	0%
05	0,74	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	100%
06	0,46	0%	0%	0%	100%	0%	0%	50%	50%
07	0,46	0%	0%	0%	100%	0%	50%	0%	50%
08	0,74	0%	0%	0%	100%	0%	33%	33%	33%
09	0,46	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	100%
10	0,74	0%	0%	100%	0%	0%	0%	50%	50%
11	0,74	0%	0%	100%	0%	0%	50%	0%	50%
12	0,46	0%	0%	100%	0%	0%	33%	33%	33%
13	0,74	0%	0%	50%	50%	100%	0%	0%	0%
14	0,46	0%	0%	50%	50%	0%	0%	100%	0%
15	0,46	0%	0%	50%	50%	0%	100%	0%	0%
16	0,74	0%	0%	50%	50%	0%	50%	50%	0%
17	0,46	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
18	0,74	0%	100%	0%	0%	0%	0%	50%	50%
19	0,74	0%	100%	0%	0%	0%	50%	0%	50%
20	0,46	0%	100%	0%	0%	0%	33%	33%	33%
21	0,74	0%	50%	0%	50%	100%	0%	0%	0%
22	0,46	0%	50%	0%	50%	0%	0%	100%	0%
23	0,46	0%	50%	0%	50%	0%	100%	0%	0%
24	0,74	0%	50%	0%	50%	0%	50%	50%	0%
25	0,46	0%	50%	50%	0%	100%	0%	0%	0%
26	0,74	0%	50%	50%	0%	0%	0%	100%	0%
27	0,74	0%	50%	50%	0%	0%	100%	0%	0%
28	0,46	0%	50%	50%	0%	0%	50%	50%	0%
29	0,74	0%	33%	33%	33%	0%	0%	0%	100%
30	0,46	0%	33%	33%	33%	0%	0%	50%	50%
31	0,46	0%	33%	33%	33%	0%	50%	0%	50%
32	0,74	0%	33%	33%	33%	0%	33%	33%	33%
33	0,60	0%	50%	25%	25%	0%	33%	33%	33%
34	0,60	0%	0%	50%	50%	0%	33%	33%	33%
35	0,60	0%	25%	50%	25%	0%	33%	33%	33%
36	0,60	0%	50%	0%	50%	0%	33%	33%	33%
37	0,60	0%	25%	25%	50%	0%	33%	33%	33%
38	0,60	0%	50%	50%	0%	0%	33%	33%	33%
39	0,60	0%	33%	33%	33%	0%	50%	25%	25%
40	0,60	0%	33%	33%	33%	0%	0%	50%	50%
41	0,60	0%	33%	33%	33%	0%	25%	50%	25%
42	0,60	0%	33%	33%	33%	0%	50%	0%	50%
43	0,60	0%	33%	33%	33%	0%	25%	25%	50%
44	0,60	0%	33%	33%	33%	0%	50%	50%	0%
45	0,80	0%	33%	33%	33%	0%	33%	33%	33%
46	0,40	0%	33%	33%	33%	0%	33%	33%	33%
47	0,60	0%	33%	33%	33%	0%	33%	33%	33%
48	0,60	0%	33%	33%	33%	0%	33%	33%	33%
49	0,46	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
50	0,74	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%

N: agregado natural, CV: agregado reciclado de cerâmica vermelha, C: agregado reciclado de concreto, A: agregado reciclado de argamassa.

A massa específica dos agregados reciclados e naturais também foi determinada através do método proposto pela norma NBR 9776/87 – Agregado miúdo – Determinação da massa específica pelo frasco de Chapman, para agregados miúdos, e pela NM 53/02 – Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água, para os agregados graúdos. Para cada agregado, determinou-se a massa específica duas vezes, através de duas amostras. A média dos resultados encontra-se na Tabela 2, para os agregados miúdos, e na Tabela 3, para os agregados graúdos.

A massa unitária dos agregados reciclados e naturais foi determinada através do método proposto pela NM 45/00 – Agregados – Determinação da massa unitária e dos espaços vazios.

Para cada agregado, determinou-se a massa unitária duas vezes, através de duas amostras. O objetivo da determinação da massa unitária seria descobrir qual dos agregados utilizados gera melhor empacotamento, ou seja, qual se distribui melhor, deixando o mínimo de vazios em determinado volume. Mas como os agregados

reciclados são provenientes de matérias-primas diferentes, com massas específicas diferentes, os resultados obtidos pelos ensaios não podem ser comparados, já que neles não se tem isolada a influência de suas massas específicas. A melhor maneira de compará-los, então, seria parametrizá-los em função da massa específica do agregado natural de seu grupo (graúdos e miúdos) e determinar qual a massa unitária corrigida desses materiais. A massa unitária já corrigida encontra-se na Tabela 2, para os agregados miúdos, e na Tabela 3, para os agregados graúdos.

#### **Confecção dos concretos**

Fez-se uma dosagem experimental com os agregados naturais através do método do IPT/EPUSP (Helene & Terzian, 1992), fixando o abatimento medido pelo método do tronco de cone (*slump test*) em  $12 \pm 2$  cm, determinando-se o diagrama de dosagem. De posse deste último, iniciou-se a execução dos 50 traços determinados pelo projeto experimental. Entretanto, foram necessários alguns ajustes nos traços que continham a substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados.

**Tabela 2** Características dos agregados miúdos utilizados.

Agregado	Método de ensaio		
	NM 30/00	NBR 9776/87	NM 45/00
	Absorção (%)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )
Miúdo natural	0,42	2,64	1,44
Miúdo reciclado de concreto	7,55	2,56	1,54
Miúdo reciclado de argamassa	4,13	2,60	1,44
Miúdo reciclado de cer. vermelha	10,69	2,35	1,46

**Tabela 3** Características dos agregados graúdos utilizados.

Agregado	Método de ensaio		
	NM 53/02	NM 53/02	NM 45/00
	Absorção (%)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )
Graúdo natural	1,22	2,87	1,56
Graúdo reciclado de concreto	5,65	2,27	1,43
Graúdo reciclado de argamassa	9,52	2,01	1,39
Graúdo reciclado de cer. vermelha	15,62	1,86	1,26

Primeiramente foi feita uma compensação do volume dos agregados reciclados a serem utilizados nos traços predeterminados (Hansen & Narud, 1983; Hansen & Bøegh, 1985; Leite, 2001; Vieira, 2003; Masce *et al.*, 2003), pois a simples substituição da massa do agregado natural pela massa do agregado reciclado iria resultar em traços com volumes maiores de agregados reciclados, uma vez que a massa específica dos agregados reciclados é menor que a massa específica dos agregados naturais, demandando mais água e cimento para produzir traços equivalentes ao traço de referência, ou seja, àquele com agregados naturais. A compensação do volume dos agregados reciclados nos traços do projeto experimental foi feita segundo a equação 1.

$$M_{AR} = M_{AN} \cdot \frac{\gamma_{AR}}{\gamma_{AN}} \quad (1)$$

em que:

$M_{AR}$  = massa do agregado reciclado (kg).

$M_{AN}$  = massa do agregado natural (kg).

$\gamma_{AR}$  = massa específica do agregado reciclado (kg/cm<sup>3</sup>).

$\gamma_{AN}$  = massa específica do agregado natural (kg/cm<sup>3</sup>).

Posteriormente determinou-se qual massa de água seria adicionada antes das concretagens aos agregados reciclados para que estes a absorvessem, sendo então colocados na betoneira já pré-umedecidos, evitando assim que grande parte da água de amassamento fosse absorvida pelos agregados, o que perturbaria o processo e a hidratação. Alguns autores (Leite, 2001; Vieira, 2003) utilizaram em suas pesquisas teores em torno de 40% a 50% do total da água absorvida em 24 horas. Já outros autores (Brito *et al.*, 2005; Xiao *et al.*, 2005; Zaharieva *et al.*, 2003) utilizaram teores maiores de água na pré-umidificação, chegando até à saturação.

Para esta pesquisa, umedeceram-se os agregados reciclados, 10 minutos antes da mistura na betoneira, com 80% da água que seria absorvida em 24 horas pela massa do agregado reciclado, correspondente ao traço a ser executado. Utilizou-se esse valor porque observou-se durante os ensaios de absorção de água dos agregados reciclados que esses agregados atingem 80% da absorção total de água, em média, nos primeiros 120 minutos após a mistura. Como as reações de hidratação perduram por muito tempo, ultrapassando o tempo de fim de pega do cimento (Mehta & Monteiro, 1994), e no caso do cimento utilizado é de 245 minutos, até esse tempo, garante-se água disponível para as reações de hidratação, sem que a mesma seja absorvida pelos agregados.

Após esse procedimento de pré-umidificação, despejava-se todo o agregado graúdo na betoneira (de eixo vertical), juntamente com parte da água de amassamento. Em seguida, adicionavam-se o cimento e o restante da água de amassamento, misturando-os por alguns minutos. Por fim, adicionava-se o agregado miúdo à mistura, deixando a betoneira misturar a massa por mais alguns minutos.

Em alguns traços foi necessário adicionar também o aditivo superplastificante à mistura, até que se atingisse ou superasse a trabalhabilidade desejada, que foi fixada em  $12 \pm 2$  cm medida pelo abatimento de tronco de cone (*slump test*).

Uma vez alcançado ou superado o abatimento pretendido, para cada traço produzido, moldaram-se 4 corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, conforme os procedimentos da NBR 5738/03 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova, para realizar os ensaios de resistência à compressão.

Após moldados, os corpos-de-prova cilíndricos ficaram expostos à temperatura e umidade ambiente por 24 horas, quando então foram desmoldados e levados para uma câmara úmida, onde permaneceram até um dia antes da data de ensaio. Nessa data, esses corpos-de-prova foram capeados e recolocados na câmara úmida, onde permaneceram até o momento do ensaio.

## Resultados

### Considerações iniciais

Como já mencionado, o projeto experimental utilizado envolve 7 variáveis independentes e o experimento foi fracionado, de forma a reduzir o número total de corpos-de-prova a serem ensaiados. Os tratamentos foram definidos de acordo com um Projeto Composto de Segunda Ordem, o qual permite testar termos lineares e quadráticos. Os ensaios realizados permitiram construir os modelos lineares e não lineares, para cada variável de resposta, que estão apresentados a seguir.

Para melhor entendimento dos modelos abreviaram-se os nomes das variáveis independentes e das variáveis de resposta, as quais se encontram na Tabela 4.

Os dados coletados permitem estabelecer modelos relacionando as variáveis de resposta com as variáveis independentes, podendo estabelecer modelos simples, como a regressão linear múltipla, ou modelos complexos, como a regressão não linear.

Juntamente com a construção dos modelos foi feita uma análise dos resíduos padronizados. Os dados coletados que geraram resíduos padronizados com módulo maior que 3 foram eliminados da análise: os valores de resistência, módulo e retração para o traço 3 e o valor de retração para o traço 40.

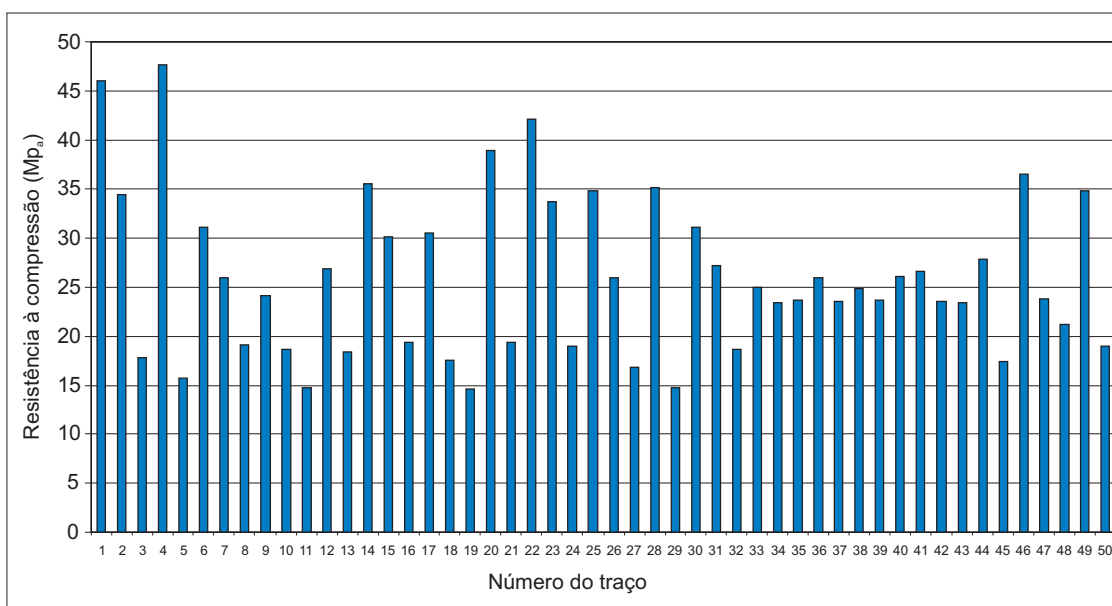
As análises apresentadas a seguir foram desenvolvidas apoiadas em uma rotina de regressão linear, que mesmo sendo relativamente simples apresentaram bons resultados. Foram tentados alguns modelos mais complexos, mas o ganho estatístico foi pequeno, sendo assim, optou-se pelo modelo mais simples.

### Apresentação, análise e discussão dos resultados

Passados os 28 dias após a moldagem dos corpos-de-prova, estes foram rompidos, estando o maior resultado obtido para cada traço disposto graficamente, através da Figura 1.

**Tabela 4** Características dos agregados utilizados.

Símbolo	Variável	
	Nome	Tipo
rag	percentual de agreg. graúdo substituído por recicl. de argamassa	independente
ram	percentual de agreg. miúdo substituído por recicl. de argamassa	independente
rcg	percentual de agreg. graúdo substituído por recicl. de concreto	independente
rcm	percentual de agreg. miúdo substituído por recicl. de concreto	independente
rvg	percentual de agreg. graúdo substituído por recicl. de cer. vermelha	independente
rvm	percentual de agreg. miúdo substituído por recicl. de cer. vermelha	independente
a/c	relação água/cimento	independente
$f_c$	resistência à compressão	de resposta

**Figura 1** Resistência à compressão dos concretos produzidos.

O modelo escolhido para representar a resistência à compressão foi o da equação 2.

$$f_c = \left( \frac{22,08}{a/c} \right) \cdot [1 - (\% \text{substituído})] \quad (2)$$

O primeiro termo entre parênteses refere-se à resistência dos corpos-de-prova sem a substituição do agregado natural pelo reciclado, que é função da relação água/cimento. Este termo foi definido previamente, a partir de uma análise dos valores obtidos quando a relação água/cimento é igual a 0,46, 0,60 e 0,74, sendo definido de forma a gerar o melhor ajuste possível, ou seja, minimizar os erros de previsão. O segundo termo, entre colchetes,

define um percentual a ser aplicado sobre a resistência original, geralmente reduzindo a resistência em função da substituição do agregado natural pelo reciclado. Então, essa perda de resistência é função do percentual de agregado natural substituído pelo agregado reciclado, ou seja:

$$\text{Perda de resistência} = f(\% \text{ substituído})$$

Fez-se então uma regressão múltipla, a qual identificou as variáveis dependentes que exercem efeito significativo sobre a perda de resistência dos concretos com agregado reciclado, que são todas as variáveis dependentes, exceto a relação água/cimento (*aci*). O modelo da perda de resistência encontrado possui um coeficiente de correlação bastante satisfatório (98,04%), estando descrito na equação 3.



$$Perda\ de\ resist\ancia = 0,338.rag + 0,153.ram + + 0,275.rcg + 0,067.rcm + 0,371.rvg - 0,138.rvm \quad (3)$$

A tentativa de inserir termos quadrados (como *ram.ram*, por exemplo) ou interações (como *ram.rag*, por exemplo) não melhorou o ajuste, sendo, portanto, estes termos mais complexos deixados de fora.

Então, o modelo final que estima a resistência em função do percentual de substituição dos agregados naturais pelos reciclados e da relação água/cimento encontra-se na equação 4. Nesse modelo, os percentuais de substituição dos agregados miúdo ou graúdo pelos reciclados devem ser informados na escala de 0 (0%) a 1 (100%), enquanto a relação água/cimento está expressa na escala usual, variando de 0,4 a 0,8. Convém salientar que o somatório dos percentuais de substituição dos agregados naturais pelo reciclados deve ser no máximo igual a 1 (100%), para cada tipo de agregado (graúdo e miúdo).

$$f_c = \left( \frac{22,08}{a/c} \right) [1 - (0,338.rag + 0,153.ram + + 0,275.rcg + 0,067.rcm + + 0,371.rvg - 0,138.rvm)] \quad (4)$$

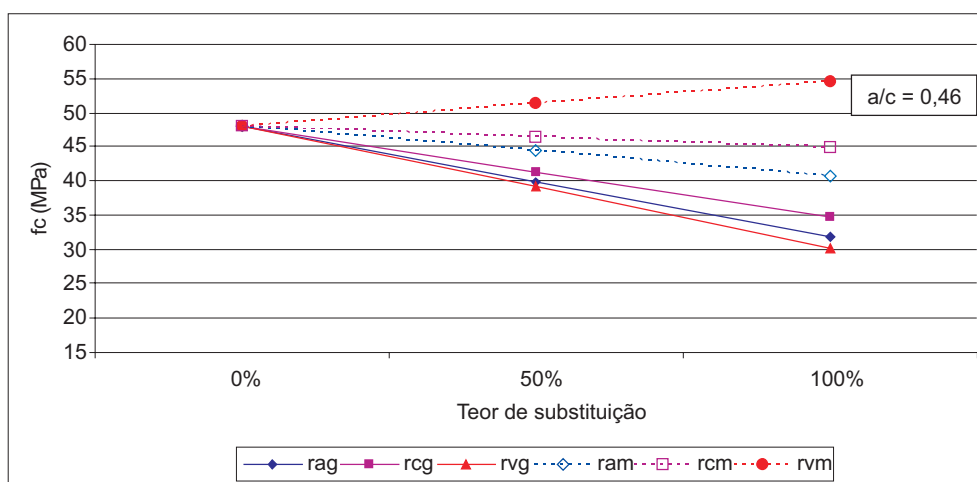
De acordo com o modelo apresentado, a substituição do agregado natural pelo reciclado resulta em redução da resistência, exceto no caso do uso do agregado miúdo reciclado de cerâmica vermelha, que proporciona pequeno acréscimo na mesma. Observa-se também que a substituição do agregado graúdo produz efeito maior do que a substituição do agregado miúdo, em função da magnitude dos coeficientes dos mesmos.

De posse do modelo acima, geraram-se alguns gráficos que ilustram a influência de cada tipo de agregado reciclado,

para os teores de substituição de 0, 50 e 100%, para as relações água/cimento intermediárias, ou seja, 0,4, 0,6 e 0,74. Em função dos valores obtidos para gerar os gráficos, montou-se uma tabela com as perdas e ganhos de resistência para cada caso. Os gráficos e a tabela encontram-se dispostos nas Figuras 2, 3 e 4 e na Tabela 4.

Através desses gráficos, pode-se observar a influência da relação água/cimento sobre o desempenho da resistência à compressão dos concretos. Observa-se também a menor influência dos agregados reciclados miúdos. Todos os agregados reciclados exercem influência negativa na resistência à compressão, exceto o agregado miúdo reciclado de cerâmica vermelha, o qual provoca incremento na resistência à compressão, chegando a 7% de acréscimo para 50% de substituição e 14% para 100% de substituição. Este incremento na resistência, quando se usa este tipo de agregado, pode ser explicado pelas reações pozolânicas que ocorrem, melhorando a zona de transição entre a pasta e o agregado e, conseqüentemente, melhorando as propriedades mecânicas de concretos e argamassas produzidas com este tipo de agregado miúdo reciclado (Leite, 2001).

Outra explicação para esse aumento de resistência é a superfície áspera do agregado reciclado de cerâmica, que fornece melhor ligação entre a matriz de cimento e os agregados reciclados. Outra hipótese para o aumento de resistência é que a água absorvida pelos agregados, com o passar do tempo de mistura, torna-se disponível para a hidratação de partículas remanescentes de cimento que não foram hidratadas. Essa hidratação adicional ocorre na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, aumentando assim a ligação entre a matriz de cimento e os agregados (Khalaf & DeVanny, 2004).



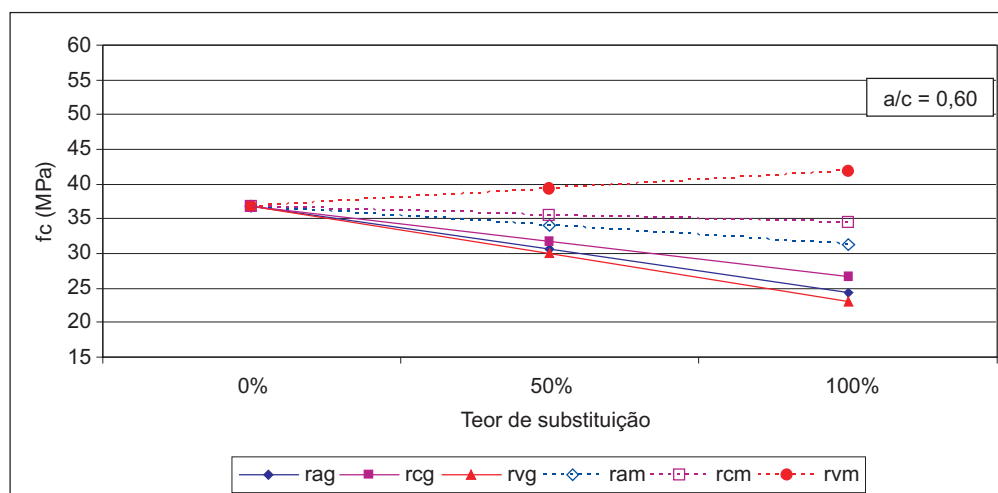
**Figura 2** Comportamento da resistência à compressão em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,46.

Entretanto, para a substituição do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado de cerâmica vermelha, tem-se o pior resultado, dentre todos. Segundo o modelo desenvolvido, esta substituição acarreta perda de resistência de 19% para o teor de 50% de substituição e de 38% para 100% de substituição. Tais valores de redução são bastante coerentes com outros encontrados por Brito *et al.* (2005).

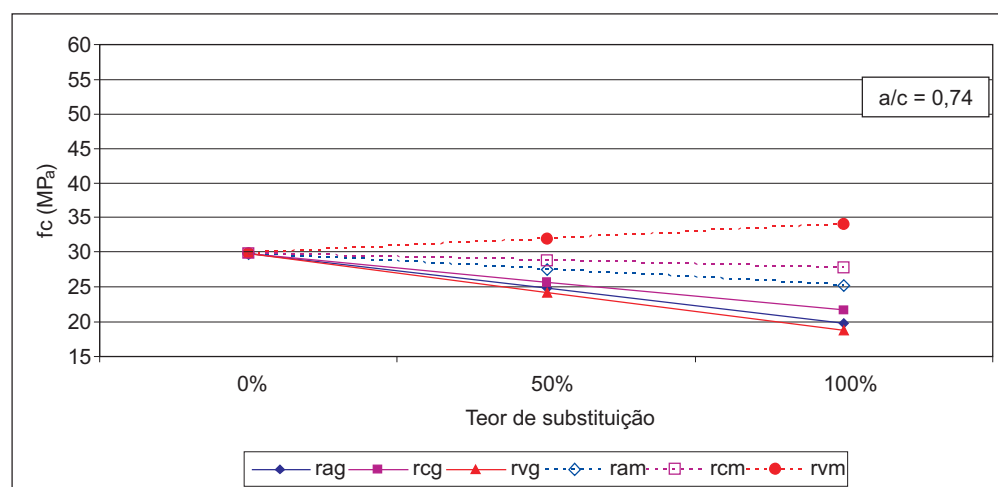
Este comportamento pode ser explicado pela forma do agregado, que embora tenha a mesma distribuição granulométrica dos demais, possui aparência mais angular, não propiciando eficiente empacotamento dos grãos, produzindo assim concretos com maior quantidade de vazios

(Khalaf & De Vanny, 2004). O agregado graúdo que obteve melhor desempenho quanto à resistência à compressão foi o reciclado de concreto, muito embora este ainda tenha apresentado redução da resistência à compressão de 14%, para 50% de substituição, e de 28%, para 100% de substituição pelo agregado graúdo natural.

Segundo o modelo obtido, tanto os agregados miúdos reciclados de argamassa quanto os de concreto exercem pouca influência no desempenho dos concretos, apresentando redução de apenas 8 e 3%, respectivamente, para 50% de substituição, e de 15 e 7%, respectivamente, para 100% de substituição.



**Figura 3** Comportamento da resistência à compressão em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,60.



**Figura 4** Comportamento da resistência à compressão em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,74.



**Tabela 5** Desempenho da resistência à compressão dos concretos quando feita a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado.

Teor de substituição	Tipo de agregado reciclado					
	rag	rcg	rvg	Ram	rcm	rvm
0%	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
50%	0,83	0,86	0,81	0,92	0,97	1,07
100%	0,66	0,72	0,63	0,85	0,93	1,14

### Considerações Finais

De acordo com os resultados obtidos, os concretos produzidos com agregados reciclados, de maneira geral, apresentaram desempenho inferior aos concretos produzidos com agregados naturais. Conforme o modelo determinado, os agregados graúdos reciclados influem negativamente, de maneira mais incisiva, sobre a resistência à compressão. Para os agregados miúdos reciclados, observa-se também o decréscimo de desempenho quando estes são inseridos na massa de concreto, embora se tenha observado que exclusivamente o agregado miúdo reciclado de cerâmica vermelha age de maneira positiva sobre a resistência à compressão.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento deste trabalho, através do PQI 106/08-03 (CEFET/CE-EESC/USP).

### Referências Bibliográficas

BRITO, J. de; PEREIRA, A. S.; CORREIA, J. R. Mechanical behavior of non-structural concrete made with recycled aggregates. *Cement & Concrete Composites*, v. 27, n. 4, p. 429-433, 2005.

HANSEN, C. T.; BØEGH, E. Elasticity and drying shrinkage of recycled-aggregate concrete. *ACI Journal*, v. 82, n. 5, 1985.

HANSEN, C. T.; NARUD, H. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete International*, v. 5, n. 1, 1983.

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

JOHN, V. M. *Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. São Paulo-SP, 2000. 102 f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

KHALAF, F. M.; DeVENNY, A. Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete: review. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 16, n. 04, p. 331-340, 2004.

LEITE, M. A. *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. Porto Alegre, RS, 2001. 270 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LIU, Y.; TYAN, Y.; CHANG, T.; CHANG, C. An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*, v. 34, p. 1373-1380, 2004.

MASCE, N. O.; MIYAZATO, S.; YODSUDJAI, W. Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 15, n. 5, p. 443-451, 2003.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: estruturas, propriedades e materiais*. São Paulo: Ed. PINI, 1994.

PINTO, T. P. *Metodologia para gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana*. São Paulo, SP, 1999. 203 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. S. T. *Projeto de experimentos*. Porto Alegre: FEEng/UFRGS, 2001. 128 p.

SANI, D.; MORICONI, G.; FAVA, G.; CORINALDESI, V. Leaching and mechanical behavior of concrete manufactured with recycled aggregates. *Waste Management*, v. 25, p. 177-182, 2005.

VIEIRA, G. L. *Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. Porto Alegre-RS, 2003. 151 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. *Planejamento e análise de experimentos: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo*. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1996. 294 p.

XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, Ch. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*, v. 35, p. 1187-1194, 2005.

ZAHARIEVA, R.; BUYLE-BODIN, F.; SKOCZYLAS, F.; EIRQUIM, E. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 25, p. 223-232, 2003.

ZORDAN, S. E. *Utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto*. Campinas-SP, 1997. 140 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas.