

# Influence of the type of recycled aggregate from construction and demolition waste on the module of deformation of recycled aggregate concrete

## *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*



A. E. B. CABRAL<sup>a</sup>  
eduardo@cefetce.br

V. SCHALCH<sup>b</sup>  
vschalch@sc.usp.br

D. C. C. DAL MOLIN<sup>c</sup>  
dmolin@ufrgs.br

J. L. D. RIBEIRO<sup>d</sup>  
ribeiro@producao.ufrgs.br

### Abstract

To contribute to the recycled aggregate concrete study, an experimental test was made by substituting the natural aggregates for recycled aggregates of concrete, of mortar and of red ceramic, which are the three main ingredients of Brazilian construction and demolition waste. Besides the aggregate types, the water/cement ratio (w/c) was also changed from 0.4 to 0.8, fixing the amount of pre soaking water of the recycled aggregates. The concrete's module of deformation was determined at 28-days age, using the Brazilian Standard ABNT NBR 8522/03, in cylindrical specimens. The results show that substituting the natural aggregates for the recycled aggregates reduces the module of deformation, and that the coarse red ceramic recycled aggregate and the fine concrete recycled aggregate were the ones that exerted the greatest and the smallest influence, respectively, on the concrete's module of deformation.

**Keywords:** recycling, construction and demolition waste, concrete, module of deformation.

### Resumo

Com o intuito de contribuir no estudo de concretos produzidos com agregados reciclados, produziu-se um traço de referência (com agregados naturais) e outros 49 traços, substituindo-se os agregados naturais por agregados reciclados de concreto, de argamassa e de cerâmica vermelha, que são os 3 maiores constituintes dos resíduos de construção e demolição das cidades brasileiras. Além do tipo de agregado, também variou-se a relação água/cimento (a/c), entre os valores de 0,4 a 0,8, fixando-se o teor de água na pré-umidificação dos agregados reciclados. O módulo de deformação dos concretos foram determinados aos 28 dias, utilizando-se a norma brasileira ABNT NBR 8522/03, em corpos-de-prova cilíndricos. Os resultados apontam que a substituição do agregado natural pelo reciclado resulta em uma redução do módulo de deformação, sendo que o agregado graúdo de cerâmica vermelha e o agregado miúdo reciclado de concreto foram os que exerceram a maior e a menor influência, respectivamente, sobre o módulo de deformação dos concretos produzidos.

**Palavras-chave:** reciclagem, resíduo de construção e demolição, concreto, módulo de deformação.

<sup>a</sup> Professor Doctor, Federal Center of Technological Education of Ceará (CEFET/CE), Solid Wastes Research Center (CPRS), Civil Construction Department, eduardo@cefetce.br Av. 13 de maio, 2081 – Benfica – 60.040-531 – Fortaleza/CE – Brazil.

<sup>b</sup> Professor Doctor, Pos-Graduation Program in Environmental Engineering Science (PPG-SEA) in Engineering School of São Carlos at Universidade of São Paulo (EESC/USP), vschalch@sc.usp.br Av. Trabalhador Sancarlense, 400 – 13.560-970 – São Carlos/SP – Brasil.

<sup>c</sup> Professor Doctor, Pos-Graduation Program in Civil Engineering (PPGEC) at Federal University of Rio Grande do Sul (NORIE/UFRGS), dmolin@ufrgs.br Av. Osvaldo Aranha, 99, 3º andar - 90.035-190 – Porto Alegre/RS – Brasil.

<sup>d</sup> Professor Doctor, Pos-Graduation Program in Production Engineering (PPGEP) at Federal University of Rio Grande do Sul (LOPP/UFRGS), ribeiro@producao.ufrgs.br Praça Argentina, 9 – 90.040-020 – Porto Alegre/RS – Brasil.

## 1. Introdução

A Indústria da Construção Civil é um setor produtivo que possui considerável papel na economia do Brasil. Entre os anos de 1980 e 1996, o setor foi responsável por 65% da formação do investimento bruto nacional e no ano de 2001, o setor foi responsável por 15,6% do PIB, sendo que as edificações residenciais representaram um montante entre 6% e 9% do PIB nacional [1].

Para promover tamanha grandiosidade, a indústria da construção civil é atualmente a maior consumidora de recursos naturais da sociedade, absorvendo de 20 a 50% desses recursos explorados no mundo [2]. No caso da madeira, a Indústria da Construção Civil consome aproximadamente 2/3 de toda a madeira natural extraída da natureza [3].

As atividades de construção demandam atualmente uma notável quantidade de materiais inertes, tais como areia e cascalho, que usualmente são fornecidos por meio da extração de sedimentos aluviais. A extração desses sedimentos, modifica o perfil dos rios e o seu equilíbrio, além de introduzir problemas ambientais, tais como modificações em sua estrutura hidrológica e hidrogeológica. A extração de material inerte de formações rochosas em áreas acidentadas e montanhosas também é uma perigosa atividade ao meio ambiente, uma vez que também altera a paisagem e potencialmente provoca problemas de estabilidade nas mesmas [4].

Como em todo processo industrial, o uso dos insumos da indústria da construção civil gera resíduos, e em grande escala, sendo que os mesmos necessitam ser gerenciados. Segundo John [2], o macrocomplexo da indústria da construção civil é responsável por 40% dos resíduos gerados na economia.

Uma solução, que a cada dia ganha 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, uma vez que há uma escassez crítica de agregados naturais para a produção de concreto em muitas áreas urbanas, quando ao mesmo tempo, o aumento das quantidades de RCD gerados nessas mesmas áreas também é considerável. Portanto, com a reciclagem, uma outra fonte de matéria-prima é utilizada, além de se propiciar uma redução na disposição e no volume final dos resíduos [5].

Devido ao importante papel da indústria da construção civil no desenvolvimento das nações, é conveniente que se busque e adote medidas urgentes para inserir as atividades desenvolvidas por este setor no novo modelo de desenvolvimento que se busca, o desenvolvimento sustentável. Segundo John [2], “nenhuma sociedade poderá atingir o desenvolvimento sustentável sem que a construção civil, que lhe dá suporte, passe por profundas transformações”.

Os RCDs caracterizam-se por possuírem uma 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 RCDs, representando acima de 70% da massa total [6], [3], [7], [8]. Essa heterogeneidade dos RCDs 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 varia os teores dos seus constituintes.

## 2. Objetivos

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, tanto de natureza mecânica quanto com relação à sua durabilidade. Entretanto, este trabalho restringe-se a modelar o comportamento do módulo de deformação 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.

## 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 completo para se estudar o efeito conjunto de todos esses 7 fatores sobre a variável de resposta é o projeto de experimentos fatoriais  $2^7$  [9]. A execução desse projeto consiste em realizar 2<sup>7</sup> 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 como base um projeto fatorial  $2^k$ , fracionado ou completo, onde soma-se a este último, todos os 2<sup>k</sup> vértices de uma estrela e os pontos centrais da estrela e do projeto fatorial [9]. Para o experimento em questão, adotou-se um projeto fatorial fracionado e os pontos centrais.

O uso dos experimentos fatoriais fracionados são muito úteis 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 [10]. Este tipo de estudo utilizando ferramentas estatísticas já foi previamente executado por outras diversas pesquisas nacionais e internacionais [7], [8], [11]. Para o projeto completo exposto, este 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 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 o módulo de deformação dos concretos produzidos, de acordo com os procedimentos descritos na NBR 8522/03 – Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva

tensão-deformação. Algumas outras variáveis foram fixadas, tais 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 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

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

Traço	Relação a/c	Agregado Graúdo				Agregado Miúdo			
		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%

a média para os grãos 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 me-

lhor maneira de compará-los então, foi parametrizando-os em função da massa específica do agregado natural de seu grupo (grãos 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 grãos 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 [12] fixando o abatimento medido pelo método do tronco de cone (slump test) em  $12\pm 2$ cm,

**Tabela 1 – Traços de concreto definidos pelo fracionamento do experimento (continuação)**

Traço	Relação a/c	Agregado Grão				Agregado Miúdo			
		Natural	Concreto	Cer. Verm.	Argamassa	Natural	Concreto	Cer. Verm.	Argamassa
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 <sup>3</sup> )	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )
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

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	1,44
Graúdo reciclado de concreto	5,65	2,27	1,54
Graúdo reciclado de argamassa	9,52	2,01	1,44
Graúdo reciclado de cer. vermelha	15,62	1,86	1,46

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 [13], [14], [7], [8], [15], 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. A compensação do volume dos agregados reciclados nos traços do projeto experimental foi feita segundo a Equação 1, onde:

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

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

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

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

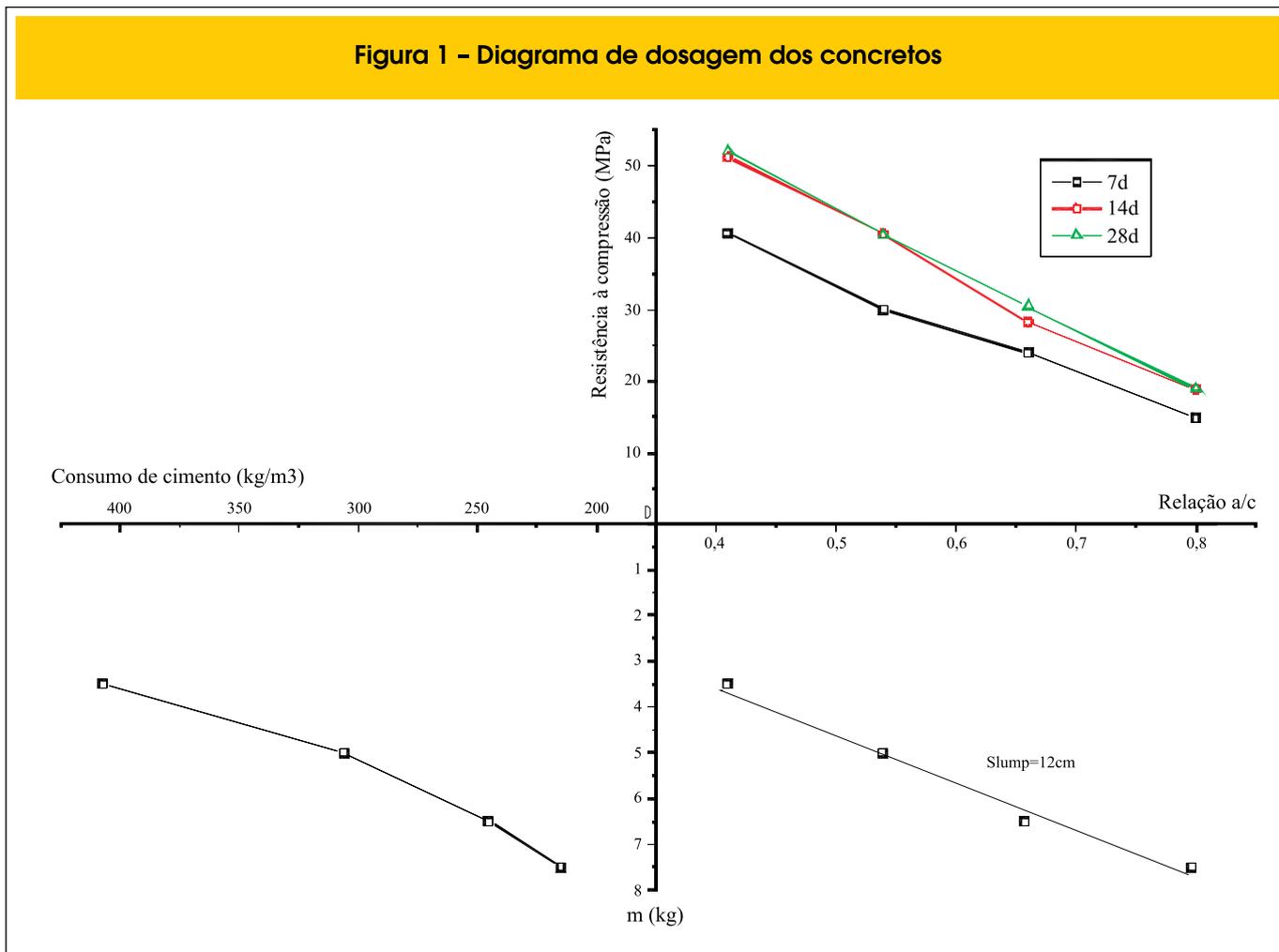
$\gamma_{AN}$  = massa específica do agregado natural (kg/cm<sup>3</sup>)

Posteriormente determinou-se qual seria a massa de água que seria adicionada antes das concretagens aos agregados reciclados para que estes a absorvessem, sendo então 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 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 através de microscópio, um nítido limite entre essas duas fases [16]. Entretanto, convém lembrar que é o módulo do próprio agregado que essencialmente governa o módulo do concreto [20].

Alguns autores [7], [8] utilizaram em suas pesquisas, teores em torno de 40% a 50% do total da água absorvida em 24 horas. Já outros autores, [17], [18], [19] 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

Figura 1 – Diagrama de dosagem dos concretos



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 [20], 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 ci-

mento 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±2cm medida pelo abatimento de tronco de cone (slump test). Uma vez alcançado ou superado o abatimento pretendido, para cada traço produzido, moldou-se 4 corpos-de-prova cilíndricos de 10cm de diâmetro por 20cm 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.

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

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

Tabela 5 - Simbologia das variáveis utilizadas nos modelos

Variável		
Símbolo	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
$E_c$	módulo de deformação	de resposta

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 serem ensaiados. Nesta data, esses corpos-de-prova foram capeados e recolocados na câmara úmida, onde permaneceram até o momento do ensaio.

## 4. Resultados

### 4.1 Considerações iniciais

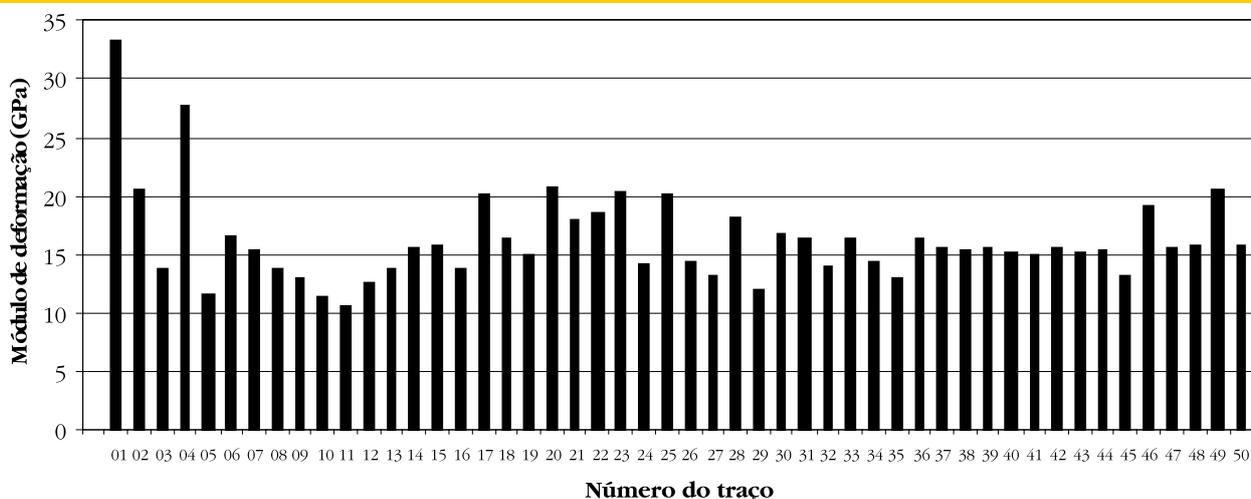
Como já mencionado, o projeto experimental utilizado envolve 7

variáveis independentes e o experimento foi fracionado, de forma a reduzir o número total 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 as variáveis de resposta com as variáveis independentes, podendo se 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

Figura 2 - Média dos resultados de módulos de deformação obtidos para cada traço de concreto



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 3. A análise apresentada a seguir foi desenvolvida apoiada em uma rotina de regressão linear, que mesmo sendo relativamente simples, apresentou um bom resultado, uma vez que o coeficiente de determinação encontrado foi de 98% e todos os fatores foram considerados significativos. Foram tentados alguns modelos mais complexos, mas o ganho estatístico foi pequeno, sendo assim, optou-se pelo modelo mais simples.

#### 4.2 Apresentação, análise e discussão dos resultados

Passados os 28 dias após a moldagem dos corpos-de-prova, estes foram rompidos, estando a média dos resultados obtidos para cada traço disposto graficamente, por meio da Figura 2. O modelo que mais se adequou para representar o módulo de deformação dos concretos com agregados reciclados foi o da Equação 2.

$$E_c = \left( \frac{21,69}{a/c^{0,5}} \right) [1 - (\% \text{substituído})] \quad (2)$$

O primeiro termo entre parênteses refere-se ao módulo de deformação 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 o módulo original, geralmente reduzindo-o em função da substituição do agregado natural pelo reciclado. Então essa perda do módulo é função do percentual de agregado natural substituído pelo agregado reciclado, ou seja:

Perda do módulo = f (% 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 (a/c). O modelo da perda de resistência encontrado possui um excelente coeficiente de determinação (98%), estando descrito na Equação 3.

$$\text{Perda do módulo} = 0,352.rag + 0,158.ram + 0,231.reg + 0,110.rcm + 0,440.rvg + 0,113.rvm \quad (3)$$

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 o módulo de deformação 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 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).

$$E_c = \left( \frac{21,69}{a/c^{0,5}} \right) [1 - (0,352.rag + 0,158.ram + 0,231.reg + 0,110.rcm + 0,440.rvg + 0,113.rvm)] \quad (4)$$

De acordo com o modelo apresentado, a substituição do agregado natural pelo reciclado resulta em uma redução do módulo de deformação para todos os tipos de agregado, o que está coerente com os trabalhos apresentados por vários autores [14], [21], [22], [19].

Observa-se também que a substituição do agregado graúdo produz um efeito maior na perda do módulo do que a substituição do agregado miúdo, em função da magnitude dos coeficientes encontrados para os mesmos. Entretanto, justificando tal comportamento, Mehta e Monteiro [20] afirmam que o módulo de deformação do concreto está intrinsecamente ligado à fração volumétrica, à massa específica, ao módulo de deformação do agregado e da matriz de cimento e às características da zona de transição. Tais autores apontam que o módulo de deformação do agregado está ligado principalmente à sua porosidade e, em grau um pouco menor, à dimensão máxima característica do agregado, à forma, à textura, à granulometria e à sua composição mineralógica. Segundo eles, é o módulo do agregado que controla a capacidade de restrição da deformação da matriz e este é determinado pela porosidade do agregado.

Em função das afirmações acima e de acordo com as características dos agregados reciclados utilizados nos experimentos, ou seja, a massa específica dos agregados miúdos reciclados é menor que a massa específica dos agregados graúdos reciclados [23], é coerente que o módulo de deformação dos concretos produzidos com os primeiros seja menor que o módulo de deformação dos concretos produzidos com os segundos.

De posse do modelo descrito na Equação 4, gerou-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 se gerar os gráficos, montou-se uma tabela com as reduções do módulo de deformação para cada caso. Os gráficos e a tabela encontram-se dispostos nas Figuras 3, 4 e 5 e na Tabela 6.

Por meio dos dados dos gráficos e da tabela acima citados, pode-se observar a influência da relação água/cimento sobre o desempenho do módulo de deformação dos concretos produzidos com os agregados reciclados, uma vez que ao se aumentar a relação a/c de 0,46 para 0,60 e para 0,74, tem-se uma redução no módulo de 12% e 21%, respectivamente, somente devido à relação a/c. Segundo esses dados, também observa-se a menor influência dos agregados reciclados miúdos sobre o comportamento do módulo de deformação.

Todos os agregados reciclados exercem uma influência negativa sobre o módulo de deformação dos concretos com eles produzidos, sendo que o agregado graúdo de cerâmica vermelha exerce a maior influência, alcançando uma redução de 22% no valor do módulo, para o teor de substituição de 50%,

Figura 3 - Resultados de módulo de deformação em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,46

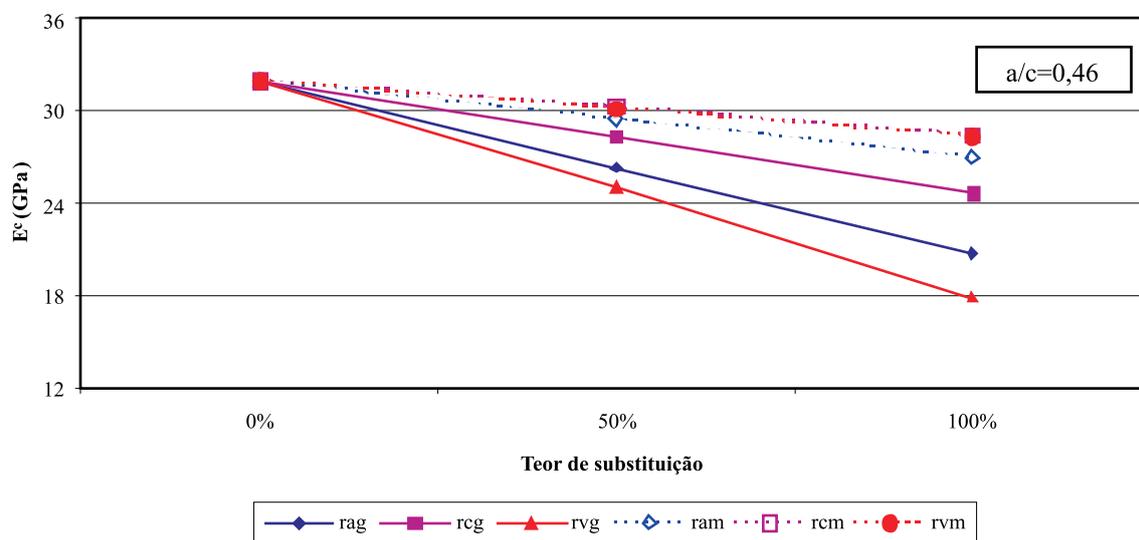
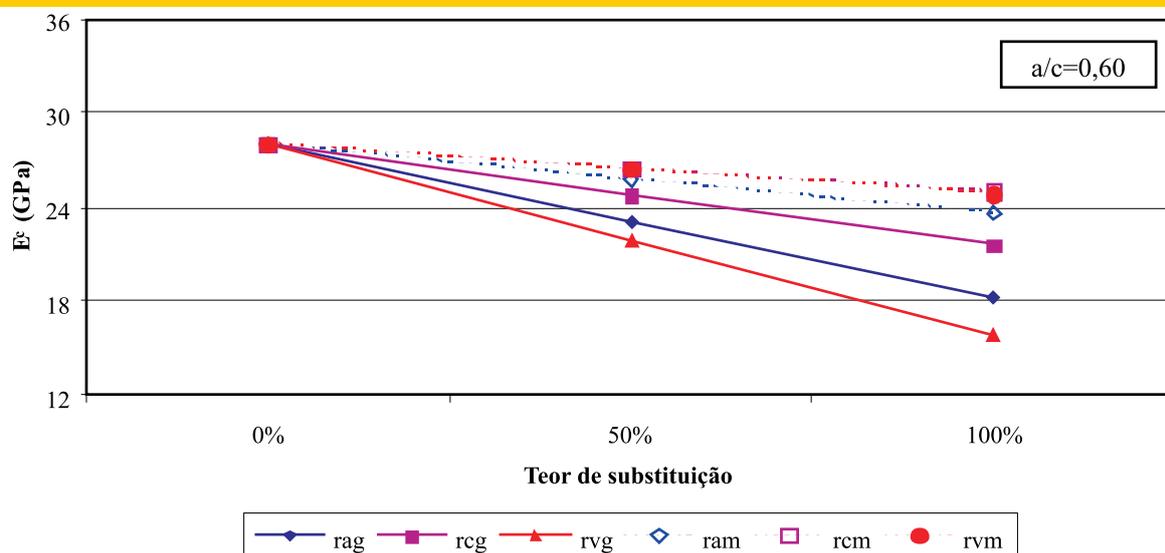


Figura 4 - Resultados de módulo de deformação em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,60

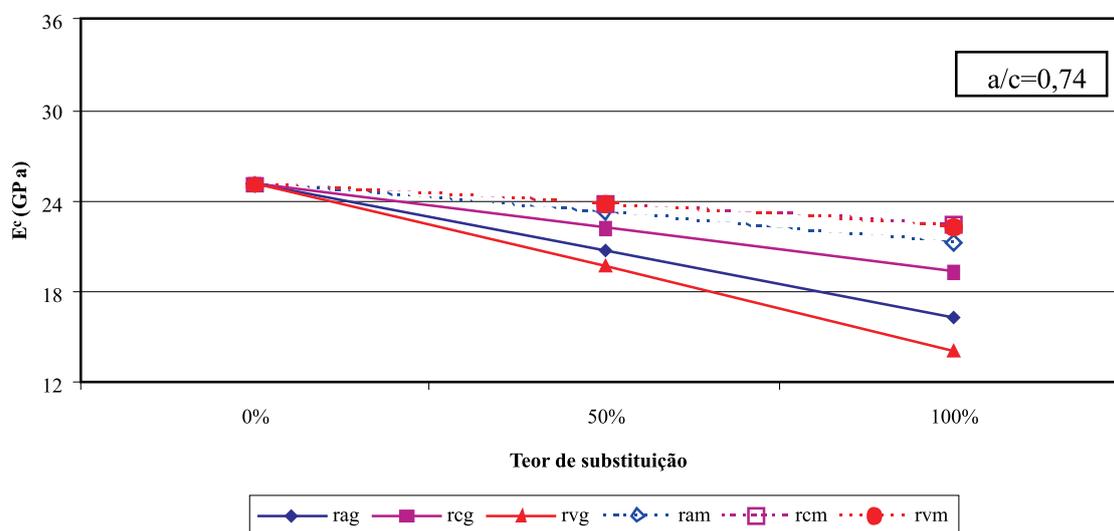


e de 44%, para 100% de substituição. Considerando as características dos agregados reciclados, pode-se explicar tal comportamento, uma vez que o agregado graúdo de cerâmica vermelha possui a menor massa específica e a maior absorção de água de todos os agregados utilizados, parecendo ser portanto o mais poroso.

Dentre os agregados graúdos reciclados, o agregado graúdo de concreto exerce a menor influência no valor módulo de deforma-

ção do concreto com ele produzido, apresentando ainda assim uma redução considerável de 12%, para o teor de substituição de 50%, e de 23%, para 100% de substituição. Segundo alguns autores [13], a maior deformação apresentada pelos concretos com agregados reciclados de concreto é função do elevado teor de argamassa (em torno de 40% do volume do mesmo) presente no mesmo. Isto também está coerente com os resultados encontrados por outros autores [14], que também substituíram

**Figura 5 – Resultados de módulo de deformação em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,74**



**Tabela 6 – Módulo de deformação 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%	0,82	0,88	0,78	0,92	0,95	0,94
100%	0,65	0,77	0,56	0,84	0,90	0,88
Relação água/cimento						
	0,46		0,60		0,74	
	1,00		0,88		0,79	

o agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado de concreto, encontrando um módulo de deformação em torno de 19% menor que o concreto com agregados naturais.

Já o agregado miúdo de concreto exerce a menor influência, com uma redução de apenas 5% no módulo de deformação, para o teor de substituição de 50%, e de 10%, para 100% de substituição. É sabido que este tipo de agregado possui elevado teor de rocha natural em sua composição, resultado da britagem do concreto com agregado natural, possuindo uma elevada massa específica e a menor absorção de água, dentre os agregados reciclados utilizados.

Ratificando os resultados encontrados, há autores [24, 25] que afirmam que o módulo de deformação de concretos com agregados reciclados de cerâmica atinge somente de 50% a 66% do módulo de concretos com agregados naturais de mesma

resistência. Alguns trabalhos [14, 19, 25] apresentam módulo de deformação de concretos feitos com agregados reciclados de concreto, de 15 a 45% menores que os módulos dos concretos convencionais

## 5. Conclusões

Os concretos produzidos com os agregados reciclados unanimemente apresentaram módulos de deformação inferiores aos do concreto produzido com agregados naturais.

Conforme o modelo determinado, os agregados graúdos reciclados exercem uma maior influência sobre o módulo de deformação que os agregados miúdos reciclados.

Dentre todos os agregados testados, o agregado graúdo reciclado

de cerâmica vermelha exerceu a maior influência sobre o módulo de deformação do concreto com ele confeccionado e o agregado miúdo reciclado de concreto, a menor.

## 6. Agradecimentos

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

## 7. Referências bibliográficas

- [01] NETO, J. C. M. Gestão dos resíduos de construção e demolição no Brasil. São Carlos: Rima, 2005. 162 p.
- [02] JOHN, V. M. Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção. In: Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção / Organizado por Alex Pires Carneiro, Irineu Antônio Schadach de Brum e José Clodoaldo da Silva Cassa. Salvador: EDUFBA; 312 p.; 2001; p. 27-45.
- [03] ZORDAN, S.E. Utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto. Campinas-SP, 1997. 140 p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas.
- [04] BIANCHINI, G.; MARROCCHINO, E.; TASSINARI, R.; VACCARO, C. Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical-mineralogical appraisal. *Waste Management*, Vol. 25, pg. 149-159, 2005.
- [05] SANI, D.; MORICONI, G.; FAVA, G. CORINALDESI, V. Leaching and mechanical behavior of concrete manufactured with recycled aggregates. *Waste Management*, Vol. 25, pg. 177-182, 2005.
- [06] PINTO, T. P. Metodologia para gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. São Paulo-SP, 1999. 203 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [07] 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.
- [08] 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.
- [09] RIBEIRO, J. L. D.; C. S. T. CATEN. Projeto de experimentos. Porto Alegre: FEEng/UFRGS, 2001. 128 p.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. Manual de Dosagem e Controle do Concreto. São Paulo: PINI, Brasília: SENAI, 1992. 349p.
- [13] HANSEN, C. T.; NARUD, H. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete International*, Vol. 5, N. 1, 1983.
- [14] HANSEN, C. T.; BØEGH, E. Elasticity and drying shrinkage of recycled-aggregate concrete. *ACI Journal*, Vol. 82, N. 5, 1985.
- [15] 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.
- [16] KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pg. 703-711, 2003.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] MEHTA P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: estruturas, propriedades e materiais. São Paulo, Ed. PINI, 1994.
- [21] AJDUKIEWICZ, A.; KLISZCZEWICZ, A. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 24, pg. 269-279, 2002.
- [22] GÓMEZ-SOBERÓN, J. M. V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: na experimental study. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, p. 1301-1311, 2002.
- [23] CABRAL, A. E. B.; DAL MOLIN, D. C. C.; SCHALCH, V. Caracterização de agregados reciclados de concreto, de argamassa e de cerâmica vermelha da região metropolitana de Porto Alegre/RS. Anais: 47º Congresso Brasileiro do Concreto. Olinda, 2005.
- [24] RILEM RECOMMENDATION. Specifications for concrete with recycled aggregates. 121- DRG guidance for demolition and reuse of concrete and masonry. *Materials and Structures*, Vol. 27, p. 557-559, 1994.
- [25] KHALAF, F. M.; DeVENNY, A. Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete: review. *Journal of materials in civil engineering*, Vol. 16, N. 04, pg. 331-340, 2004.