

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
SISTEMA DE BIBLIOTECAS DA UNICAMP
REPOSITÓRIO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA E INTELECTUAL DA UNICAMP

Versão do arquivo anexado / Version of attached file:

Versão do Editor / Published Version

Mais informações no site da editora / Further information on publisher's website:

https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212018000400361

DOI: 10.1590/s1678-86212018000400310

Direitos autorais / Publisher's copyright statement:

©2018 by Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (A N T A C). All rights reserved.

DIRETORIA DE TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO

Cidade Universitária Zeferino Vaz Barão Geraldo

CEP 13083-970 – Campinas SP

Fone: (19) 3521-6493

<http://www.repositorio.unicamp.br>

Estudo da tensão de aderência entre barras de aço e concretos com agregados de resíduos de cerâmica vermelha

Study of bond stress between steel bars and red ceramic waste aggregate concretes

Luciano Passos
Armando Lopes Moreno Junior

Resumo

Emprego de materiais alternativos na produção do concreto pode ser uma das soluções viáveis para a sustentabilidade na indústria da construção civil. Faz-se necessário, portanto, o estudo das propriedades mecânicas dessa nova mistura de concreto, produzida com esses materiais. Este trabalho avalia a tensão de aderência entre barras de aço e concretos produzidos com agregados provenientes de resíduos de cerâmica vermelha visando o emprego dessa mistura alternativa na produção de elementos estruturais em concreto armado. Para tanto, foram produzidas quatro misturas de concreto: uma de referência, sem nenhuma substituição, e outras três misturas com substituição gradual do agregado graúdo por um agregado de resíduos de cerâmica vermelha (20%, 40% e 100% de substituição, em volume). Doze vigas, três para cada mistura de concreto em estudo, foram executadas e avaliadas em laboratório segundo o método de ensaio preconizado pela RILEM-CEB-FIP (1983). Os resultados obtidos, com relação à tensão de aderência entre barra de aço e concreto, indicaram a viabilidade de emprego do resíduo de cerâmica vermelha como substituição de parte do agregado graúdo na produção de concretos para fins estruturais.

Palavras-chave: Resíduo cerâmico. Concreto. Aderência.

Abstract

The use of alternative materials in the production of concrete can be one of the viable solutions for sustainability in the construction industry. It is therefore necessary to study the mechanical properties of the new concrete mixture, produced with those materials. This study evaluates the bond strength between steel bars and concretes produced with aggregates from red ceramic waste, aiming to use this alternative mixture in the production of reinforced concrete structural elements. For this purpose, four concrete mixtures were produced; one reference, without any replacement, and three other mixtures with gradual replacement of the coarse aggregate by a red ceramic waste aggregate (20%, 40% and 100% replacement, by volume). Twelve beams, three for each studied concrete mixture, were made and evaluated in the laboratory according to the testing method recommended by RILEM-CEB-FIP (1983). The results obtained, regarding the bond strength between steel bar and concrete, indicated the viability of using red ceramic waste as a replacement for part of the coarse aggregate in the production of concrete for structural purposes.

Keywords: Ceramic waste. Concrete. Adhesion.

¹Luciano Passos

¹Universidade Estadual de Campinas
Campinas - SP - Brasil

²Armando Lopes Moreno Junior

²Universidade Estadual de Campinas
Campinas - SP - Brasil

Recebido em 06/11/17

Aceito em 23/02/18

Tensão de aderência entre o concreto com resíduo cerâmico e a barra de aço no concreto armado

A sempre crescente expansão imobiliária pode causar inúmeros transtornos sociais e ao meio ambiente, com destaque para a geração de enorme quantidade de resíduos, descartados, muitas vezes, em locais inapropriados, comprometendo áreas de preservação ambiental e de mananciais. Vale observar que grande parte desses resíduos pode ser reaproveitada. Segundo Campos e Paulon (2015), a indústria cerâmica, que engloba desde o tijolo cerâmico, passando pelos revestimentos e louças sanitárias, e atinge os isoladores elétricos de porcelana, possui um elevado índice de descarte de material durante o processo de fabricação, transporte e eventual substituição. É premente, nesse caso, o estudo de formas de reuso desse material, sendo uma delas o emprego desse resíduo cerâmico como agregado graúdo na produção de concretos para fins estruturais. Nesse caso, logicamente, os elementos estruturais fabricados com essas misturas de concreto alternativas devem atender parâmetros necessários de projeto que visam, sobretudo, a segurança das edificações.

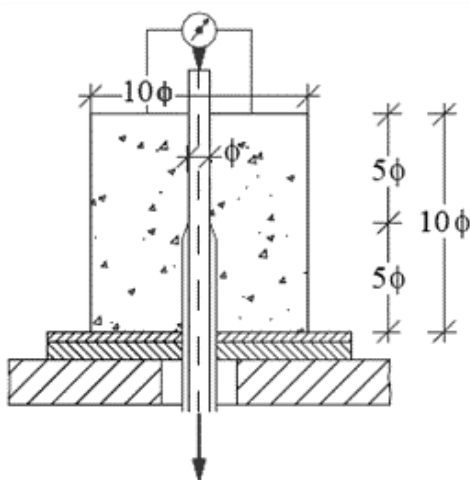
No caso da tensão de aderência entre concreto e barra de aço, poucos são os estudos divulgados na literatura que abordam a avaliação desse parâmetro

para o caso de concretos produzidos com agregados graúdos provenientes de resíduos da indústria cerâmica. A seguir alguns desse trabalhos são relacionados.

Oliveira e Assis (2006) avaliaram o mecanismo da aderência entre aço e concretos produzidos com substituição parcial de agregado natural por agregado de resíduo cerâmico reciclado. Neste estudo avaliou-se o decréscimo na resistência à compressão e na tensão de aderência de concretos produzidos com 0% (REC0), 20% (REC20), 40% (REC40) e 100% (REC100) de substituição do agregado natural por agregado reciclado. Os ensaios de aderência foram feitos segundo o método de arrancamento direto (*"pull out test"*), por ser um ensaio relativamente simples e de baixo custo, preconizado pelo RILEM-CEB-FIP (1978). A Figura 1 detalha o modelo de ensaio de arrancamento.

Os concretos foram dosados para que as resistências características à compressão atinssem o mínimo de 25 MPa. Os resultados obtidos por Oliveira e Assis (2006) estão apresentados na Tabela 1.

Figura 1 - Detalhe do corpo de prova para ensaio de aderência



Fonte: adaptado de RILEM - CEB - FIP (1978).

Tabela 1 - Resultados de ensaios de aderência

Concreto	REC0	REC20	REC40	REC100
Teor de Agregado Reciclado(%)	0	20	40	100
σ_c (MPa)	$34,8 \pm 1,4$	$38,2 \pm 2,6$	$34,0 \pm 2,8$	$24,4 \pm 2,2$
τ_{bm} (MPa)	$8,2 \pm 1,1$	$10,6 \pm 2,5$	$8,1 \pm 3,1$	$4,3 \pm 1,6$

Fonte: adaptado de Oliveira e Assis (2006).

Nota: σ_c é a tensão média de resistência à compressão simples do concreto; τ_{bm} é a tensão média de aderência entre aço e concreto.

As tensões de aderência diminuíram, progressivamente, com o aumento do teor de substituição de agregados. Oliveira e Assis (2006) atribuiu essa redução ao fato de os agregados reciclados produzirem substâncias expansivas durante a hidratação (o que deixa o concreto mais compacto) com baixa resistência à tração, o que prejudicou, assim, a aderência. Ao final do trabalho, Oliveira e Assis (2006) sugere a viabilidade de produção de concretos estruturais com substituições de até 20% do agregado gráúdo natural por agregado de resíduo cerâmico.

Xiao e Falkner (2007) avaliaram a tensão de aderência entre barras de aço e concreto produzido com agregados provenientes de concreto reciclado. Trinta e seis ensaios de aderência foram executados segundo o método de arrancamento direto, “*pull out test*”, preconizado pelo RILEM-CEB-FIP (1978). Foram empregadas três misturas de concreto, sendo a primeira de referência e as outras duas com 50% e 100% de substituição, em massa, do agregado gráúdo natural por agregado de concreto reciclado. Esses autores observaram um padrão similar de evolução do escorregamento das barras, com o incremento da força de arrancamento, para todas as misturas de concreto avaliadas; com a tensão de aderência para os concretos com 50% e 100% de substituição caindo 6% e 12 %, respectivamente, em relação ao concreto de referência. Para uma mesma resistência à compressão, concretos produzidos com agregados reciclados tiveram um comportamento melhor em relação à tensão de aderência do que os concretos produzidos com agregado natural. Ao final, os autores concluem que o comprimento de ancoragem para as barras de aço em concretos produzidos com agregados reciclados pode ser o mesmo indicado para os concretos convencionais.

Kim e Yum (2013) investigaram o comportamento de aderência entre barra de aço deformada e concreto com agregado reciclado proveniente de demolição. Foram utilizados dois diâmetros máximos de agregados gráúdos, 20mm e 25mm, e três porcentagens de substituição do agregado natural pelo reciclado (30%, 40% e 100%). Os ensaios de aderência foram executados de acordo com o disposto na ASTM C234 (AMERICAN..., 1991), “*pull out test*”, com barra de aço de diâmetro de 16mm. Como resultado, os autores mencionam a redução da resistência à compressão do concreto em função do incremento da substituição do agregado natural, para ambos os tamanhos de agregado avaliados. Da mesma forma, os autores evidenciam a pequena alteração na tensão de aderência para todas as amostras avaliadas nos ensaios.

Baena *et al.* (2016) estudaram a tensão de aderência entre concreto produzido com agregado de resíduo de construção e barra de fibra de vidro. Ao todo foram avaliadas três resistências de concreto (20MPa, 30MPa e 50 MPa), dois tipos de barras poliméricas reforçadas com fibra de vidro (uma com nervuras helicoidais e outra revestida com adesivo polimérico e areia) e, finalmente, dois tipos de agregado gráúdo (um natural e outro de resíduo de construção e demolição na proporção de 20%, 50% e 100% de substituição do agregado gráúdo natural). O resíduo predominante era de concreto, com pequena porcentagem de material cerâmico. Os ensaios foram realizados segundo o estipulado pelo método do ACI 440 3R-04 (AMERICAN..., 2004) “*pull out test*”, similar ao preconizado pelo RILEM-CEB-FIP (1978).

Os resultados obtidos evidenciaram a diminuição da tensão de aderência com o decréscimo da resistência à compressão do concreto. Para o concreto de resistência de 20 MPa, tanto o tipo de barra quanto o tipo de agregado não tiveram influência significativa nos valores obtidos quanto à tensão de aderência entre barra de fibra de vidro e concreto.

Yang, Deng e Inghan (2016) fizeram um estudo da aderência entre o concreto com agregado reciclado de construção e demolição e o aço. Os parâmetros envolvidos nesse estudo foram a porcentagem de substituição do agregado gráúdo natural pelo reciclado (50% e 100%) e a corrosão do aço de maneira a se obter uma abertura de fissura de 0,1mm, 0,3mm e 0,6mm. Doze vigas foram moldadas, de acordo com o padrão ASTM A944-10 (AMERICAN..., 2010), similar ao padrão RILEM-CEB-FIP (1983). Como resultado, os autores evidenciam a diminuição das resistências médias de aderência em função do aumento do teor de substituição do agregado natural pelo reciclado e, também, o aumento das tensões de aderência, para todas as vigas, até o nível de fissuração com abertura de 0,3mm; com tendência de queda dessa tensão de aderência para níveis maiores de fissuração. Ressaltam que a substituição do agregado natural pelo reciclado teve pouco efeito nos valores obtidos para a tensão de aderência.

Siempu e Pancharathi (2017) avaliaram o desempenho mecânico e a tensão de aderência entre aço e concretos com substituição total do agregado miúdo e gráúdo natural por agregados provenientes de resíduo de construção e demolição. Os parâmetros envolvidos nesse estudo foram a relação água e cimento, o diâmetro da barra de aço e o comprimento de ancoragem da barra. Os ensaios de aderência, “*pull out test*”, foram feitos de acordo com recomendação da IS 2770, Part I (BUREAU, 2007). Comparando os

resultados em função do tipo de agregado (natural ou reciclado), os autores concluem que o decréscimo de resistência mecânica observado para as misturas de concreto com agregados reciclados não foi suficiente para alterações significativas na tensão de aderência. Ao final, os autores apresentam uma proposta para estimar a tensão de aderência entre aço e concreto executado com agregados reciclados.

Apresentados esses estudos, observa-se que ainda muito deve ser feito para avaliar o comportamento da aderência entre concreto produzido com agregado proveniente de resíduo cerâmico e barra de aço, principalmente em relação a ensaios de viga, uma vez que a maioria desses estudos foi feita com base em ensaios de arrancamento “*pull out test*”. Nesse sentido, o estudo ora proposto pretende empregar a metodologia preconizada na RILEM – CEB – FIP (1983), que avalia a tensão de aderência entre barra de aço e concreto com base em ensaio de vigas fletidas, na avaliação da viabilidade de emprego de agregados reciclados de material cerâmico na produção de concretos para fins estruturais.

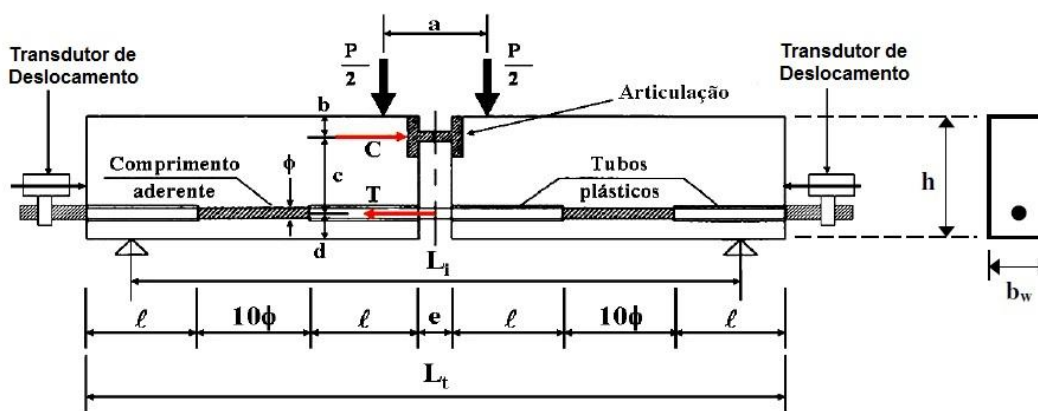
Ensaio RILEM - CEB - FIP (1983)

A RILEM – CEB – FIP (1983) preconiza um ensaio de viga para avaliar a tensão de aderência entre uma barra de aço e o concreto circundante, denominado “*beam test*”, que apresenta a esquematização mostrada na Figura 2.

Para esse ensaio, emprega-se um modelo de viga, composta por dois blocos de concreto armado interconectados na parte inferior pela barra cuja aderência se quer determinar e, na parte superior, por uma articulação de aço. A viga, assim executada, deve ser ensaiada à flexão e solicitada por duas cargas concentradas, P , idênticas e posicionadas simetricamente em relação à seção do meio do vão. As dimensões padronizadas pelo citado método de ensaio podem ser observadas na Tabela 2.

Onde: L_t é o comprimento total da viga, L_i é a distância entre apoios, h é a altura da seção transversal da viga, b_w é a largura da viga e ϕ é o diâmetro da barra de aço em avaliação.

Figura 2 - Ensaio de viga



Fonte: adaptado de RILEM - CEB - FIP (1983).

Tabela 2 - Características geométricas dos modelos

Dimensões (cm)	Tipo A $\phi < 16\text{mm}$	Tipo B $\phi \geq 16\text{mm}$	Dimensões (cm)	Tipo A $\phi < 16\text{mm}$	Tipo B $\phi \geq 16\text{mm}$
L_t	80,0	126,0	a	15,0	20,0
L_i	65,0	110,0	b	3,0	4,0
h	18,0	24,0	c	10,0	15,0
b_w	10,0	15,0	d	5,0	5,0
$2l + 10\phi$	37,5	60,0	e	5,0	6,0

Fonte: RILEM - CEB - FIP (1983).

Durante a realização do ensaio, foi aplicado um carregamento com uma velocidade constante de deslocamento de 0,3 mm por minuto e, a cada nível da carga concentrada aplicada, pode ser obtida a respectiva tensão de tração, σ_s , na barra de aço. Para o caso de barras com diâmetros, ϕ , menores que 16 mm, a citada tensão pode ser expressa como Eq. 1:

$$\sigma_s = \frac{1,25P}{A_s} \text{ (MPa)} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde A_s é a área da seção transversal da barra (mm^2) e P a carga concentrada aplicada (N).

Sendo o comprimento aderente da barra definido por $\ell_a = 10\phi$, a correspondente tensão de aderência (τ_b), para cada estágio de carga aplicada à viga, pode então ser obtida por meio da Equação 2:

$$\tau_b = \frac{\sigma_s}{40} \text{ (MPa)} \quad \text{Eq. 2}$$

A resistência média de aderência (τ_{bm}) deve ser determinada, de acordo a RILEM – CEB – FIP (1983), pela média dos valores das tensões de aderência $\tau_{0,01}$, $\tau_{0,1}$ e $\tau_{1,0}$, correspondentes, respectivamente, a deslocamentos relativos da barra de aço de 0,01mm, 0,1mm e 1,0mm.

Caso o deslizamento máximo relativo da barra de aço, ao final do ensaio da viga, seja inferior a 1,0 mm, deve-se adotar para o valor de $\tau_{1,0}$, para o cálculo da resistência média de aderência, esse valor máximo de deslizamento relativo obtido. Ainda, de acordo com a RILEM – CEB – FIP (1983), como critério de aceitação, a resistência média de aderência do concreto e barra de aço, em análise, deve respeitar o limite mínimo estabelecido pela Equação 3:

$$\tau_{bm} \geq 8,0 - 0,12 \phi \text{ (MPa)} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde ϕ é o diâmetro da barra (mm).

Resistência de aderência: normatização

Várias são as expressões normatizadas para a resistência de aderência. Essas expressões, muitas vezes, tentam correlacionar essa resistência de aderência à resistência à tração ou à compressão do concreto. Muitas dessas expressões têm como premissa a obtenção de tensões de aderência via ensaios normatizados em laboratório, como o de ensaio de viga preconizado pela RILEM – CEB – FIP (1983) e o de arrancamento “pull out test” preconizado pela RILEM-CEB-FIP (1978).

Apresenta-se a seguir algumas dessas expressões, com a respectiva referência normativa indicada.

O CEB – FIP – MC (FEDERATION..., 2012) preconiza a tensão de aderência por arrancamento ou por fendilhamento, de acordo, respectivamente, com as Equações 4 e 5.

$$\tau_u = 2,5\sqrt{f_c} \text{ (MPa)} \quad \text{Eq. 4}$$

$$\tau_u = 7,0\left(\frac{f_c}{20}\right)^{0,25} \text{ (MPa)} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde f_c é a resistência à compressão do concreto (MPa).

Na última versão da NBR 6118 (ABNT, 2014), o cálculo da tensão de aderência (f_{bd}) é sugerido pela Equação 6.

$$f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde, para barras nervuradas, $\eta_1 = 2,25$; em situação de boa aderência $\eta_2 = 1,00$ e, para diâmetros da barra de aço menores do que 32 mm, η_3 pode ser tomado como 1 e f_{ctd} é a resistência à tração média do concreto obtida experimentalmente.

Na Europa, o código EUROCODE 2 (EUROPEAN..., 2004) preconiza a tensão de aderência para barras de alta aderência e $\phi \leq 32$ mm segundo a Equação 7:

$$f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde, também para barras nervuradas, $\eta_1 = 2,25$; em situação de boa aderência $\eta_2 = 1,00$ e f_{ctd} é a resistência à tração média do concreto obtida experimentalmente.

Vale observar que essas expressões apresentadas, para a determinação da resistência de aderência, são aplicáveis a misturas de concreto com resistência característica à compressão de até 50 MPa e executadas com agregados naturais. No caso de agregados provenientes de resíduos de cerâmica vermelha ou de resíduos de construção e de demolição, expressões similares são bastante escassas.

Recentemente, Siempu e Pancharthy (2017), com base em resultados de ensaios de arrancamento, o “pull out test”, propuseram uma equação para estimar a resistência de aderência do concreto ao aço, quando se faz a substituição total de agregados naturais por reciclados (Equação 8).

$$\tau_{max} = \left[K_1 \left(\frac{\theta}{l} \right) + K_2 \left(\frac{C}{\theta} \right) + K_3 \right] \sqrt{f_c} \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

$K_1 = 6,32$ para agregado natural e 6,38 para agregado reciclado;

$K_2 = 0,26$ para agregado natural e $0,44$ para agregado reciclado;

$K_3 = 0,21$ para agregado natural e $0,50$ para agregado reciclado;

θ = diâmetro da barra (mm);

l = comprimento aderente (mm);

f_c = Resistência à compressão do concreto; e

C = cobrimento médio de concreto sobre a barra de aço (mm).

Expressões para a determinação da resistência de aderência do aço e concretos produzidos com agregados provenientes de resíduos de cerâmica vermelha, via ensaio de viga segundo o padrão RILEM – CEB – FIP (1983), não foram encontradas na literatura por estes autores.

Materiais e programa experimental

Nesta pesquisa foi avaliada a aderência entre barra de aço e concreto de acordo com o padrão RILEM – CEB – FIP (1983). O diâmetro da barra de aço empregado foi fixado em 12,5mm e variou-se a mistura de concreto, executada com agregado natural (REF) e com substituições de 20%, 40% e 100% (S20, S40, S100) desse agregado natural por agregado proveniente de resíduo cerâmico reciclado.

Para cada mistura de concreto avaliada foram executadas 3 vigas, em um total de 12 vigas ao final do trabalho.

Execução das armaduras

A armadura construtiva, exigida para o ensaio RILEM – CEB – FIP (1983), foi executada. Detalhes dessa armadura podem ser observados na Figura 3.

Para a armadura principal, em avaliação quanto à aderência ao concreto, foram empregadas barras longitudinais com 12,5mm de diâmetro. A preparação dessas barras longitudinais consistiu em corte no tamanho adequado, execução de roscas em suas extremidades (para instalação, durante o ensaio, dos transdutores de deslocamentos) e devido isolamento dos trechos de interrupção de aderência exigidos (tubos de plástico flexível instalados nas barras de aço). O detalhe das barras preparadas pode ser observado na Figura 4.

Para controle da deformação na barra longitudinal durante o ensaio, foram instalados dois extensômetros elétricos de resistência, diametralmente opostos, em posição correspondente ao meio do vão da viga.

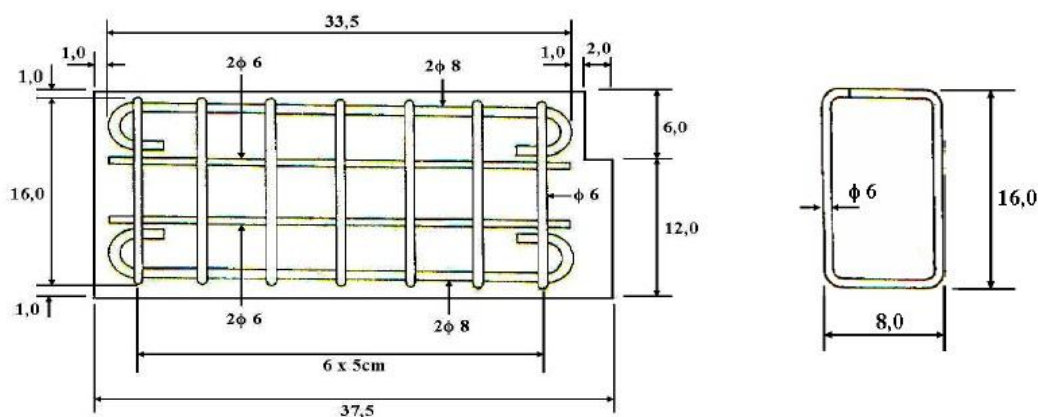
A Figura 5 ilustra a viga pronta para a concretagem, com suas armaduras devidamente posicionadas em formas de madeira.

Materiais empregados e execução das vigas

A Tabela 3 ilustra as proporções entre os materiais empregados nas misturas de concreto desta pesquisa. Foi fixada a relação água cimento em 0,49 para todas as misturas.

As características dos agregados empregados neste trabalho podem ser observadas na Tabela 4.

Figura 3 - Detalhe da armadura construtiva



Fonte: adaptado de RILEM - CEB - FIP (1983).

Figura 4 - Detalhe das barras de aço utilizadas na viga



(a) Vista geral das barras



(b) Detalhe do trecho aderente

Fonte: adaptado de Pinto Junior (2006).

Figura 5 - Detalhe da armadura posicionada no interior das formas de madeira, instantes antes da concretagem



Fonte: adaptado de Pinto Junior (2006).

Tabela 3 - Misturas de concreto para ensaios finais

Traço	Cimento (kg)	Agregado miúdo natural(kg)	Agregado graúdo natural(litros)	Agregado graúdo cerâmico(litros)	a/c	Abatimento (mm)
REF	1	2	1,7	0	0,49	50
S20	1	2	1,3	0,4	0,49	50
S40	1	2	1,0	0,7	0,49	50
S100	1	2	0	1,7	0,49	50

Tabela 4- Propriedades dos materiais empregados

Propriedade	Agregado de resíduo cerâmico	Agregado gráúdo convencional	Agregado miúdo(areia)
Massa específica seca (g/cm ³) – NBR NM 53 (ABNT, 2003a) e NBR NM 52 (ABNT, 2002)	1,77	2,89	2,63
D.M.C (mm) – NBR NM 248 (ABNT, 2003b)	19	19	4,8
M.F.(mm) – NBR NM 248 (ABNT, 2003b)	6,41	6,86	2,4
Massa unitária (g/cm ³) – NBR NM 45 (ABNT, 2006)	0,95	1,62	1,47
Torrões de argila e materiais Friáveis(%) – NBR 7218 (ABNT, 1987)	0	0	0
Teor de material passante na Peneira 75 µm (%) – NBR NM 46 (ABNT, 2003c)	-	0.69	2,37
Absorção de água (%) – NBR NM 53 (ABNT, 2003a) e NBR NM 30 (ABNT, 2001)	19	1,2	0,15

O cimento utilizado foi o CPIIE32, cimento composto com até 10% de escória de alto forno, considerado comum para obras de pequeno porte.

O aço utilizado apresentou tensão limite de escoamento (f_y) de 529,67 MPa e deformação específica no escoamento (ϵ_y) de 0,3%.

A Figura 6 ilustra a análise granulométrica dos agregados gráúdos empregados nesta pesquisa. O agregado gráúdo convencional apresentou britas com diâmetros de 9,5 mm a 25 mm. O agregado gráúdo reciclado foi obtido do material resultante da trituração de resíduos de fábricas de produção de telhas e blocos cerâmicos da região de Campinas, SP.

Para cada mistura de concreto avaliada, foram moldadas três vigas e doze corpos de prova cilíndricos, de 10cm de diâmetro e 20cm de altura.

Considerando a elevada absorção de água promovida pelo resíduo cerâmico, procedeu-se prévia umidificação desses agregados com 80% da água de absorção, procedimento similar ao executado por Correia, Brito e Pereira (2006) e indicado pela NBR 15116 (ABNT, 2004).

Após concretadas, as vigas foram envolvidas com papel umedecido em água e embaladas em sacos plásticos até o dia previsto para o ensaio.

Ensaio principais

Cada uma das doze vigas desta pesquisa foi carregada com o auxílio de máquina universal de ensaios com controle de deformação, de fabricação da EMIC, com capacidade limite de 300 kN e precisão de 20 N (Figura 7).

O carregamento foi feito de forma constante, com incrementos de 0,3 mm por minuto, até o escorregamento total da barra de aço.

Para medir os escorregamentos relativos da barra de aço foi necessário o emprego de transdutores de deslocamentos tipo linear (haste) com potenciômetro e precisão de 1 milésimo de milímetro. Em cada uma das extremidades, direita e esquerda, da viga, um transdutor de deslocamento foi instalado com base na face de concreto da viga e ponta da haste cursora posicionada na barra de aço longitudinal (Figura 8).

Resultados e discussões

As respectivas propriedades mecânicas obtidas para as misturas de concreto desta pesquisa podem ser observadas na Tabela 5, onde f_{c7} representa a resistência à compressão do concreto aos sete dias de idade, f_{c28} a resistência à compressão do concreto aos vinte e oito dias de idade, f_{t7} representa a resistência à tração por compressão diametral aos sete dias de idade, f_{t28} a resistência à tração por compressão diametral aos vinte e oito dias de idade, E_{c7} representa o módulo de deformação longitudinal do concreto aos sete dias de idade e, finalmente, E_{c28} representa o módulo de deformação longitudinal do concreto aos vinte e oito dias de idade.

Na Figura 9, apresenta-se a evolução dos deslizamentos relativos medidos, em cada extremidade da barra de aço longitudinal, para cada uma das vigas ensaiadas, agrupados por mistura de concreto em avaliação.

Figura 6 - Curvas granulométricas dos agregados graúdos

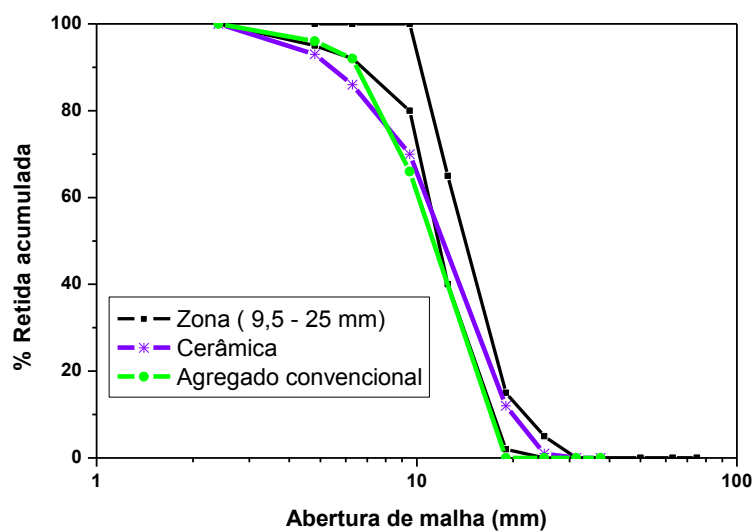


Figura 7 - Detalhe do ensaio de flexão



Fonte: RILEM - CEB - FIP (1983).

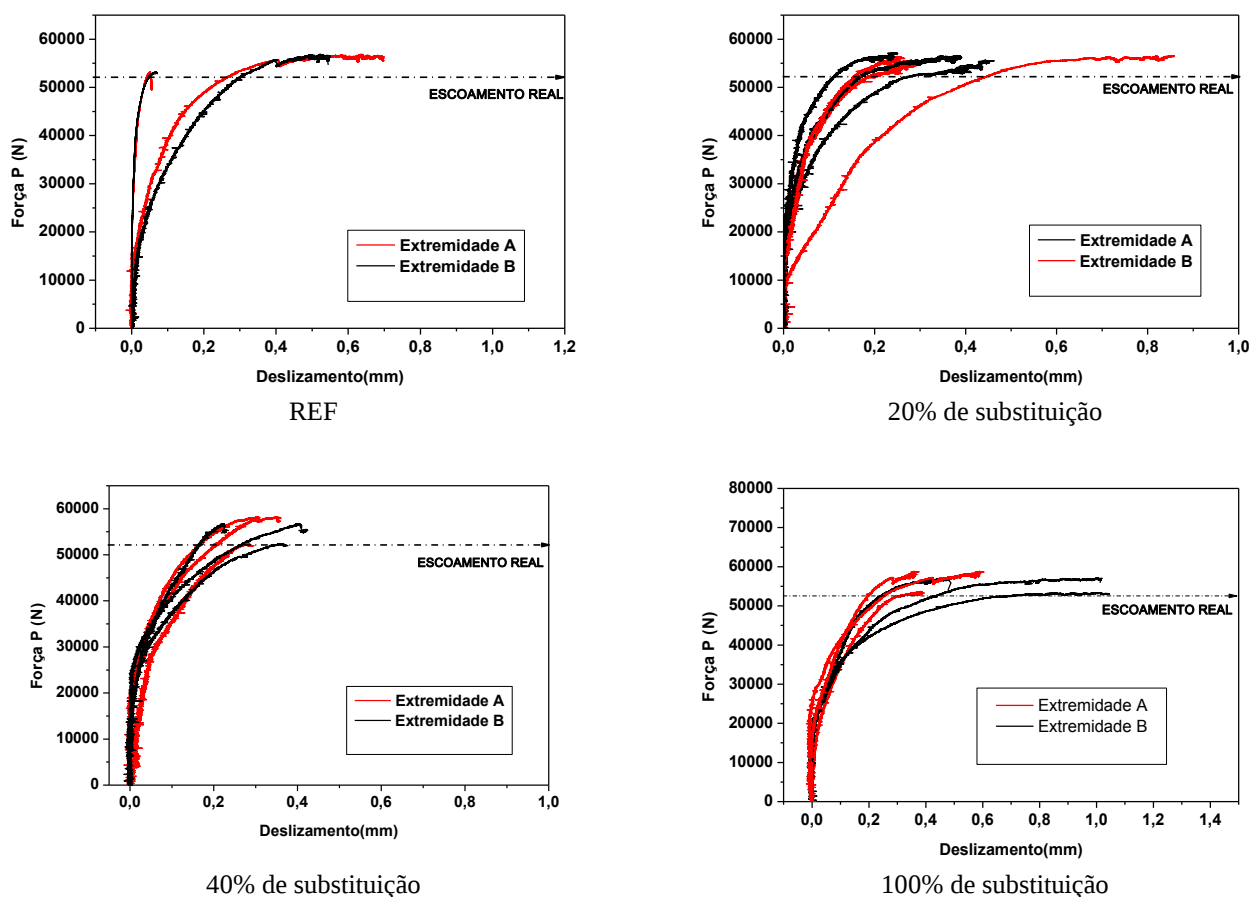
Figura 8 - Detalhe do transdutor de deslocamento posicionado na extremidade da barra longitudinal



Tabela 5 - Propriedades mecânicas das misturas de concreto em análise

Concreto	f_{c7} (MPa)	f_{t7} (MPa)	E_{c7} (GPa)	f_{c28} (MPa)	f_{t28} (MPa)	E_{c28} (GPa)
REF	24,26	-	20,00	30,00	3,34	22,10
S20	22,92	2,61	19,10	29,16	3,04	21,05
S40	20,38	2,21	18,05	26,22	2,63	17,45
S100	16,43	2,15	8,0	19,04	2,23	11,30

Figura 9 - Evolução dos deslizamentos relativos da barra de aço longitudinal de cada viga ensaiada, agrupadas por mistura de concreto em avaliação



As Tabelas 6 a 9 transcrevem esses resultados para as tensões de aderência correspondentes aos deslizamentos relativos de 0,01mm, 0,1mm e 1,0mm; tensões com as quais foi determinada a tensão média de aderência, conforme exigido pela RILEM – CEB – FIP (1983). O valor mínimo especificado, nesse caso, foi calculado de acordo com a Equação Equação 9.

$$\tau_{bm} \geq 8,0 - 0,12 \varnothing \geq 8,0 - 0,12.12,5 \geq 6,5 \text{ Mpa Eq. 9}$$

Na Tabela 6 os resultados da terceira viga de referência foram descartados por falhas na instrumentação ocorridas durante o ensaio.

Como previsto, as propriedades mecânicas das misturas de concreto avaliadas foram afetadas pelo teor de substituição do agregado convencional pelo agregado cerâmico reciclado (Tabela 5). A substituição total de agregado graúdo convencional pelo cerâmico reciclado resultou em queda de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação de, respectivamente, 34,7%, 33,2% e 48,9%, valores próximos aos obtidos para a resistência à compressão por Siempu e Pancharthy (2017), que foi de 20,3% de redução, e valores indicados por Kim e Yun (2013).

Tabela 6 - Tensões de aderência para as vigas de referência

REF01	$\tau_{0.01}$ (MPa)	$\tau_{0.1}$ (MPa)	$\tau_{1.0}$ (MPa)	τ_{bm} (MPa)
Extremidade A	8,87	13,21	13,53	11,87
Extremidade B	9,36	13,53	13,53	12,14
MÉDIA	9,12	13,37	13,53	12,00
REF02	$\tau_{0.01}$ (MPa)	$\tau_{0.1}$ (MPa)	$\tau_{1.0}$ (MPa)	τ_{bm} (MPa)
Extremidade A	3,76	9,43	14,43	9,21
Extremidade B	2,66	8,44	14,43	8,94
MÉDIA	3,21	8,94	14,43	8,86

Tabela 7 - Tensões de aderência para as vigas com 20% de agregado reciclado

S20-1	$\tau_{0.01}$ (MPa)	$\tau_{0.1}$ (MPa)	$\tau_{1.0}$ (MPa)	τ_{bm} (MPa)
Extremidade A	4,59	10,13	14,15	9,62
Extremidade B	5,32	11,22	14,15	10,23
MÉDIA	4,96	10,67	14,15	9,93
S20-2	$\tau_{0.01}$ (MPa)	$\tau_{0.1}$ (MPa)	$\tau_{1.0}$ (MPa)	τ_{bm} (MPa)
Extremidade A	5,39	11,52	14,42	10,44
Extremidade B	4,00	11,64	14,42	10,02
MÉDIA	4,69	11,58	14,42	10,23
S20-3	$\tau_{0.01}$ (MPa)	$\tau_{0.1}$ (MPa)	$\tau_{1.0}$ (MPa)	τ_{bm} (MPa)
Extremidade A	2,65	6,25	10,44	7,78
Extremidade B	5,94	12,93	14,55	11,14
MÉDIA	4,29	9,59	14,50	9,46

Tabela 8 - Tensões de aderência para as vigas com 40% de agregado reciclado

S40-1	$\tau_{0.01}$ (MPa)	$\tau_{0.1}$ (MPa)	$\tau_{1.0}$ (MPa)	τ_{bm} (MPa)
Extremidade A	2,98	8,95	13,90	8,61
Extremidade B	5,45	9,52	13,90	9,62
MÉDIA	4,22	9,23	13,90	9,11
S40-2	$\tau_{0.01}$ (MPa)	$\tau_{0.1}$ (MPa)	$\tau_{1.0}$ (MPa)	τ_{bm} (MPa)
Extremidade A	5,51	10,53	14,81	10,29
Extremidade B	6,77	11,34	14,81	10,98
MÉDIA	6,14	10,94	14,81	10,63
S40-3	$\tau_{0.01}$ (MPa)	$\tau_{0.1}$ (MPa)	$\tau_{1.0}$ (MPa)	τ_{bm} (MPa)
Extremidade A	4,88	10,85	14,46	10,06
Extremidade B	6,77	10,23	14,46	10,49
MÉDIA	5,83	10,54	14,46	10,28

Tabela 9 - Tensões de aderência para vigas com 100% de agregado reciclado

S100-1	$\tau_{0.01}$ (MPa)	$\tau_{0.1}$ (MPa)	$\tau_{1.0}$ (MPa)	τ_{bm} (MPa)
Extremidade A	3,41	8,69	13,55	8,55
Extremidade B	5,47	8,97	13,55	9,33
MÉDIA	4,44	8,83	13,55	8,94
S100-2	$\tau_{0.01}$ (MPa)	$\tau_{0.1}$ (MPa)	$\tau_{1.0}$ (MPa)	τ_{bm} (MPa)
Extremidade A	4,97	9,66	14,50	9,71
Extremidade B	4,97	8,79	14,50	9,42
MÉDIA	4,97	9,23	14,50	9,57
S100-3	$\tau_{0.01}$ (MPa)	$\tau_{0.1}$ (MPa)	$\tau_{1.0}$ (MPa)	τ_{bm} (MPa)
Extremidade A	5,16	10,19	14,98	10,11
Extremidade B	2,39	10,46	14,98	9,28
MÉDIA	3,77	10,32	14,98	9,69

Também previsível por Baena *et al.* (2016), Xiao e Falkner (2007) e Correia, Brito e Pereira (2006) foi a redução da tensão média de aderência com o decréscimo da resistência à compressão das misturas de concreto em avaliação, promovida pela substituição de agregado convencional por agregado cerâmico reciclado (Figura 10). Entretanto, vale enfatizar que, mesmo reduzidos para algumas misturas de concreto avaliadas, os resultados obtidos em relação à tensão média de aderência, para todas as vigas deste trabalho, estão de acordo com o exigido pela RILEM – CEB – FIP (1983), uma vez que atendem ao mínimo valor estipulado de 6,5 MPa (Equação 9). Esse resultado sugere que a substituição do agregado graúdo convencional por agregado reciclado proveniente de resíduo cerâmico pode ser, sim, viável, no que diz respeito à manutenção de aderência mínima entre barras de aço e concreto, mesmo para nível de substituição total (100%).

Entretanto, vale observar que essa taxa de redução obtida para a tensão de aderência, em função do teor de substituição do agregado graúdo convencional pelo agregado de resíduo cerâmico reciclado, não foi tão acentuada quanto aquela observada para as propriedades mecânicas dessas misturas de concreto avaliadas. Esse fato gera o

questionamento do emprego do mesmo procedimento normatizado para cálculo do comprimento de ancoragem da armadura de aço, tanto para concretos produzidos com agregados provenientes do resíduo de cerâmica vermelha como para as misturas de concreto executadas com agregados naturais. Atualmente esse valor é dependente basicamente da resistência à compressão da mistura. Os resultados deste trabalho mostram que esse parâmetro pode não ser tão dependente da resistência à compressão da mistura quanto se previa (Figura 10), uma vez que o mesmo valor de comprimento de aderência da barra poderia ser empregado para todas as misturas aqui avaliadas, mesmo para a mistura de concreto com 100% de substituição do agregado convencional pelo agregado cerâmico reciclado, com tensões de aderência sempre superiores ao mínimo estipulado pelo ensaio RILEM – CEB – FIP (1983).

Na Tabela 10 e Figura 11 são apresentadas as resistências à compressão das misturas de concreto avaliadas neste trabalho e as respectivas resistências de aderência obtidas experimentalmente e de acordo com os procedimentos normatizados apresentados anteriormente.

Figura 10 - Tensões médias de aderência em função do teor de substituição do agregado convencional pelo agregado cerâmico reciclado

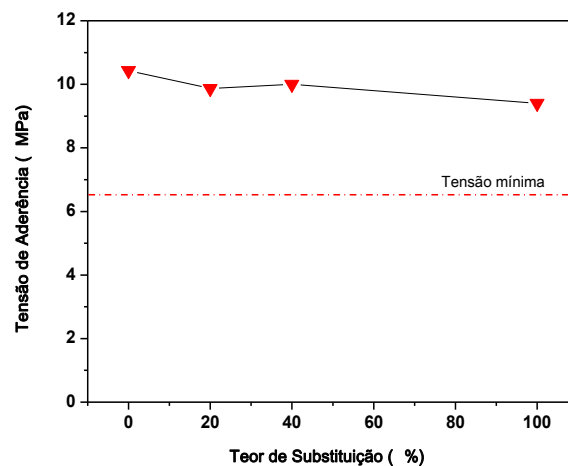
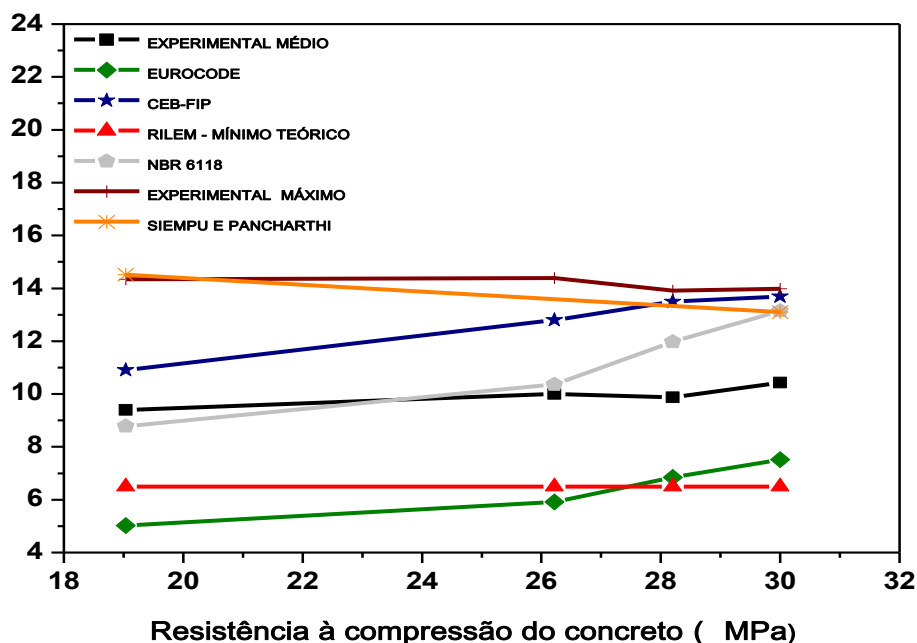


Tabela 10 - Tensão de aderência normatizada para as misturas de concreto em avaliação

Concreto	f_{c28} (MPa)	τ_{bm} Médio (MPa)	τ_{br} Médio (MPa)	Siempu e Pancharathi (2017) (MPa) (Eq. 8)	τ_b (MPa)			τ_{bmin} (MPa) RILEM- CEB-FIP (1983) (Eq. 3)
					NBR 6118 (ABNT, 2014) (Eq. 6)	EUROCO- DE 2 (2004) (Eq. 7)	CEB-FIP- MC (2012) (Eq. 4)	
REF	30,00	10,43	13,98	13,10	13,15	7,52	13,69	6,50
S20	29,16	9,87	13,91	-	11,97	6,84	13,50	
S40	26,22	10,00	14,39	-	10,36	5,92	12,80	
S100	19,04	9,40	14,34	14,52	8,78	5,02	10,91	

Figura 11 - Tensão de aderência comparada à resistência à compressão do concreto



A Equação 8 proposta por Siempu e Pancharthi (2017) permite estimar a tensão de aderência apenas quando é feita a substituição total do agregado graúdo usual por agregado reciclado, por essemotivo não houve valores estimados para 20% e 40% de substituição.

Observando a Figura 11, pode-se comprovar um padrão, expresso também em termos normativos, de incremento da tensão de aderência em função do aumentada resistência à compressão da mistura de concreto em avaliação. Observa-se, também, que a tensão de aderência, como já mencionada, não é tão afetada pela resistência à compressão, em que uma variação de 34,7% nessa resistência correspondeu a apenas 9,9% de redução na tensão de aderência experimental média (τ_{bm}).

Também em relação à curva de tensão de aderência experimental média (τ_{bm}) observa-se comportamento similar ao modelo proposto por Siempu e Pancharthi (2017), podendo, assim, aplicar esse modelo quando for feita a substituição total do agregado graúdo usual por agregado reciclado cerâmico.

Pela Tabela 10 nota-se também que os valores estipulados pelas diversas normas sobre o assunto são sempre inferiores aos valores de tensões de aderência experimental máxima (τ_{br}) obtidos nos ensaios, mesmo no caso da mistura de concreto com substituição total do agregado graúdo usual por agregado reciclado cerâmico. Esse fato gera o questionamento do emprego do mesmo procedimento normatizado para cálculo do comprimento de ancoragem da armadura de aço,

tanto para concretos produzidos com agregados provenientes do resíduo de cerâmica vermelha como para as misturas de concreto executadas com agregados naturais.

Conclusões

Neste trabalho foi avaliada a resistência de aderência de concretos produzidos com agregados provenientes de resíduos cerâmicos e o aço, com vistas ao emprego dessa mistura alternativa na produção de elementos estruturais em concreto armado. Essa avaliação foi conduzida, em laboratório, segundo o padrão preconizado pela RILEM-CEB-FIP (1983).

Como esperado, a resistência à compressão das misturas de concreto avaliadas foi fortemente reduzida com o incremento do teor de substituição do agregado graúdo usual por agregado cerâmico reciclado. Para uma substituição total do agregado usual pelo reciclado essa redução foi da ordem de 34,7%.

Do mesmo modo, observou-se também a redução da tensão de aderência entre concreto e barra de aço estrutural em função do teor de substituição do agregado graúdo usual pelo cerâmico. Essa redução não foi tão acentuada quanto a redução da resistência à compressão para uma mesma mistura, ficando em torno de 9,9% para uma mesma mistura de concreto que apresentou 34,7% de redução para a resistência à compressão, com substituição total do agregado graúdo usual pelo agregado reciclado cerâmico.

A tensão de aderência, mesmo para a mistura de concreto com 100% de substituição do agregado graúdo usual pelo cerâmico, sempre esteve acima do valor mínimo estipulado pela RILEM – CEB – FIP (1983), o que leva a crer que os mesmos procedimentos de dimensionamento usuais para um elemento de concreto armado, no que diz respeito à aderência aço/concreto, podem ser empregados para elementos estruturais executados com misturas de concreto com agregado reciclado cerâmico em sua composição.

Referências

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **440.3R-04**: guide test methods for Fibre Reinforced Polymers (FRPs) for reinforcing of strengthening concrete structures. Farmington Hills, 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A944**: standard test method for companioning bond strength of steel reinforcing bars to concrete using beam-end specimens. Awest Conshohocken, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C234**: standard test method for companioning concrete on the basis of the bond developed with reinforcing steel. West Conshohocken, 1991.
- 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. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**: agregados: determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003a.
- BAENA, M. *et al.* Bond Behavior Between Recycled Concrete and Glass Fibre Reinforced Polymer Bars. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 449-460, 2016.
- BUREAU OF INDIAN STANDARDS. **IS 2770**: methods of testing bond in reinforced concrete: part 1: pull: out test. New Delhi, 2007.
- CAMPOS, M. A.; PAULON, V. A. Utilização de Agregados Alternativos de Isoladores Elétricos de Porcelana em Concretos. **Concreto y Cemento, Investigación y Desarrollo**, v. 7, n. 1, p. 30-43, jul./dec. 2015.
- FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRECONTRAINTÉ. **Model Code 2010**: final draft. London, 2012.
- CORREIA, J. R.; BRITO, J.; PEREIRA, A. S. Effects on Concrete Durability of Using Ceramic Aggregates. **Materials and Structures**, v. 39, p. 169-177, 2006.
- EUROPEAN STANDART. **EN 1992-1-1**: Eurocode 2: design of concrete structures: part 1-1: general rules and rules for buildings. 2004.
- INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. **Model Code 2010**: final draft. Lousanne, 2012. vol. 1. Fib. Bulletin N° 65.
- KIM, S. W.; YUN, H. D. Influence of Recycled Coarse Aggregates on the Bond Behavior of Deformed Bars in Concrete. **Engineering Structures**, v. 48, p. 133-143, 2013.
- OLIVEIRA, M. J. E.; ASSIS, C. S. Aderência de Aço-Concreto Produzido Com Agregado Reciclado. **Exata**, São Paulo, v.4, n.1, p.135-141, 2006.

PINTO JUNIOR, N. O. **Determinação Experimental da Aderência Aço-Concreto de Barras de Seção Transversal Oitavada.**

Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2006. Relatório técnico.

RILEM-FIP-CEB. Bond test for reinforcing steel. 1. Beam test (7-II-28 D). 2. Pull-Out Test (7-II-128). Tentative Recommendations. **RILEM Journal Materials and Structures**, v. 6, n. 32, p. 96-105, mar./apr. 1978.

RILEM-FIP-CEB. **Bond test for reinforcing steel. Beam test, recommendation RC 5.** Concrete Reinforcement Technology, Paris, 1983.

SIEMPU, R.; PANCHARTHI, R. K. Bond Characteristics of Concrete Made of Recycled Aggregates From Building Demolition Waste. **Magazine of Concrete Research**, v. 69, n. 13/14, p. 665-682, jul. 2017.

XIAO, J.; FALKNER, H. Bond Behaviour Between Recycled Aggregate Concrete and Steel Rebars. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 395-401, 2007.

YANG, H.; DENG, Z.; INGHAN, J. M. Bond Position Function Between Corroded Reinforcement and Recycled Aggregate Concrete Using Beam Tests. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 518-526, 2016.

Luciano Passos

Departamento de Estruturas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo | Universidade Estadual de Campinas | Av. Albert Einstein, 951, Cidade Universitária Zeferino Vaz, Distrito de Barão Geraldo | Campinas - SP - Brasil | Caixa Postal 6021 | CEP 13083-852 | Tel.: (19) 3521-2363 Ramal 12363 | E-mail: lupa@fec.unicamp.br

Armando Lopes Moreno Junior

Departamento de Estruturas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo | Universidade Estadual de Campinas | E-mail: almoreno@fec.unicamp.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



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.