

Estudo de grautes produzidos com agregado reciclado de resíduo de bloco cerâmico incorporando teores de cal hidratada

Study of grouts made with recycled aggregate from waste of ceramic block incorporating levels of hydrated lime

Sandra Elisa Gieseler
Bernardo Fonseca Tutikian

Resumo

Em geral, um volume significativo de resíduo proveniente de blocos cerâmicos é gerado na execução de alvenaria de vedação ou estrutural, mesmo quando o sistema construtivo é racionalizado. Assim, incorporar este resíduo sob a forma de agregado reciclado aos grautes pode ser uma boa alternativa. Comumente utilizada em argamassas, a cal hidratada também tem uso recomendado em grautes, objetivando manter a trabalhabilidade da mistura e melhorar a aderência com o substrato, ao auxiliar na hidratação do cimento. Aliando essa capacidade de retenção e absorção de água ao aproveitamento do resíduo cerâmico em grautes, este estudo apresenta uma avaliação da influência do teor da cal hidratada em grautes produzidos com substituição de 30% de agregado gráúdo natural por reciclado. Foram utilizados os teores de 2%, 4% e 6% de cal hidratada, além de produzir um graute referência, sem adição. No estado fresco foi verificada a perda de abatimento. Os traços com cal hidratada apresentaram maior manutenção de consistência. No estado endurecido foram realizados ensaios de velocidade de propagação de onda ultrassônica, compressão axial e absorção de água por capilaridade. Os melhores resultados em ambos os estados foram obtidos com 4% de adição, para os traços pobre e rico, e com 2%, para o traço pobre.

Palavras-chave: Graute. Agregado reciclado. Resíduos de cerâmica vermelha. Cal hidratada.

Abstract

In general, a significant volume of waste from ceramic blocks is generated in structural or non-structural masonry, even when the building system is rationalized. Therefore, the use of this type of waste as recycled aggregate in grouts seems to be a good alternative. Commonly used in mortars, the use of hydrated lime is also recommended in grouts, aiming to maintain the workability of the mixture as well as to improve the adherence to the substrate, helping in the hydration of the cement. Combining this capability of retention and absorption of water with the use of ceramic waste in grouts, this study presents an evaluation of the influence of the levels of hydrated lime in grouts produced with the substitution of 30% of natural aggregate for the recycled one. The levels of hydrated lime used were 2, 4 and 6% and, besides that, a reference grout with no addition of lime. In the fresh state, there was a loss in the reduction of the consistency. The mixtures with hydrated lime presented a higher maintenance of the consistency. In the hardened state, the velocity of propagation of ultrasonic wave, the axial compression and the water absorption by capillarity tests were performed. The best results in both states were obtained by mixtures, rich and poor, with the addition of 4%, and for a poor mixture with 2%.

Keywords: Grout. Recycled aggregate. Red ceramic waste. Hydrated lime.

Sandra Elisa Gieseler
Universidade do Vale do Rio dos Sinos
São Leopoldo - RS - Brasil

Bernardo Fonseca Tutikian
Universidade do Vale do Rio dos Sinos
São Leopoldo - RS - Brasil

Recebido em 04/05/12

Aceito em 29/04/13

Introdução

Ante a estabilização da economia, a indústria da construção civil tem experimentado grande impulso, e as empresas, instigadas pela concorrência, mostram maior preocupação com os custos, procurando investir em novas tecnologias. Definida como um tipo de estrutura em que as paredes são os elementos portantes, a alvenaria estrutural tem sido bem aceita, mostrando-se econômica e eficiente na execução de edificações residenciais e também industriais (PRUDÊNCIO JÚNIOR; OLIVEIRA; BEDIN, 2002). Nessa técnica construtiva os componentes (blocos, argamassa, graute e armadura) são os principais responsáveis pela definição das características resistentes da estrutura. A economia em fôrmas e a redução na quantidade dos revestimentos utilizados são alguns dos aspectos que contribuem significativamente com a redução dos custos (RAMALHO; CORRÊA, 2003). E mesmo nas construções convencionais com estrutura em concreto armado e vedação em alvenaria, é possível um aumento de produtividade, mediante a racionalização dos elementos.

Assim como nos demais processos industriais, na construção civil são gerados resíduos em grande escala, sendo essencial a adoção de atividades de gerenciamento destes (CABRAL *et al.*, 2010). De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ASSOCIAÇÃO..., 2010a), em 2010, os municípios brasileiros coletaram cerca de 31 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição, o que representa 8,7% a mais do que o volume do ano anterior. No uso de alvenaria estrutural ou vedação, mesmo quando racionalizadas, também se verifica a quebra desse material, principalmente nas atividades de transporte e distribuição (RICHTER, 2007).

Particularmente com relação aos resíduos de cerâmica vermelha gerados em obras, observa-se que os restos de telhas, blocos e tijolos contabilizam aproximadamente 30% do total de resíduos gerados nas cidades brasileiras (CABRAL *et al.*, 2010). A representatividade desse percentual tem incentivado a investigação do uso desses resíduos na própria construção civil, além de buscar maneiras que promovam a redução da geração deles. Em obras que utilizam alvenaria de vedação ou estrutural com blocos de cerâmica vermelha, uma alternativa viável, dependendo da quantidade de alvenaria presente no empreendimento, seria incorporar esses resíduos, em forma de agregado reciclado, aos grautes produzidos (FINGER; TUTIKIAN, 2012). Dessa maneira, estes seriam utilizados no próprio local de

geração, não havendo necessidade de ser encaminhados para beneficiamento ou deposição fora da obra.

Utilizado para preenchimento de blocos e canaletas, os grautes constituem-se em materiais peculiares, com propriedades e comportamento distintos dos concretos em geral. Após a mistura, devem apresentar fluidez, consistência do tipo bombeável, baixa ou nenhuma retração e ausência de segregação e exsudação (BAUER, 2005). Os grautes são compostos de cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, água e cal ou outra adição destinada a conferir trabalhabilidade e retenção de água de hidratação à mistura (ABNT, 2010). Prudêncio Júnior, Oliveira e Bedin (2002) afirmam que a cal hidratada pode ser útil no aumento de coesão da mistura, principalmente quando areias mal graduadas são utilizadas. Analogamente, Ince *et al.* (2011) afirmam que o uso da cal hidratada na produção dos grautes traz benefícios, pois diminui a retração e, em função de sua capacidade de retenção de água, promove melhor hidratação do cimento.

Na produção de argamassas, algumas das vantagens ligadas à capacidade da cal hidratada de absorver e reter considerável volume de água são: regular a perda de água para elementos vizinhos; atingir resistência à compressão compatível com a exigida; proporcionar melhoria da interface bloco/argamassa; melhorar a trabalhabilidade; permitir maior recuperação de sobras; permitir melhor absorção dos acomodamentos estruturais; e conferir maior retenção de água para desenvolver as reações que promovem o aparecimento dos constituintes cimentantes (GUIMARÃES, 2002; CECCONELLO; TUTIKIAN, 2012). Dessa maneira, ao adicionar-se a cal hidratada em grautes, espera-se desempenho semelhante, conferindo retenção de água à mistura e promovendo a manutenção da trabalhabilidade e da resistência desejada.

Assim, aliando os benefícios promovidos pelo uso da cal hidratada ao aproveitamento dos resíduos de bloco de cerâmica vermelha gerados em obras de alvenaria, este estudo buscou avaliar a influência do teor de cal hidratada em grautes produzidos com substituição parcial de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado. Optou-se em substituir 30% do agregado natural pelo reciclado, por ser o melhor valor encontrado no trabalho de Finger e Tutikian (2012). Os teores de cal hidratada que foram adicionados são os de 2%, 4% e 6%, além de produzir um graute referência, sem adição. No estado fresco, foram avaliadas a trabalhabilidade inicial e a manutenção ao longo

do tempo. No estado endurecido, foram avaliadas a velocidade de propagação de onda ultrassônica, a resistência à compressão axial e a absorção de água por capilaridade.

Revisão bibliográfica

Graute

A NBR 15812-1 (ABNT, 2010b) define graute como um componente utilizado para preenchimento de espaços vazios dos blocos, com a finalidade de solidarizar armaduras à alvenaria ou aumentar sua capacidade resistente. Em sua maioria, grautes são autoadensáveis, qualificando uma de suas principais funções, o preenchimento de cavidades e orifícios (BAUER, 2005).

Com base na dimensão máxima dos agregados adotados, o graute pode ser classificado como fino ou grosso. No graute fino a dimensão máxima dos agregados é de 4,8 mm, enquanto no grosso são adotados agregados com dimensão superior a esta. Ainda segundo a norma, a dimensão máxima do agregado do graute deve ser inferior a um terço da menor dimensão dos furos dos blocos a preencher.

Com relação à dosagem, esta pode ser empírica ou experimental, porém a primeira só deve ser adotada em obras de pequeno porte, atentando sempre para a trabalhabilidade do graute e o proporcionamento dos agregados apresentados na Tabela 1. No caso de dosagem experimental, a norma define que deve ser adotado um dos métodos desenvolvidos para concreto convencional.

Observa-se que o teor máximo de cal é estipulado em 4%, porém para estudos empíricos. Em dosagens racionais, outros teores, inclusive superiores, podem ser testados. Parsekian, Hamid e Drysdale (2012) recomendam que a resistência à compressão mínima dos grautes seja de 15 MPa, e a resistência do graute muito superior à resistência do bloco na área líquida não traz benefícios à alvenaria.

Prudêncio Júnior, Oliveira e Bedin (2002) sugerem que o abatimento do graute deve ser de 200 ± 30 mm, sendo de 170 mm a 200 mm para adensamento por apiloamento e de 200 mm a 230

mm para autoadensamento. Porém, para atingir esses valores, pode demandar, em alguns casos, quantidade de água extremamente elevada, a ponto de atingir valores de água/cimento (a/c) de até 0,90. Neste caso, segundo os autores, podem ser geradas misturas muito porosas e com baixa resistência. Entretanto, podem-se utilizar aditivos plastificantes para melhorar a trabalhabilidade sem aumento da relação a/c.

Segundo a NBR 15812-1 (ABNT, 2010b), a resistência à compressão axial é a especificada no projeto, na idade definida pelo projetista, de acordo com as solicitações que o elemento deve resistir. No caso de o graute não atender às exigências de resistência e consistência indicadas, é necessária a comprovação experimental de desempenho satisfatório, principalmente com relação à trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à penetração de água, deformabilidade e durabilidade.

Cal hidratada

Na construção civil, o uso da cal dá-se principalmente na forma hidratada, no preparo de argamassas, no preparo de tintas alcalinas de alta alvura e na construção de estradas, como elemento de estabilização de solos de baixa capacidade de suporte e como aditivo de misturas asfálticas. Quando utilizada em argamassas, em conjunto com a água e os inertes que a encorpam, a cal hidratada forma uma mistura pastosa, que penetra nos poros e reentrâncias dos blocos, promovendo, pela recristalização dos hidróxidos e de suas reações químicas com o anidrido carbônico do ar, a cimentação. Durante o endurecimento da argamassa, as partículas dos hidróxidos aglomeram-se, formando cristais, que aumentam de tamanho e quantidade, à medida que a água evapora, formando uma malha resistente, que retém os agregados (GUIMARÃES, 2002).

Barbhuiya *et al.* (2009) afirmam que o endurecimento da cal hidratada dá-se de forma lenta e através da reação com o dióxido de carbono (CO₂), o que é uma vantagem ambiental em comparação a outros aglomerantes tradicionais, como o cimento Portland e o gesso.

Tabela 1 - Condições mínimas para dosagem não experimental

Tipo de Graute	Traço em massa (kg)				
	Cimento	Cal hidratada	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Água
Fino	1,00	≤ 0,04	≤ 2,30	-	≤ 0,75
Grosso	1,00	≤ 0,04	≤ 2,20	≤ 1,70	≤ 0,70

Agregados reciclados

O reaproveitamento de resíduos em construção vem sendo praticado desde o Império Romano e a Grécia antiga, porém a mais relevante utilização de agregados reciclados deu-se na Alemanha ao fim da Segunda Guerra Mundial, quando 115 milhões de metros cúbicos de resíduos foram reciclados e utilizados na construção de aproximadamente 175 mil unidades habitacionais. A partir dessa época, caracterizou-se o início do desenvolvimento da tecnologia da reciclagem de resíduos de construção e demolição (VIEIRA, 2003).

No uso de agregados naturais em concretos, as características mais importantes a ser estudadas são: granulometria, absorção de água, forma, textura, resistência à compressão, módulo de elasticidade e tipos de substâncias deletérias presentes (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Nos agregados reciclados, essas características devem ser cuidadosamente avaliadas, uma vez que a viabilidade técnica de sua utilização dependerá do conhecimento de seu comportamento na estrutura do concreto (LEITE, 2001). Segundo Werle *et al.* (2010), esses agregados possuem forma mais angulosa, textura superficial rugosa e grande potencial de absorção de água; assim, o concreto produzido com esses agregados apresenta um comportamento diferenciado em relação ao concreto convencional.

Contrariamente aos agregados convencionais, nos agregados reciclados, o estudo da taxa de absorção de água é muito importante, visto que a relação a/c nas misturas é afetada (CARRIJO, 2005). Como existe uma tendência de concretos com agregados reciclados apresentarem perdas de abatimento mais elevadas que concretos convencionais, a avaliação da absorção de água nos momentos iniciais é fundamental. A quantidade de água deve ser suficiente para garantir a trabalhabilidade; no entanto, o excesso deve ser evitado, uma vez que o uso racional de cimento pode ser comprometido (LEITE, 2001). Em função da elevada absorção de água nos agregados reciclados, Lima (1999), Leite (2001), Brito, Ferreira e Correia (2005), Carrijo (2005) e Gomes e Brito (2009) sugerem que seja realizada compensação através da pré-molhagem antes de adicioná-los à mistura, porém não há consenso dos autores com relação ao teor de água a ser adotado e a forma de sua estimativa. A NBR 15116 (ABNT, 2004a) recomenda a utilização de

80% da absorção de água para preparo de concretos sem função estrutural.

A granulometria do material reciclado pode variar conforme o tipo de resíduo bem como em função do britador adotado e de suas regulagens internas. Tratando-se de cerâmica, observa-se que o produto final poderá conter altos teores de miúdos, podendo ocasionar dificuldades no controle da granulometria desejada e ser gerada uma parcela de agregados miúdos que não será utilizada (LIMA, 1999).

Programa experimental

Neste estudo foi realizado um comparativo entre grautes produzidos com substituição em massa, com compensação em volume, de 30% do agregado gráudo natural por agregado reciclado de cerâmica vermelha, incorporando teores de 2%, 4% e 6% de cal hidratada. Aquele percentual de agregados reciclados foi adotado em virtude do desempenho satisfatório obtido no estudo de Finger e Tutikian (2012), no qual foram utilizados os mesmos materiais desta pesquisa. Os teores de cal hidratada foram definidos com base no teor máximo recomendado na literatura, um acima e outro abaixo, além de produzir uma mistura de referência, sem cal. Para cada um desses teores foram moldados 18 corpos de prova cilíndricos com dimensões 100x200 mm. Na fase de produção dos grautes foi realizado ensaio para avaliar a perda de abatimento, e aos 28 dias foram realizados ensaios para avaliar a absorção de água por capilaridade, a velocidade de propagação de onda ultrassônica e a resistência à compressão axial.

Materiais utilizados

Foram utilizados cimento Portland CP IV e cal hidratada do tipo CH-I. A distribuição granulométrica dos agregados naturais foi determinada com base na NBR 7211 (ABNT, 2009a), sendo o resultado apresentado nas Tabelas 2 e 3. O agregado miúdo natural adotado foi areia de origem quartzosa, com dimensão máxima característica igual a 4,8 mm e módulo de finura igual a 2,51 (zona utilizável superior). O agregado gráudo natural utilizado foi brita de origem basáltica, com módulo de finura igual a 5,77 e dimensão máxima característica igual a 12,50 mm.

Tabela 2 - Distribuição granulométrica da areia utilizada

Abertura da peneira	% retido	% retida acumulada
9,5 mm	0	0
6,3 mm	1	1
4,8 mm	1	2
2,4 mm	5	6
1,2 mm	12	19
0,6 mm	22	40
0,3 mm	44	84
0,15 mm	15	100
< 0,15 mm	0	100

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009a).

Tabela 3 - Distribuição granulométrica da brita utilizada

Abertura da peneira	% retido	% retida acumulada
12,5 mm	0	0
9,5 mm	15	15
6,3 mm	34	49
4,8 mm	15	65
2,4 mm	32	97
1,2 mm	3	100
0,6 mm	0	100
0,3 mm	0	100
0,15 mm	0	100
< 0,15 mm	0	100

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009a).

A massa específica da areia utilizada foi determinada com base na NM 52 (ABNT, 2009b), sendo igual a 2,554 kg/dm³. A massa unitária foi determinada utilizando-se o método da NM 45 (ABNT, 2006), tendo sido obtido o valor de 1,596 kg/dm³. Para a brita, a massa específica e a massa unitária foram determinadas com base na NM 53 (ABNT, 2009c), sendo de 2,882 kg/dm³ e de 1,660 kg/dm³ respectivamente. A absorção de água deste agregado também foi determinada com base na NM 53 (ABNT, 2009c), sendo 1,04% a taxa média após 24 h. Para fins de conhecimento do agregado, também foi determinada a taxa média de absorção no primeiro minuto, estabilizando-se em 0,62%.

O agregado graúdo reciclado foi produzido a partir de blocos de cerâmica vermelha, do tipo estrutural, sendo reproduzida a mesma curva granulométrica obtida para o agregado graúdo natural. Inicialmente, a cominuição do agregado reciclado foi realizada mecanicamente, com um britador de mandíbulas, posteriormente sendo utilizados martelos para realizar cominuição manual, visto que o processo mecânico mostrou-se ineficiente na geração de grãos com dimensões 2,4 mm, 4,8 mm e 6,3 mm. A massa específica e a unitária obtidas para o agregado reciclado foram de 2,133 kg/dm³ e

de 1,068 kg/dm³ respectivamente, obtidas através dos mesmos ensaios utilizados para avaliar o agregado natural. A absorção de água deste agregado também foi determinada, sendo 16,46% a taxa média obtida através do ensaio indicado pela NM 53 (ABNT, 2009c) e 14,58% a taxa obtida através do método proposto por Leite (2001), no qual se utiliza uma balança hidrostática para monitorar o ganho de massa dos agregados reciclados ao longo do tempo.

Método de dosagem

A dosagem dos grautes foi realizada com base no método IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 2001). Para o traço intermediário foi adotado o proporcionamento para a confecção de graute grosso, de 1:2,2:1,7. Para o traço rico foi adotada a proporção 1:1,4:1,3, e para o traço pobre, 1:3:2,1. Quanto ao uso do agregado reciclado, foi adotado o percentual de 30%, realizando-se substituição em massa do agregado graúdo natural, com compensação de volume e sem realizar pré-molhagem. A relação a/c não foi definida anteriormente, sendo função do abatimento de

200±30 mm para a confecção de graute grosso. O teor de argamassa utilizado foi de 65%.

Preparação do graute, moldagem dos corpos de prova e ensaios

Para a fabricação dos grautes, utilizou-se uma betoneira de eixo vertical (Figura 1a) com hastes reguláveis. Os materiais foram misturados sempre na mesma ordem, iniciando-se pelos agregados graúdos (natural e reciclado misturados) e adicionando-se quantidade de água suficiente para que eles ficassem encharcados (Figura 1b). A definição da quantidade de água utilizada nesse momento foi realizada visualmente, não sendo realizada pré-molhagem no agregado reciclado antes desse procedimento. Posteriormente, foram adicionados o cimento e a cal hidratada (quando utilizada), seguidos pela areia e quantidade de água suficiente para que o abatimento desejado fosse obtido (Figura 1c).

Durante a fabricação dos grautes, a temperatura ambiente média foi de 29 °C, e a umidade relativa média do ar foi de 48%. O adensamento foi realizado manualmente, em camada única, com o auxílio de uma haste metálica, conforme discriminado na NBR 5738 (ABNT, 2003), para concretos com abatimento maior que 170 mm. Nas primeiras 24 h, os corpos de prova permaneceram à temperatura ambiente, cobertos com placas de vidro, para que a umidade fosse retida durante a cura (Figura 1d). Após, foram desmoldados e acondicionados em uma câmara de cura cuja umidade do ar foi mantida superior a 95%, permanecendo submersos em água até o 28º dia.

Ensaio de perda de abatimento

A perda de abatimento foi monitorada com base na NBR 10342 (ABNT, 2012a). Neste ensaio foram

avaliados somente os grautes do traço intermediário, verificando-se o abatimento através do tronco-cone a cada 15 min, durante 2 h. Entre cada avaliação, os grautes foram remisturados durante 1 min, permanecendo em repouso por 10 min e sendo novamente misturados por 2 min antes da próxima avaliação. Foram moldados 2 corpos de prova de cada graute do traço intermediário na primeira verificação do abatimento e 2 na última, objetivando avaliar a perda de resistência durante a realização do ensaio.

Ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica

Este ensaio foi realizado com base na NBR 8802 (ABNT, 1994). A frequência de vibração da onda longitudinal utilizada foi de 26 kHz, e os transdutores foram posicionados sempre no eixo dos corpos de prova, procurando a uniformidade dos resultados, sendo utilizada vaselina para garantir a boa ligação entre eles. Uma vez que esse ensaio não é destrutivo, os corpos de prova avaliados foram utilizados no ensaio de resistência à compressão axial. Para este ensaio foram utilizados 24 corpos de prova, sendo dois de cada graute produzido. O ensaio ocorreu logo após a retirada das amostras da câmara úmida de cura.

Ensaio de resistência à compressão axial

O ensaio foi realizado aos 28 dias, com base na NBR 5739 (ABNT, 2007), utilizando-se uma prensa eletrônica com capacidade de 2000 kN. A velocidade utilizada foi de 0,45 MPa/s. Neste ensaio foram utilizados 2 corpos de prova de cada um dos grautes fabricados, totalizando 24 unidades.

Figura 1 - Betoneira utilizada



(a) Agregados graúdos umedecidos

(b) Slump test

(c) Cura nas primeiras 24 h

(d)

Ensaio de absorção de água por capilaridade

Este ensaio foi realizado com base na NBR 9779 (ABNT, 2012b). Aos 28 dias, os corpos de prova foram retirados da câmara de cura e inseridos numa estufa, a 105 °C, permanecendo nela até a constância da massa. Após atingir 23±2 °C, os corpos de prova foram inseridos em recipientes com água, sobre suportes vazados, sendo mantido o nível de água constante em 5±1 mm, com relação à face inferior dos mesmos. O ensaio foi realizado em ambiente com temperatura controlada, mantendo-se constante em 22,5 °C. Os corpos de prova permaneceram em contato com a água durante três dias, tendo sido verificado o ganho de massa nos tempos 3, 6, 24, 48 e 72 h. Nessas verificações, o excesso de umidade superficial foi removido com o auxílio de um pano úmido. Após a última verificação da massa, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral. Dessa maneira, foi possível verificar a distribuição de água em seu interior. Neste ensaio, foram utilizados 2 corpos de prova de cada um dos grautes fabricados, totalizando 24 unidades.

Resultados e discussão

Relação água/cimento e abatimento

Na Tabela 4 apresentam-se os resultados do abatimento dos grautes produzidos, bem como as relações a/c determinadas experimentalmente na mistura dos materiais. A relação a/c dos grautes produzidos neste estudo foi alta, com a maior demanda de água sendo verificada no graute com traço pobre, sendo crescente o consumo de água à medida que maiores teores de cal hidratada foram adotados. Todos os grautes atenderam à especificação inicial de 200±30 mm.

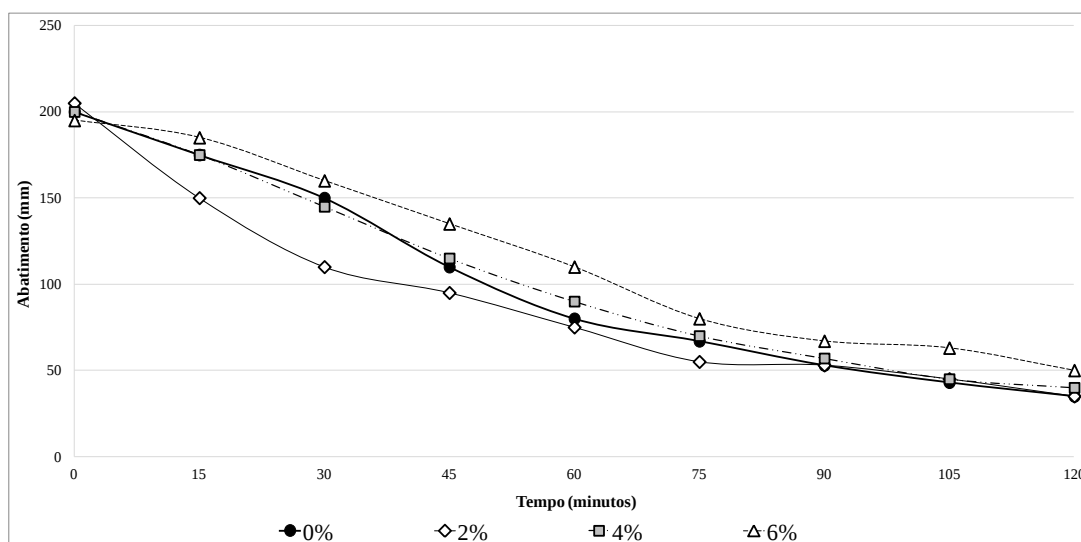
Perda de abatimento

Na Figura 2 apresentam-se as curvas de comportamento dos grautes do traço intermediário com teores de cal hidratada de 0%, 2%, 4% e 6%, possibilitando visualizar a perda de abatimento verificada no período de 2 h. Para o início do ensaio, a trabalhabilidade de todos os grautes foi fixada em 200±30 mm.

Tabela 4 - Relação a/c e abatimento inicial para os grautes produzidos

Itens avaliados	Pobre				Intermediário				Rico			
	0%	2%	4%	6%	0%	2%	4%	6%	0%	2%	4%	6%
Abatimento (mm)	195	175	195	210	200	200	195	185	190	185	195	185
Relação a/c	0,90	0,92	0,92	0,96	0,68	0,69	0,70	0,70	0,57	0,56	0,59	0,59

Figura 2 - Perda de abatimento ao longo de 2 h para o traço intermediário



O graute com melhor desempenho foi o com teor de 6% de cal hidratada, para o traço intermediário, variando 145 mm após 2 h, chegando a 55 mm o abatimento. Os grautes com teores de 2% e 4% apresentaram comportamento idêntico, quando analisada a perda final de abatimento, com o valor final de 40 mm, variando 160 mm, enquanto o graute sem cal hidratada apresentou o pior desempenho, variando 165 mm e apresentando abatimento de 35 mm após os 120 min. Ainda se observou que os grautes sem cal e com 2% de cal apresentaram redução inicial elevada. No graute com 6% de cal hidratada, a perda foi gradual, suavizando a curva, certamente em função da retenção de água proporcionada pela cal.

Com relação à perda de resistência durante o ensaio, verificou-se que a cal hidratada contribuiu de forma positiva, uma vez que todos os traços com adição apresentaram menor variação, inclusive atingindo resistências superiores às do graute sem cal hidratada (Tabela 5).

Velocidade de propagação de onda ultrassônica

O comparativo entre os resultados obtidos para os grautes com e sem adição de cal hidratada (Tabela 6) demonstra que em todos os traços com teor de 4% foi verificada elevação da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, contudo a variação observada foi extremamente sutil. No traço pobre, o teor de 2% de cal hidratada também colaborou com o aumento da velocidade de propagação das ondas de ultrassom, sendo o acréscimo de aproximadamente 1%.

Observa-se que a adição de cal não retarda a propagação das ondas ultrassônicas na maioria dos traços. Apenas houve um decréscimo com o teor de 6% menor do que 1%, assim como nos traços intermediário e rico com 2% de cal, nestes casos menor que 0,5%.

Resistência à compressão axial

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial. Avaliando o efeito da adição da cal hidratada na resistência dos grautes produzidos, observa-se que os traços pobre e rico, exceto com o uso do teor 6% de cal hidratada, apresentaram melhor desempenho, obtendo resistências de 5% a 12% maiores do que a do graute sem adição. Por outro lado, o traço intermediário perdeu resistência na adoção dos três teores de cal hidratada.

Resistência à compressão axial

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial. Avaliando o efeito da adição da cal hidratada na resistência dos grautes produzidos, observa-se que os traços pobre e rico, exceto com o uso do teor 6% de cal hidratada, apresentaram melhor desempenho, obtendo resistências de 5% a 12% maiores do que a do graute sem adição. Por outro lado, o traço intermediário perdeu resistência na adoção dos três teores de cal hidratada.

Todos os grautes atingiram ao menos 15 MPa, resistência que dificilmente é ultrapassada na grande maioria das aplicações.

Absorção de água por capilaridade

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos no ensaio de absorção por capilaridade. Verificou-se que no traço pobre foram obtidas as maiores taxas de absorção, para todos os teores de cal hidratada adotados. Porém, essas taxas de absorção foram inferiores à do graute sem adição. No traço pobre, ambos os grautes apresentam comportamento similar durante o ensaio, absorvendo em média 31% da água nas primeiras 3 h, 41% em 6 h, 75% em 24 h e 93% em 48 h.

Tabela 5 - Perda de resistência ao final do ensaio de perda de abatimento para o traço intermediário

Teor de cal hidratada	Resistência inicial (MPa)	Resistência final, após 120 min (MPa)	Redução (%)
0%	22,40	18,30	18,31
2%	24,00	22,90	4,58
4%	24,20	21,60	10,74
6%	26,60	24,40	8,27

Tabela 4 - Relação a/c e abatimento inicial para os grautes produzidos

Itens avaliados	Pobre				Intermediário				Rico			
	0%	2%	4%	6%	0%	2%	4%	6%	0%	2%	4%	6%
Abatimento (mm)	195	175	195	210	200	200	195	185	190	185	195	185
Relação a/c	0,90	0,92	0,92	0,96	0,68	0,69	0,70	0,70	0,57	0,56	0,59	0,59

Figura 3 - Resistência à compressão aos 28 dias obtida no ensaio de compressão axial

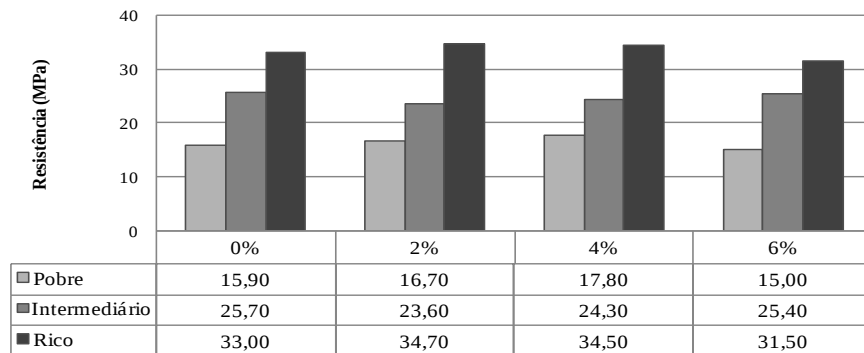
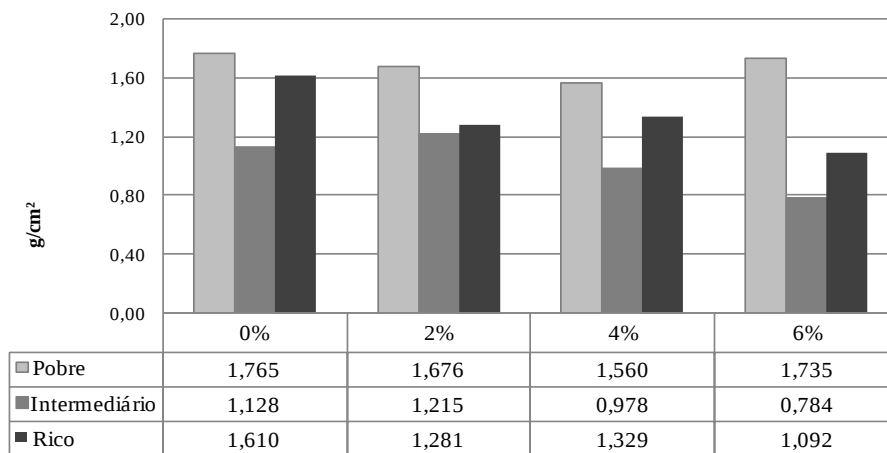


Figura 4 - Absorção por capilaridade



No traço intermediário, foram obtidas as menores taxas de absorção de água. Observa-se que somente no graute com teor de 2% foi verificada absorção superior à do graute sem cal hidratada. No intervalo de 3 h, os corpos de prova absorveram em média 51% da água; em 6 h, pouco mais de 62%; em 24 h, praticamente 90%; e em 48 h, quase 100% da água já havia sido absorvida. Dessa maneira, observa-se que neste traço a absorção ocorreu de forma mais rápida, comparada com a verificada no traço pobre. Já no traço rico, todos os teores de cal hidratada contribuíram para a redução da absorção. Em 3 h, a absorção média foi de 40%; em 6 h, 50%; em 24 h, 82%; e em 48 h, 98%.

Ao final do ensaio, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral, sendo possível analisar a distribuição da água em seu interior. A Figura 5 apresenta a mancha de água verificada no traço intermediário, onde se pode observar a percolação da água em direção à face superior do corpo de prova. No graute sem cal hidratada, a água chegou a atingir a face superior.

Sem dúvida, a incorporação de cal nos grautes reduziu a absorção por capilaridade para os

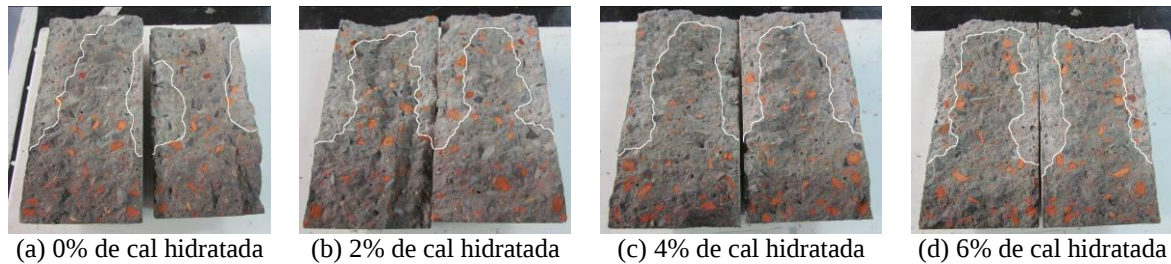
materiais estudados, sendo uma vantagem considerável em aplicações convencionais.

Desempenho geral dos grautes

O Quadro 1 demonstra o desempenho geral dos grautes produzidos neste estudo. Mediante os dados, observa-se que os grautes com teor de 6% de cal hidratada foram os que apresentaram o menor desempenho, apresentando resultados superiores em apenas três dos nove ensaios realizados. Contrariamente, os grautes com teor de 4% apresentaram o melhor desempenho, obtendo-se resultados acima dos observados nos grautes sem cal hidratada em 8 dos 9 ensaios realizados. Observa-se, ainda, que neste percentual de cal hidratada os traços pobres e ricos apresentaram melhores resultados, sendo verificado êxito em todos os ensaios.

Analisando o Quadro 1, percebe-se que a adição de cal hidratada foi vantajosa tecnicamente para os grautes deste estudo, sendo o melhor percentual o de 4%. Porém, mesmo nos outros percentuais, a melhora é perceptível.

Figura 5 - Distribuição da água nos grautes do traço intermediário



Quadro 1 - Comparativo entre o desempenho dos grautes com e sem adição de cal hidratada

Teores de cal hidratada	Pobre			Intermediário			Rico			Percentual de melhoria de desempenho
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
2%	●	●	●	○	○	○	○	●	●	56%
4%	●	●	●	●	○	●	●	●	●	89%
6%	○	○	●	○	○	●	○	○	●	33%

Nota: Legenda:

- Resultado superior ao obtido no graute sem cal hidratada;
- Resultado inferior ao obtido no graute sem cal hidratada;
- 1: ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica;
- 2: ensaio de compressão axial; e
- 3: ensaio de absorção de água por capilaridade.

Diagramas de dosagem

Na Figura 6 são apresentados os diagramas de dosagem elaborados com base nos resultados obtidos para os grautes produzidos neste estudo. Nesses diagramas são correlacionados a resistência à compressão aos 28 dias, a relação a/c, o proporcionamento 1:m do traço e o consumo de cimento.

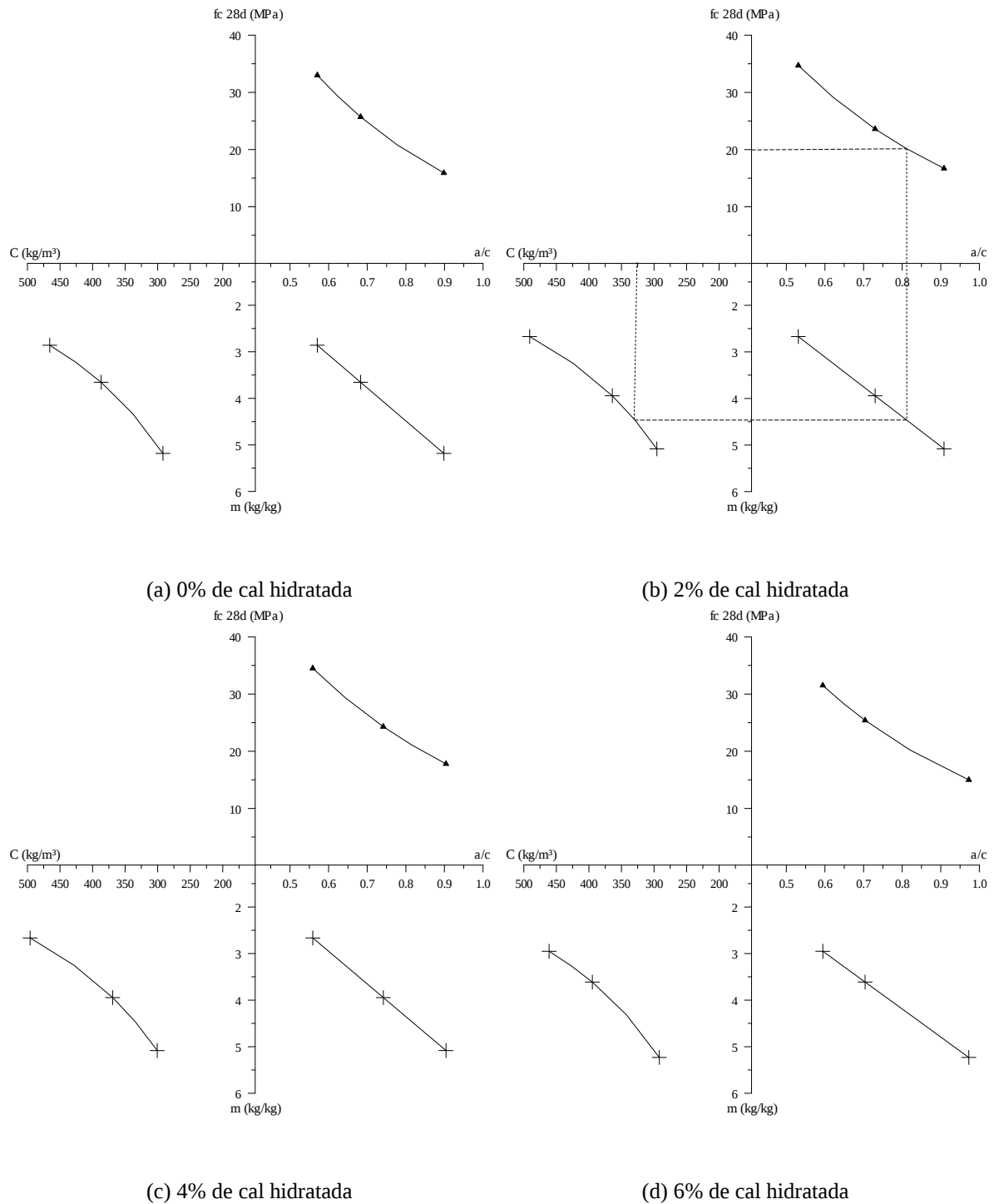
A partir desses diagramas, é possível obter-se a dosagem de grautes com resistências à compressão variadas, de acordo com a necessidade específica. Para obter um graute com resistência de 20 MPa utilizando-se o teor de 2% de cal hidratada, por exemplo, a relação a/c seria de aproximadamente 0,81; o proporcionamento, 1:4,5, e o consumo de cimento, 325 kg/m³ (Figura 6b). Para a utilização dos demais teores de cal hidratada, o mesmo procedimento, nos respectivos diagramas, fornece os dados desejados.

Conclusões

Diante dos dados obtidos no ensaio de perda de abatimento, conclui-se que a retenção de água da cal hidratada influenciou positivamente os traços avaliados, uma vez que todos os grautes com adição de cal hidratada apresentaram resultados superiores ao sem adição. Além disso, observou-se que o uso da cal hidratada contribuiu de maneira satisfatória na manutenção da resistência no período de 2 h, uma vez que a perda de resistência verificada nos grautes com adição de cal hidratada foi inferior à dos grautes sem adição.

Avaliando o comportamento geral dos grautes, observa-se que o teor de 4% trouxe mais benefícios, sendo os melhores resultados verificados nos traços pobres e ricos. Uma vez que o teor de 2% de cal hidratada apresentou desempenho superior ao teor de 6%, conclui-se que o teor máximo de cal hidratada de 4% para grautes convencionais também é o mais indicado para grautes que utilizam substituição de 30% do agregado natural por agregado graúdo cerâmico reciclado.

Figura 6 - Diagramas de dosagem para grautes



Nota: as linhas pontilhadas representam o procedimento adotado para realizar a dosagem de um graute com resistência de 20 MPa.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Resíduos Sólidos Urbanos. **Revista Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, São Paulo, p. 30-34, 2010a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto : procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto: ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concretos: especificação. Rio de Janeiro, 2009a. 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: concreto endurecido: determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: argamassa e concreto endurecido: determinação da absorção da água por capilaridade: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012b. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10342**: concreto: perda de abatimento: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012a. 2 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116**: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2004a. 12 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15812-1**: alvenaria estrutural: blocos cerâmicos: parte 1: projetos. Rio de Janeiro, 2010b. 41 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 52**: agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009b. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 53**: agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009c. 8 p.
- BARBHUIYA, S. A. *et al.* Properties of Fly Ash Concrete Modified With Hydrated Lime and Silica Fume. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 10, p. 3233-3239, out. 2009.
- BAUER, E. **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Ibracon, 2005. v. 2.
- BRITO, J. de; PEREIRA, A. S.; CORREIA, J. R. Mechanical Behaviour of Non-Structural Concrete Made With Recycled Ceramic Aggregates. **Cement & Concrete Composites**, v. 27, n. 4, p. 429-433, 2005.
- CABRAL, A. E. B. *et al.* Mechanical Properties Modeling of Recycled Aggregate Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 4, p. 421-430, abr. 2010.
- CARRIJO, P. M. **Análise da Influência da Massa Específica de Agregados Graúdos Provenientes de Resíduos de Construção e Demolição no Desempenho Mecânico do Concreto**. 146 f. São Paulo, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- CECCONELLO, V.; TUTIKIAN, B. A influência das Baixas Temperaturas na Evolução das Resistências do Concreto. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 5, n. 1, p. 68-83, jan. 2012.
- FINGER, F.; TUTIKIAN, B. Graute Para Alvenaria Estrutural: descrição, análise e proposta de melhorias para o processo de uma empresa construtora. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53., Salvador, 2012. **Anais...** Salvador: Ibracon, 2012.
- GOMES, M.; BRITO, J. de. Structural Concrete With Incorporation of Coarse Recycled Concrete and Ceramic Aggregates: durability performance. **Materials and Structures**, v. 42, n. 5, p. 663-675, jun. 2009.
- GUIMARÃES, J. E. P. **A cal**: fundamentos e aplicações na Engenharia Civil. São Paulo: Pini, 2002.
- HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: Pini, 2001.
- INCE, C. *et al.* Factors Affecting the Water Retaining Characteristics of Lime and Cement Mortars in the Freshly-Mixed State. **Materials and Structures**, v. 44, n. 2, p. 509-516, 2011.

LEITE, M. B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos Com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição**. 290 f. Porto Alegre, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LIMA, J. A. R. **Proposição de Diretrizes Para Produção e Normalização de Resíduo de Construção Reciclado e de Suas Aplicações em Argamassas e Concretos**. 240 f. São Carlos, 1999. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estruturas, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 2008.

PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. **Comportamento e Dimensionamento de Alvenaria Estrutural**. São Carlos: EdUFSCar, 2012.

PRUDÊNCIO JÚNIOR, L. R.; OLIVEIRA, A. L. de; BEDIN, C. A. **Alvenaria Estrutural de Blocos de Concreto**. Florianópolis: Pallotti, 2002.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural**. São Paulo: Pini, 2003.

RICHTER, C. **Qualidade aa Alvenaria Estrutural em Habitações de Baixa Renda: uma análise da confiabilidade e da conformidade**. 180 f. Porto Alegre, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

VIEIRA, G. L. **Estudo do Processo de Corrosão Sob a Ação de Íon Cloreto em Concretos Obtidos a Partir de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição**. 151 f. Porto Alegre, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

WERLE, A. P. *et al.* Análise de Metodologias Utilizadas Para a Caracterização da Absorção de Água de Concreto Reciclado Como Agregado. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13., Canela, 2010. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2010. v. 1, p. 1-11.

Sandra Elisa Gieseler

Especialista em Construção Civil | Universidade do Vale do Rio dos Sinos | Av. Unisinos, 950 | São Leopoldo - RS - Brasil | CEP 90510-030 | Tel.: (51) 3591-1122 | E-mail: sandraeg@gmail.com

Bernardo Fonseca Tutikian

ITT Performance | Universidade do Vale do Rio dos Sinos | Av. Unisinos, 950 | São Leopoldo - RS - Brasil | CEP 90510-030 | Tel.: (51) 3591-1122 | E-mail: btutikian@terra.com.br

Revista Ambiente Construído
Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro
Porto Alegre - RS - Brasil
CEP 90035-190
Telefone: +55 (51) 3308-4084
Fax: +55 (51) 3308-4054
www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido
E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br