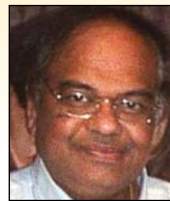
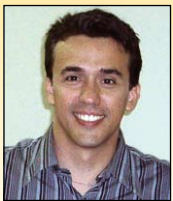


Shrinkage modeling for recycled aggregate concretes

Modelagem da retração por secagem de concretos produzidos com agregados reciclados



A. E. B. CABRAL^a
eduardo.cabral@ufc.br

V. SCHALCH^b
vschalch@sc.usp.br

D. C. C. DAL MOLIN^c
dmolin@ufrgs.br

J. L. D. RIBEIRO^d
ribeiro@producao.ufrgs.br

R. S. RAVINDRARAJAH^e
Sri.Ravindrarajah@uts.edu.au

Abstract

Concerns with conservation of nonrenewable resources are propelling academic research regarding the use of recycled aggregates in concrete production. Concrete's shrinkage is a phenomenon intimately linked to concrete loss of water, which is almost inevitable, since the majority of concrete structures is exposed to an environment where atmospheric humidity is below saturation condition. This paper presents an experimental study where concretes were produced varying water/cement ratio (from 0.4 to 0.8) and type and proportion of construction & demolition waste (concrete, cement, and red ceramic) used as coarse and fine recycled aggregates. Mathematical models correlating such variables with concrete's shrinkage at 56 and 224 days of age were built. The results indicate that, for the age of 56 days, the data presented excessive variability, revealing only 4 of the 7 tested variables as significant. For the age of 224 days, the proposed model still presented considerable variability, however all tested variables were detected as significant. Results point out that substitution of natural aggregates by recycled aggregates increases shrinkage, being this effect stronger when substitution comprises fine aggregates. The most pronounced effect was associated to the use of recycled concrete fine aggregate. The slightest effect was observed using recycled concrete coarse aggregate.

Keywords: recycled aggregate concrete, shrinkage, multiple regression.

Resumo

A preocupação com a conservação dos recursos não renováveis tem levado o meio acadêmico a pesquisar sobre a utilização dos agregados reciclados na produção de concretos. A retração por secagem do concreto é um fenômeno que está intimamente ligado à perda de água da massa do concreto, a qual é quase inevitável, desde que o concreto esteja exposto a um ambiente de umidade abaixo da condição de saturação. Este artigo apresenta um estudo experimental, onde foram produzidos concretos variando-se a relação água/cimento (de 0,4 a 0,8) e o tipo e a proporção dos três principais constituintes do resíduo de construção e demolição (concreto, argamassa e cerâmica vermelha) usados como agregados graúdos e miúdos reciclados, produzindo-se modelos matemáticos que correlacionam tais variáveis com a retração por secagem dos concretos aos 56 e 224 dias de idade. Os resultados apontam que, para a idade de 56 dias, o modelo apresentou uma excessiva variabilidade, manifestando somente 4 das 7 variáveis como termos significativos. Para a idade de 224 dias, o modelo proposto ainda apresentou uma elevada variabilidade, entretanto todas as variáveis foram tidas como significativas. Os resultados apontam que a substituição do agregado natural pelo reciclado propicia um acréscimo na retração por secagem, sendo este efeito mais sentido para a substituição do agregado miúdo. O efeito mais pronunciado está associado ao emprego do agregado miúdo reciclado de concreto e o menor, ao do agregado graúdo reciclado de concreto.

Palavras-chave: concreto com agregados reciclados, retração por secagem, regressão múltipla.

^a Professor Doutor, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Estrutural e Construção Civil (PEC), Universidade Federal do Ceará (UFC), eduardo.cabral@ufc.br, Campus Universitário do Pici, Bloco 710 – 60455-760 – Fortaleza/CE – Brasil.

^b Professor Doutor, Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental (PPG-SEA) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP), vschalch@sc.usp.br, Av. Trabalhador Sancarlense, 400 – 13.560-970 – São Carlos/SP – Brasil.

^c Professora Doutora, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (NORIE/UFRGS), dmolin@ufrgs.br, Av. Osvaldo Aranha, 99, 3º andar - 90.035-190 – Porto Alegre/RS – Brasil.

^d Professor Doutor, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LOPP/UFRGS), ribeiro@producao.ufrgs.br, Av. Osvaldo Aranha, 99, 3º andar - 90.035-190 – Porto Alegre/RS – Brasil.

^e Professor Doutor, Faculdade de Engenharia, Universidade Tecnológica de Sydney (UTS), Sri.Ravindrarajah@uts.edu.au PO Box 123, Broadway NSW 2007 – Australia.

1. Introdução

O uso dos agregados provenientes da reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) tem se tornado uma realidade em alguns países do mundo, inclusive no Brasil. A maior aplicação deste tipo de agregado tem sido em camadas de pavimentação, entretanto seu uso na fabricação de concreto tem aumentado. Um exemplo vem da Alemanha, onde já se demonstrou a viabilidade do uso do concreto com agregado reciclado em funções estruturais, já se tendo inclusive normas reguladoras para o uso do mesmo, tais como as normas DIN 4226-100 e DIN 1045-2 [1, 2].

Os autores deste artigo já publicaram estudos sobre as características mecânicas dos concretos com diferentes tipos e teores de agregados reciclados, tais como a resistência à compressão [3] e o módulo de deformação [4], entretanto é escasso a bibliografia sobre a retração por secagem. A retração por secagem é uma das propriedades mais importantes do concreto, uma vez que é uma das principais causas da fissuração, assumindo assim grande relevância, pois compromete a durabilidade do concreto, principalmente quando este for armado.

A retração por secagem do concreto é um fenômeno inevitável, desde que o concreto esteja exposto a um ambiente de umidade abaixo da condição de saturação. Como este é o tipo de ambiente onde a grande maioria das estruturas de concreto está inserida, a retração por secagem é uma característica constante nas estruturas de concreto.

A granulometria, a dimensão máxima, a forma e a textura do agregado são fatores que influenciam na retração por secagem do concreto, entretanto o módulo de deformação do agregado é considerado o fator mais importante [5]. Várias pesquisas [6, 7, 8] demonstram que os agregados reciclados possuem características diferentes dos agregados naturais, como uma maior absorção de água, uma menor massa específica e massa unitária, dentre outras. Estas diferenças influenciam diretamente na retração por secagem dos concretos produzidos com os agregados reciclados.

É coerente que o concreto produzido com agregados reciclados possua uma maior retração, uma vez que os agregados reciclados possuem um menor módulo de deformação que os naturais, sendo portanto mais deformáveis, além de, em função da alta absorção de água por parte destes, exigirem um elevado teor de água para se obter uma boa mistura [9].

Por outro lado, a variabilidade da composição do RCD é um fator limitante para a expansão da reutilização e da reciclagem dos mesmos, uma vez que esta variabilidade será estendida aos agregados reciclados provenientes da reciclagem do RCD. No Brasil, estima-se que em média 65% do material descartado é de origem mineral, 13% madeira, 8% plásticos e 14% outros materiais [10]. Estima-se também que argamassa, concreto e cerâmica vermelha correspondem, juntos, a mais de 60% do total do RCD gerado [11]. Assim, o uso de agregados reciclados de diferentes composições implicará em concretos com diferentes características mecânicas e de durabilidade.

Vários autores [12, 13, 14] encontraram que as retrações dos concretos feitos com agregados reciclados de concreto são maiores que as dos concretos convencionais, podendo chegar ao dobro. Outros autores [15] encontraram uma maior retração por secagem para os concretos produzidos com os agregados reciclados de argamassa que para os concretos convencionais. É difícil estimar a retração por

secagem dos concretos feitos com agregados reciclados de cerâmica vermelha uma vez que esta depende de um grande número de fatores, entretanto há autores [16] que estimam que as retrações finais em concretos com estes agregados são de 20 a 60% maiores que dos valores obtidos para os concretos convencionais.

Portanto, a retração por secagem é um fenômeno que está intimamente ligado à perda de água da massa de concreto, logo é notório que quanto mais água essa massa tiver, maior será a possibilidade de se ter grandes retrações. Pode-se, portanto, associar a retração por secagem do concreto produzido com agregado reciclado ao tipo de agregado reciclado, uma vez que quanto mais poroso o agregado reciclado for, menos este restringirá a retração, permitindo assim que o concreto se retraia mais.

Uma vez que o desempenho do concreto com a substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados é modificado, faz-se necessário entender o comportamento desses concretos com relação a algumas propriedades, sendo o estudo da retração por secagem em concretos com agregados reciclados um tema relevante e atual.

2. Objetivos

O objetivo deste trabalho é modelar o comportamento da retração por secagem de concretos, de relações água/cimento entre 0,4 e 0,8, produzidos com a substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados de concreto, de argamassa e de cerâmica vermelha, sendo estes os três maiores constituintes do RCD brasileiro.

3. Metodologia

3.1 Projeto experimental

Foram identificadas sete variáveis independentes (fatores), as quais são: 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 escolhido para estudar o efeito de todos esses fatores na retração por secagem foi o projeto composto de segunda ordem (PCSO). A estrutura do PCSO usado compreende de 2^{7-2} fatorial fracionado combinado com 2k vértices e pontos centrais [17].

O uso dos experimentos fatoriais fracionados são recomendados quando há um grande número de fatores a serem investigados sobre uma ou mais variáveis de resposta e se deseja uma 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 [18]. Este tipo de estudo utilizando ferramentas estatísticas já foi previamente executado por outras diversas pesquisas nacionais e internacionais [6, 7, 19]. O projeto fatorial completo 2^k foi dividido em 4 blocos, sendo ensaiado somente um bloco, ou seja, 32 traços, que consistem os 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 onde todos os agregados (reciclados e naturais) estão presentes no concreto, atribuindo como

Tabela 1 – Traços de concreto definidos no fracionamento do experimento

Traço	Relação a/c	Agregado Graúdo				Fine Aggregate			
		Natural	Concreto	Cer. Verm.	Argamassa	Natural	Concreto	Cer. Verm.	Argamassa
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%

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 ³)	Massa unitária (g/cm ³)
Miúdo natural	0,42	2,64	1,56
Miúdo reciclado de concreto	7,55	2,56	1,43
Miúdo reciclado de argamassa	4,13	2,60	1,39
Miúdo reciclado de cer. vermelha	10,69	2,35	1,26

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 retração por secagem dos concretos produzidos, mensurada segundo os procedimentos descritos pela norma ASTM C 157-93 – *Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*. A idade de coleta das retrações foram pré-definidas (1, 4, 7, 14, 28, 56, 122 e 224 dias) e a pré-umidificação dos agregados reciclados foi realizada, para que os mesmos não absorvessem a água de amassamento, evitando a possibilidade de modificação da relação água/cimento (a/c).

A absorção de água dos agregados miúdos reciclados e do miúdo natural foi medida por meio 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 por meio 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, por meio de duas amostras. A média dos resultados para os agregados miúdos encontra-se na Tabela 2 enquanto que a média para os graúdos encontra-se na Tabela 3.

A massa específica dos agregados reciclados e naturais também foram determinadas por meio 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, por meio de duas amostras. A média dos resultados para os agregados miúdos encontra-se na Tabela 2 enquanto que a média para os graúdos encontra-se na Tabela 3.

A massa unitária dos agregados reciclados e naturais foi determinada por meio 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, utilizando-se duas amostras. O objetivo da determinação da massa unitária foi descobrir qual dos agregados utilizados gerava um melhor empacotamento, ou seja, qual se distribuía melhor, deixando o mínimo de vazios em um 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 isolado a influência de suas massas específicas. A melhor maneira de compará-los então, foi parametrizando-os em função da massa específica do agregado natural de seu grupo (graúdos e miúdos) e determinando-se qual a massa unitária corrigida desses materiais. A média da massa unitária corrigida dos agregados miúdos encontra-se na Tabela 2 enquanto que a dos graúdos encontra-se na Tabela 3.

3.2 Produção dos concretos

Fez-se uma dosagem experimental com os agregados naturais utilizando-se o método do IPT/EPUSP [20] fixando o abatimento

Table 3 – Coarse aggregates characteristics

Aggregate	Testing method		
	NM 53/02	NM 53/02	NM 45/00
	Absorption (%)	Specific gravity	Bulk density (g/cm ³)
Natural coarse	1.22	2.87	1.44
Recycled coarse of concrete	5.65	2.27	1.54
Recycled coarse of mortar	9.52	2.01	1.44
Recycled coarse of red ceramic	15.62	1.86	1.46

medido pelo método do tronco de cone (*slump test*) em $12\pm 2\text{cm}$, determinando-se assim o diagrama de dosagem (Figura 1). A Tabela 4 traz a composição do concreto de relação a/c igual a 0,46, feito com agregados naturais. Entretanto, ao se substituir os agregados naturais pelos reciclados, foram necessários alguns ajustes na dosagem dos concretos, tais como a compensação de volume e a adição da água de pré-molhagem dos agregados reciclados. Primeiramente foi feita uma compensação do volume dos agregados reciclados a serem utilizados nos traços pré-determinados, pois a simples substituição da massa do agregado natural pela massa do agregado reciclado iria resultar 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 assim mais água e cimento para produzir traços equivalentes ao traço de referência, ou seja, àquele com agregados naturais [6, 7, 15, 21]. A compensação do volume dos agregados reciclados nos traços do projeto experimental foi feita segundo a Equação 1, em que:

M_{AR} = massa do agregado reciclado (kg)
 M_{AN} = massa do agregado natural (kg)
 γ_{AR} = massa específica do agregado reciclado (kg/cm^3)
 γ_{AN} = massa específica do agregado natural (kg/cm^3)

$$M_{RA} = M_{NA} \cdot \frac{\gamma_{RA}}{\gamma_{NA}} \tag{1}$$

Posteriormente determinou-se qual seria a massa de água que seria adicionada antes da produção dos concretos aos agregados reciclados. Então os agregados reciclados eram colocados na betoneira já pré-umedecidos, evitando assim que uma grande parte da água de amassamento fosse absorvida pelos agregados, o que perturbaria o processo e hidratação. Essa água de pré-umidificação absorvida inicialmente pelos agregados reciclados, posteriormente torna-se disponível dentro da

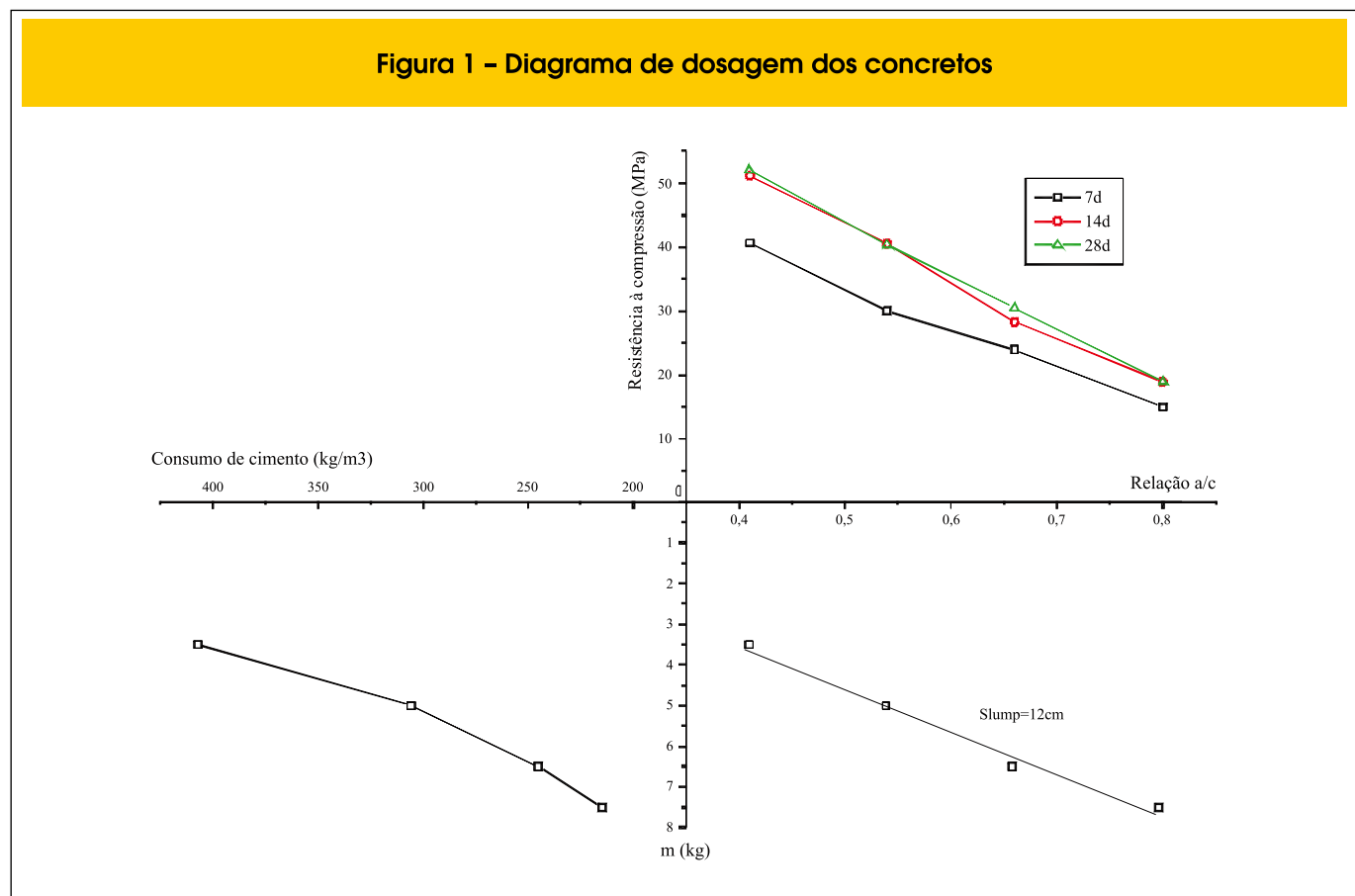


Tabela 4 - Composição do concreto com agregados naturais de relação a/c igual a 0,46

Cimento (kg)	Agregado miúdo (kg)	Agregado graúdo (kg)	Água (kg)
5.952	9.642	15	2.738

Figura 2 - a) Base metálica de área igual à seção transversal do corpo-de-prova onde era rosqueado um pino de aço inoxidável; b) Colocação das bases metálicas com os pinos na fôrma; c) Preenchimento da fôrma com o concreto produzido



a)



b)



c)

mistura, podendo hidratar as partículas de cimento não-hidratadas além de ajudar no processo de cura do concreto. A presença de água no agregado propicia também a formação de uma boa zona de transição entre a nova pasta e o agregado reciclado, havendo casos onde se é impossível definir, mesmo por meio de microscópio, um nítido limite entre essas duas fases [22].

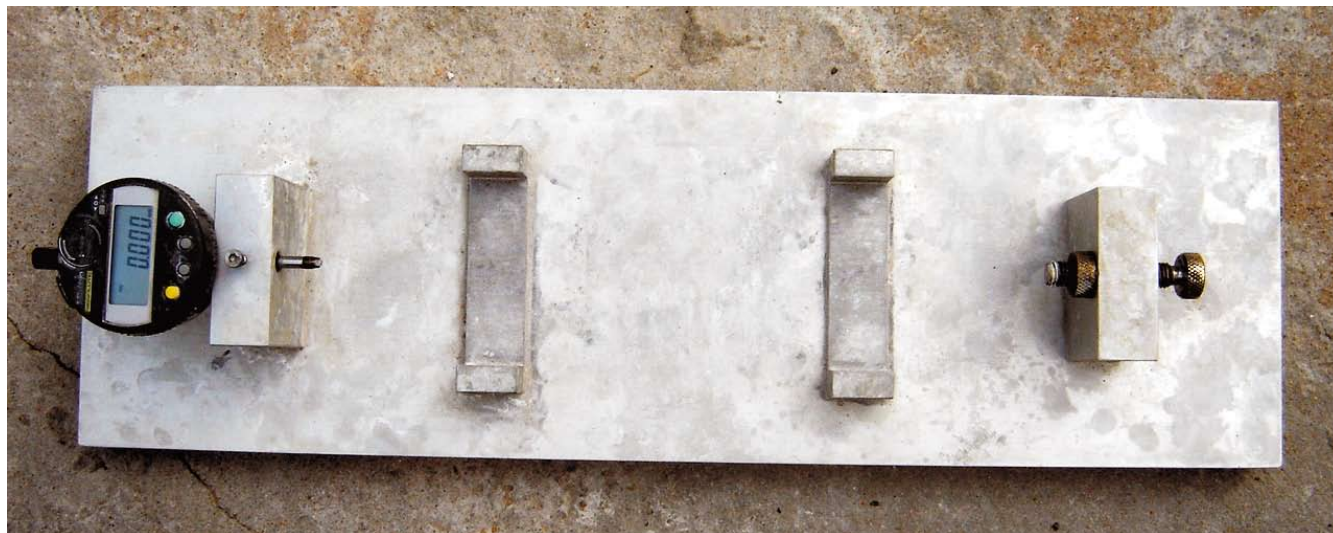
Alguns autores [6, 7] utilizaram em suas pesquisas, teores em torno de 40% a 50% do total da água absorvida em 24 horas. Já outros autores, [23, 24, 25] utilizaram teores maiores

de água na pré-umidificação, chegando até à saturação. Para essa 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

Figura 3 - Desrosqueamento das bases metálicas



Figura 4 – Aparato utilizado para realização das leituras de retração dos corpos-de-prova



por muito tempo, ultrapassando o tempo de fim de pega do cimento [5], e no caso do cimento utilizado é de 245 minutos, isso significa que 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, adicionava-se o cimento e o restante da água de amassamento, misturando-os por quatro minutos. Por fim adicionava-se o agregado miúdo à mistura, deixando a betoneira misturar a massa por mais quatro 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 ± 2 cm medida pelo abatimento de tronco de cone (*slump test*).

Uma vez alcançado o abatimento pretendido iniciava-se o processo de moldagem dos dois corpos-de-prova prismáticos, conforme os procedimentos da ASTM C 157-93 – *Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*, para cada traço produzido, utilizando-se uma fôrma de madeira. Foram utilizadas bases metálicas, de área igual à seção transversal do corpo-de-prova, com um pino de aço inoxidável ao centro, de forma que estes pinos continham ranhuras em uma extremidade, para facilitar a aderência ao concreto, e uma rosca na outra extremidade, por meio da qual eram fixados nas bases metálicas (Figura 2-a). As leituras de retração foram feitas considerando a distância entre esses dois pinos. Estas bases metálicas foram colocadas nas formas (Figura 2-b), que posteriormente foram enchidas com o concreto produzido (Figura 2-c). O adensamento do concreto foi realizado em duas camadas, com aplicação de 25 golpes por camada, por meio de um soquete cilíndrico metálico. Vinte e quatro horas após a moldagem, as fôrmas foram desmon-

Tabela 5 – Simbologia das variáveis utilizadas nos modelos

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. verm.	independente
rvm	percentual de agreg. miúdo substituído por recicl. de cer. verm.	independente
a/c	relação água/cimento	independente
ϵ_{224}	retração por secagem aos 224 dias	de resposta

tadas, retirando-se assim os corpos-de-prova. Desrosquearam-se então as bases metálicas, ficando somente uma pequena parte do pino exposta (Figura 3). Uma vez desmoldados, os corpos-de-prova ficaram imersos por 30 minutos em recipientes, que continham água saturada com cal, em uma câmara com temperatura ($23 \pm 1,7$ °C) e umidade ($50 \pm 4\%$) controladas. Após esse período, estes corpos-de-prova foram retirados dos recipientes, enxugados e então fez-se a leitura inicial do comprimento do corpo-de-prova utilizando-se um aparato metálico que continha um defletômetro digital, de precisão de milésimo de milímetro, em uma das extremidades, no qual os corpos-de-prova foram dispostos horizontalmente (Figura 4).

Imediatamente após a realização da primeira leitura (1 dia após a moldagem), os corpos-de-prova foram reimersos em água saturada com cal, onde permaneceram por mais 27 dias, período esse em que foram realizadas as leituras de retração de 4, 7, 14 e 28 dias depois de moldados, utilizando-se o mesmo procedimento adotado para a leitura inicial. Após esse período, esses corpos-de-prova foram retirados da imersão e dispostos em prateleiras dentro da mesma câmara de temperatura e umidade controladas, efetuando-se as leituras de retração de 56, 112 e 224 dias. Convém salientar que o procedimento adotado para se realizar as leituras foi aplicado a todos os corpos-de-prova, mantendo-se inclusive o posicionamento dos mesmos no aparelho de medição durante a realização de todas as leituras, uma vez que desejava-se reduzir ao máximo as intervenções externas, pois as deformações medidas eram da ordem de milésimo de milímetro.

4. Resultados

4.1 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 testar modelos lineares e não lineares, para a variável de resposta.

Para um melhor entendimento dos modelos fez-se uma abreviação dos nomes das variáveis independentes e das variáveis de resposta, que se encontram na Tabela 5. Os dados coletados permitem estabelecer modelos relacionando a retração por secagem com as variáveis independentes, podendo se estabelecer modelos baseados na regressão linear múltipla ou modelos baseados na regressão não linear.

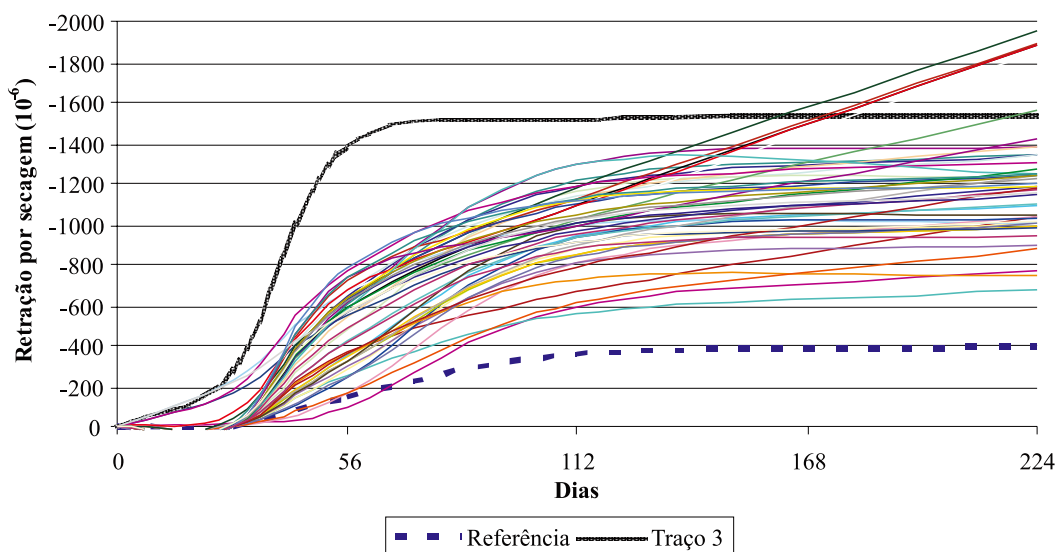
Juntamente com a construção dos modelos foi feita uma análise dos resíduos padronizados. Os dados coletados que geraram resíduos padronizados com módulo maior que 3 foram eliminados da análise, sendo que estes foram os valores obtidos para o traço de concreto número 3.

4.2 Apresentação, análise e discussão dos resultados

A média dos resultados obtidos para cada traço, ao longo do tempo, foi disposta graficamente na Figura 5. Pode-se observar que todas as retrações foram superiores a do concreto de referência e as do concreto de traço 3 foram anormais e este dado não foi usado na etapa de construção do modelo.

De posse dos dados coletados, foi modelado o comportamento da retração por secagem, para as idades de 56 e 224 dias, utilizando-se uma análise de regressão múltipla, testando a significância de todas as variáveis independentes para essa propriedade, nessas idades. Para a idade de 56 dias, observou-se uma grande variabi-

Figura 5 – Retrações por secagem médias para cada traço de concreto do projeto de experimentos



$$\varepsilon_{224} = (796.w/c^{0,5}).(1 + 0.232.rcc + 0.432.rcc + 0.351.rmc).(1 + 0.687.rcf + 0.412.rrcf + 0.567.rmf) \quad (2)$$

lidade nos resultados obtidos, impedindo a identificação do efeito exercido pelas diversas variáveis, uma vez que o modelo obtido para essa idade apresentou somente 4 das 7 variáveis como termos significativos, além de apresentar um baixo coeficiente de determinação ($R^2=32,5\%$).

Para a idade de 224 dias, apesar do modelo construído ainda apresentar grande variabilidade, foi possível detectar todas as variáveis como significativas. Para esta idade, foram testados dois tipos de análises, a análise linear e não linear, tendo-se obtido para ambas um coeficiente de determinação bastante similar, da ordem de 42%, ou seja, os modelos explicam somente 42% dos efeitos dos agregados reciclados na retração por secagem. Devido sua natureza mais intuitiva, o modelo não linear foi o escolhido para estimar os valores da retração por secagem conforme expressado na Equação 2.

Nesse modelo, o primeiro termo modela somente o efeito da relação água/cimento. O segundo termo modela o efeito da adição de material reciclado graúdo e o terceiro termo, o efeito da adição de material reciclado miúdo. Os percentuais de substituição dos agregados miúdo ou graúdo pelos reciclados devem ser informados na escala de 0 (0%) a 1 (100%), enquanto que 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 devem ser no máximo igual a 1 (100%), para cada tipo de agregado (graúdo e miúdo). Para o modelo proposto, os valores da retra-

ção são dados na ordem de 10^{-6} , em valores positivos, o que indica que quanto maior o valor absoluto encontrado, maior o valor da retração apresentada pelo concreto. A tentativa de inserir termos quadrados, como ram^2 , ou interações, como $ram \times rag$, não melhorou o ajuste, portanto esses termos mais complexos foram desprezados.

De posse do modelo apresentado na Equação 2, o qual descreve o comportamento da retração por secagem para os 224 dias, gerou-se alguns gráficos que ilustram a influência de cada tipo de agregado reciclado para esta propriedade, para os teores de substituição de 0%, 50% e 100% e para as relações água/cimento de 0,46, 0,60 e 0,74. Montou-se também uma tabela com os aumentos e diminuições da retração para cada caso, sendo que esses gráficos e a tabela encontram-se dispostos nas Figuras 6, 7 e 8 e na Tabela 6.

Conforme pode ser visto nas Figuras 6 a 8, todos os concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram uma retração maior que a retração do concreto de referência. Nota-se também que a relação a/c exerceu grande influência sobre a retração por secagem, sendo que quanto maior a relação água/cimento do concreto, maior é a retração obtida pelo modelo. Conforme dados da Tabela 6, os concretos de relação água/cimento de 0,60 e 0,74 apresentam retrações 14% e 27% superiores à retração do concreto de relação água/cimento de 0,46. Esse comportamento é coerente com a literatura, uma vez que concretos com grandes relações água/cimento correspondem a concretos com um alto teor

Figura 6 – Comportamento da retração por secagem em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,46

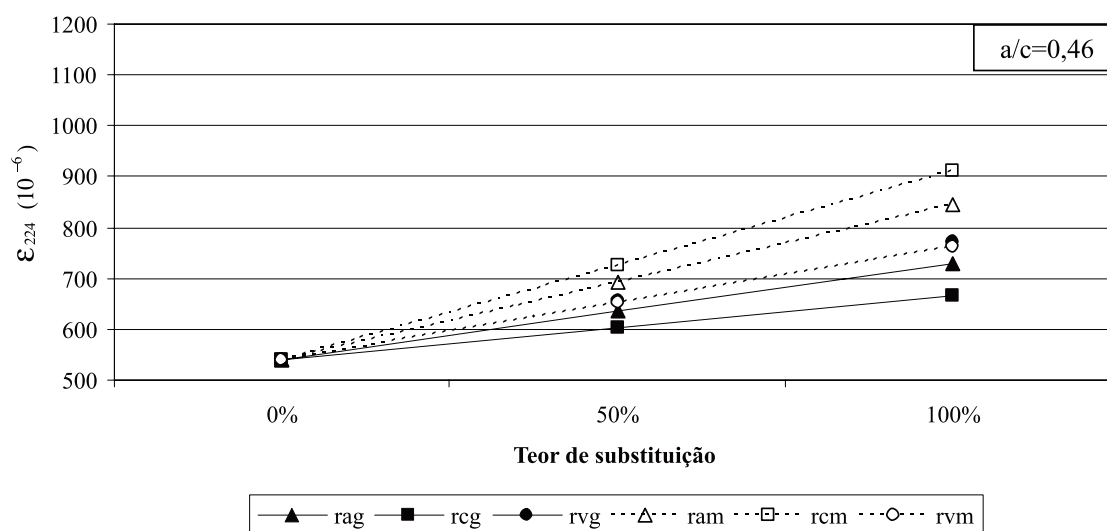
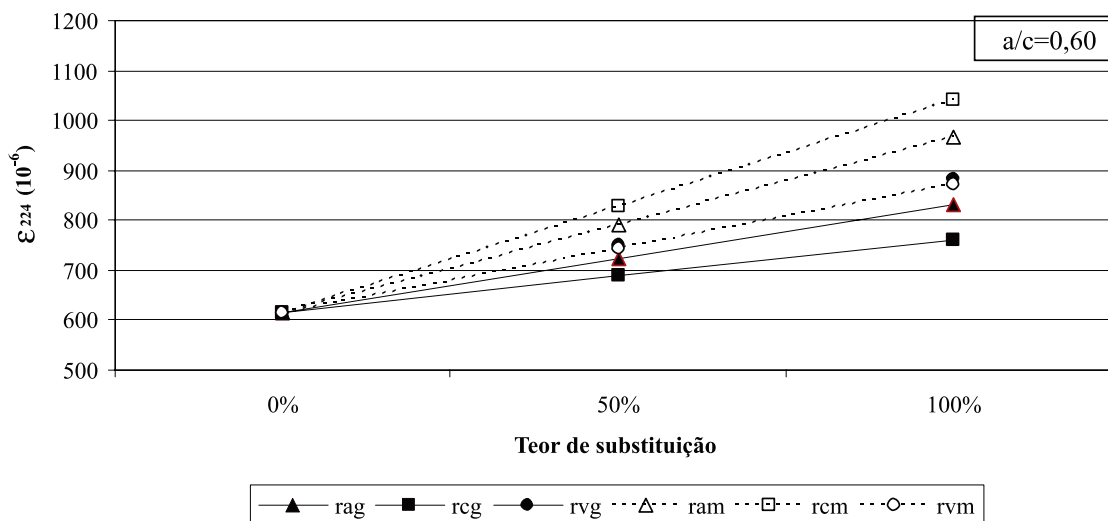


Figura 7 – Comportamento da retração por secagem em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,60



de água na mistura, sendo que quando esse excesso de água é perdido para o meio externo, uma grande retração é sentida pelo concreto [26].

De acordo com o modelo, a crescente substituição dos agregados naturais pelos reciclados, seja ele gráudo ou miúdo, provoca um crescente acréscimo na retração por secagem do concreto, apresentando coerência com outros trabalhos sobre o tema [13,

16, 27]. Tal efeito é coerente e pode ser explicado em função da maior porosidade e do menor módulo de deformação dos agregados reciclados e da conseqüente menor restrição a deformações do concreto propiciada pelos mesmos.

Uma outra possível explicação para esse fenômeno seria a maior demanda de pasta de cimento por parte desses concretos para que se obtenha um mesmo grau de empacotamento. Tal raciocínio

Figura 8 – Comportamento da retração por secagem em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,74

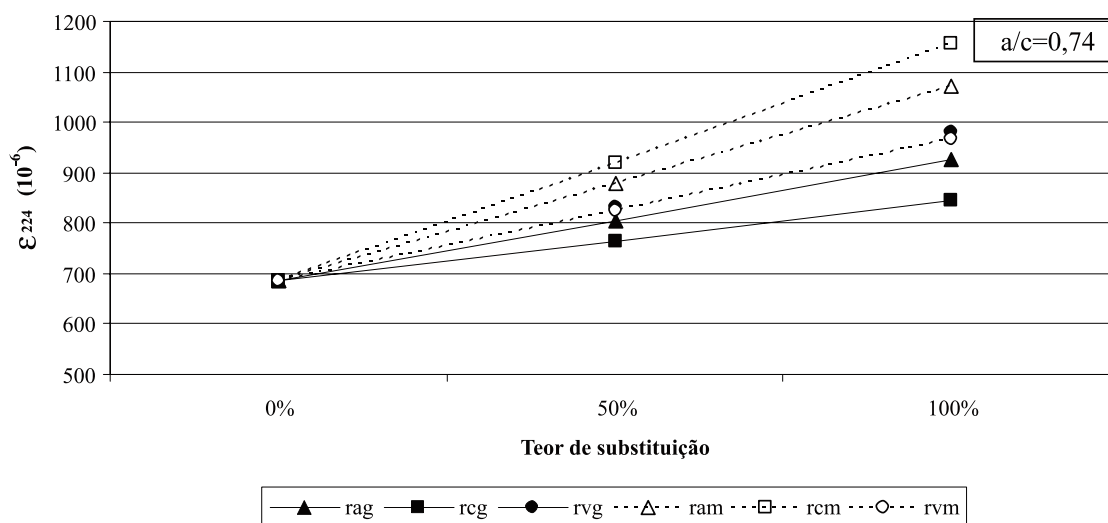


Tabela 6 – Desempenho da retração por secagem dos concretos quando feito a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado para a idade de 224 dias

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%	1,18	1,12	1,22	1,28	1,34	1,21
100%	1,35	1,23	1,43	1,57	1,69	1,41
Relação água/cimento						
	0,46		0,60		0,74	
	1,00		1,14		1,27	

é coerente com os resultados apresentados por outro autor [28], onde o mesmo constata um aumento do consumo de cimento, e consequentemente de água para se manter a mesma relação água/cimento, com o aumento do teor de reciclados para que se mantenha a consistência especificada.

De acordo com os coeficientes do modelo encontrado (Equação 2), sendo ratificado pelos dados apresentados na Tabela 6, nota-se que a substituição do agregado miúdo produz um efeito maior sobre a retração por secagem do que a substituição do agregado graúdo, sendo que o efeito mais pronunciado está associado ao rcm (agregado miúdo reciclado de concreto) e o menor efeito, ao rcg (agregado graúdo reciclado de concreto) em função da magnitude dos seus coeficientes.

Conforme os dados da Tabela 6, o uso do agregado miúdo reciclado de cerâmica vermelha provoca um acréscimo na retração por secagem da ordem de 41%, para 100% de substituição. Este acréscimo é inferior aos acréscimos propiciados pelos agregados miúdos reciclado de concreto e de argamassa, os quais aumentam a retração por secagem na ordem de 69% e 57%, respectivamente, quando substituiu-se totalmente os agregados miúdos naturais. Entretanto, os acréscimos na retração propiciados pela substituição de 100% dos agregados graúdos naturais pelos graúdos reciclados de concreto, argamassa e cerâmica vermelha são da ordem de 23%, 35% e 43%, respectivamente.

5. Conclusões

De acordo com os resultados obtidos, os concretos produzidos com os agregados reciclados unanimemente apresentaram retrações por secagem superiores a do concreto produzido com agregados naturais. Para a idade de 56 dias, observou-se uma excessiva variabilidade nos resultados da retração por secagem dos concretos produzidos, apresentando o modelo somente 4 das 7 variáveis dependentes como termos significativos. Já para a idade de 224 dias, apesar do modelo construído para a retração por secagem ainda apresentar grande variabilidade, houve a inserção de todas as variáveis no mesmo, como termos significativos. Conforme o modelo determinado para essa última idade, o efeito mais pronunciado está associado ao agregado miúdo reciclado de concreto (rcm) e o menor efeito ao agregado graúdo reciclado de concreto (rcg).

6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao NORIE (Núcleo Orientado à Inovação da Edificação) da UFRGS pelo apoio na realização dos experimentos e ao CNPq e à CAPES pelo financiamento deste trabalho por meio do PQI 106/03-8 (CEFET/CE-EESC/USP).

7. Referências bibliográficas

- [01] WEIL, M.; JESKE, U.; SCHEBEK, L. Closed-loop recycling of construction and demolition waste in Germany in view of stricter environmental threshold values. *Waste Management and Research*, Vol. 24, p. 197-206, 2006.
- [02] XIAO, J.; SUN, Y.; FALKNER, H. Seismic performance of frame structures with recycled aggregate concrete. *Engineering Structures*, Vol. 28, p. 1-8, 2006.
- [03] CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D. Modelagem da resistência à compressão de concretos produzidos com agregados reciclados de RCD. *Revista Minerva*, Vol. 4, N. 1, p. 75-84, 2007.
- [04] CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D. Determinação da influência do tipo de agregado reciclado de resíduo de construção e demolição sobre o módulo de deformação de concretos produzidos com agregados reciclados. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais (RIEM)*, Vol. 1, N. 2, p. 171-192, 2008.
- [05] MEHTA P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: estruturas, propriedades e materiais*. São Paulo, Ed. PINI, 1994.
- [06] LEITE, M. A. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Porto Alegre-RS, 2001. 270 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [07] 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. 151p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [08] LOVATO, P. S. Verificação dos Parâmetros de Controle de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição para Utilização em Concreto. Porto Alegre, 2007. 180p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [09] POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. *Construction and Building Materials*, Vol. 16, p. 281-289, 2002.
- [10] U. LEAL. Sobras que valem uma obra. *Techne: revista de tecnologia da construção*. Vol. 10, N. 55, p. 58-62, 2001.
- [11] CABRAL, A. E. B. Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD. São Carlos-SP, 2007. 280p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [12] LIMBACHIYA, M. C.; LEELAWAT, T.; DHIR, R. K. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*, Vol. 33, November, p. 574-580, 2000.
- [13] GÓMEZ-SOBERÓN, J. M. V. Relationship between gas absorption and the shrinkage and creep of recycled aggregate concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 25, N. 2, p. 42-48, 2003.
- [14] KHATIB, J. M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, p. 763-769, 2005.
- [15] HANSEN, T. C.; BOEGH, E. Elasticity and drying shrinkage of recycled-aggregate concrete. *ACI Journal*, Vol. 82, N. 5, p. 648-652, 1985.
- [16] SCHULZ, R. R.; HENDRICKS, Ch. F. Recycling of masonry rubble. In: *Recycling of Demolished Concrete and Masonry*, RILEM Technical Committee Report N. 6, Editor: T. C. HANSEN, E & FN SPON, London, p. 164-255, 1992.
- [17] RIBEIRO, J. L. D.; C. S. T. CATEN. Projeto de experimentos. Porto Alegre: FEEng/UFRGS, 2001. 128 p.
- [18] 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.
- [19] LIN, Y.; TYAN, Y.; CHANG, T.; CHANG, C. An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pg. 1373-1380, 2004.
- [20] HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. Manual de Dosagem e Controle do Concreto. São Paulo: PINI, Brasília: SENAI, 1992. 349p.
- [21] 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*, Vol 15, N. 5, pg. 443-451, 2003.
- [22] KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pg. 703-711, 2003.
- [23] ZAHARIEVA, R.; BUYLE-BODIN, F.; SKOCZYLAS, F. EIRQUIM, E. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, pg. 223-232, 2003.
- [24] BRITO, J. de; PEREIRA, A. S.; CORREIA, J. R. Mechanical behavior of non-structural concrete made with recycled aggregates. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 27, N. 4, pg 429-433, 2005.
- [25] XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, Ch. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pg. 1187-1194, 2005.
- [26] TAVAKOLI, M.; SOROUSHAN, P. Drying shrinkage behavior of recycled aggregate concrete. *Concrete International*, Vol. 18, N. 11, p. 58-61, 1996.
- [27] DHIR, R.; PAINE, K.; DYER, T. Recycling construction and demolition wastes in concrete. *Concrete*, March, p. 25-28, 2004.
- [28] LEVY, S. M. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria. São Paulo-SP, 2001. 194 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.