

Aderência entre concreto auto-adensável de alta resistência e armadura

Mario Morio Isa*, Antonio Aguado de Cea e Adilson Renóbio

Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Av. Luiz Edmundo Coube, s/n, Av. Luiz Edmundo Coube, Bauru, São Paulo, Brasil. *Autor para correspondência. e-mail: marioisa@feb.unesp.br

RESUMO. Esta pesquisa propõe-se a estudar o comportamento da aderência entre o concreto auto-adensável de alta resistência (CAAAR) e as armaduras de aço. Compara-se este comportamento de aderência com aquele do concreto adensado mecanicamente de alta resistência (CAMAR), na idade de 7 dias. Relaciona-se ainda estes comportamentos com a resistência mecânica (resistência à compressão e à tração) e o módulo de elasticidade dos concretos em estudo, na mesma idade. A aderência entre os concretos e a armadura de aço de conformação superficial nervurada é determinada através de ensaios de flexão, com carregamento monotônico de curta duração. A análise dos resultados permite concluir que o CAAAR e o CAMAR apresentam praticamente o mesmo comportamento de aderência.

Palavras-chave: aderência concreto-armadura, concreto autoadensável de alta resistência, concreto adensado mecanicamente de alta resistência.

ABSTRACT. Bond between high strength self-compacting concrete and reinforcement steel bar. The main purpose of this research is to study the bond performance between high strength self-compacting concrete (HSSCC) and reinforcing steel bar. It's compared with the bond performance of high strength mechanical compacted concrete (HSMCC), reference, for age of seven days. It's purposes to make a list of theses performances with compressive strength, traction strength and elasticity modulus. The bond performance between these concretes and deformed reinforcing steel bar are determined using beam test, in the condition of monotonic and short duration loading. The analysis and interpretation of the results permits to conclude that the HSSCC presents the same performance of the HSMCC.

Key words: bond concrete-reinforcing steel bar, high strength self-compacting concrete, high strength mechanical compacted concrete.

Introdução

Para que ocorra sinergia entre o concreto e a armadura nas estruturas de concreto armado é fundamental que haja aderência entre ambos. Esta é a característica essencial desta sinergia, para absorver os esforços solicitantes nos quais estes diferentes materiais devem atuar em conjunto. Um outro aspecto importante é que estruturas submetidas à flexão, quando devidamente dimensionadas, grandes deformações antecedem à ruptura dúctil, enquanto a ruptura típica de aderência é frágil, isto é, não fornece qualquer sintoma antes de sua ocorrência. Logo, este tipo de ruptura exige atenção especial de projetistas estruturais e recomendações precisas de normas técnicas.

Atualmente, a aderência é um tema importante de pesquisa, devido aos resultados obtidos em investigações desenvolvidas no final dos anos oitenta, que colocaram em dúvida os níveis de

segurança que aparentemente ofereciam diversas normas internacionais (Herrero, 2000).

Concomitantemente, o surgimento de armaduras não metálicas e a introdução crescente de aditivos superplastificantes de última geração, mais potentes, associados à introdução de materiais ultrafinos (adições minerais reativas ou inertes), que densificam a matriz e a zona de transição pasta/agregado, produziram modificações significativas na estrutura do concreto (Isa, 2002).

Uma outra consequência dos avanços tecnológicos é a obtenção de concretos com características diferenciadas tanto no estado fresco como no endurecido. Dentre estes, destaca-se o concreto auto-adensável de alta resistência. Este, além de associar alta resistência mecânica a baixas relações água/cimento, é capaz de fluir no interior da forma, preenchendo de forma natural o seu volume, passando entre as armaduras e consolidando-se

unicamente sobre ação de seu peso próprio, sem compactação interna ou externa (Okamura, 1997).

A sua fabricação é feita com materiais tradicionais, tais como cimento, água, agregados, aditivos superplastificantes de última geração e adições minerais, produzidos com uma nova técnica que difere dos métodos tradicionais de dosagem, empregados para o concreto normal. Resultando um produto fluido com resistência mecânica duplicada e características de durabilidade potencializadas.

Utilizado nas concretagens de estruturas congestionadas de armaduras, em áreas restringidas (Okamura, 1997; Chan e Chern, 2001), na pré-fabricação de estruturas (Walraven, 2001), em estruturas de concreto protendido (Skarendahl, 2001) e em reparo estrutural (Ozawa et al., 1994), este novo tipo de concreto, devido a sua potencialidade, deve ser melhor estudado.

Esta pesquisa tem como objetivo principal estudar o comportamento da aderência do CAAAR, utilizando a metodologia de dosagem proposta (Gomes et al., 2001).

Compara-se este com o comportamento de aderência do CAMAR, tomando como referência, a idade de 7 dias.

Propõe-se ainda a relacionar estes comportamentos com a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade destes concretos na idade de 7 dias.

Material e métodos

A pasta é constituída de cimento de alta resistência inicial, aditivo superplastificante de última geração, sílica ativa densificada, filer calcário e água. O cimento empregado é do tipo CEM I 52.5R, que apresenta resistência à compressão, às idades de 2 e 28 dias de 40,5 MPa e 60,7 MPa, respectivamente. O aditivo superplastificante de última geração tem como base a cadeia de éter carboxílico modificado, e é isento de cloretos. A sílica ativa e o filer calcário apresentam superfície específica de 2,78 cm²/g e 5,45 cm²/g e massa específica de 2,14 kg/l e 2,71 kg/l, respectivamente.

O esqueleto granular é constituído de areia e brita de calcário com granulometrias 0-5 mm e 5-12 mm e massas específicas de 2,67 kg/l e 2,72 kg/l, respectivamente.

As armaduras utilizadas nos ensaios de aderência são de aço B-500-SD e B-500-S e atendem ao limite elástico de 500 N/mm².

A aderência entre estes concretos e a armadura é determinada através de ensaios de flexão (*beam test*)

propostos pela RILEM/CEB/FIP-RC5 (1982), conforme detalhado em (Isa, 2002).

Resultados

As dosagens dos concretos CAAAR e CAMAR são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Dosagens dos concretos.

Tipo de concreto	CAAAR	CAMAR
Cimento (kg)	432	480
Sílica ativa (sf/c=0,10)	43,2	48
Filer (f/c=0,30)	130	-
Água (kg)	173	168
Aditivo (l)	13,6	10,7
Areia (kg)	791	929
Brita (kg)	834	841

Para determinar a aderência utilizou-se uma armadura de conformação superficial nervurada de aço soldável B 500 S, com diâmetro de 12 mm. Optou-se por este diâmetro para adequar-se às dimensões das formas dos ensaios de flexão disponíveis no Laboratório de Tecnologia de Estruturas da Universidad Politécnica de Cataluña. Estas apresentam as dimensões de 15 cm por 15 cm e 50 cm de comprimento, inferiores às recomendadas pelo ensaio tipo A da RILEM (1982). Procurou-se adequar as características da armadura auxiliar deste tipo de ensaio, como mostra a Figura 1.

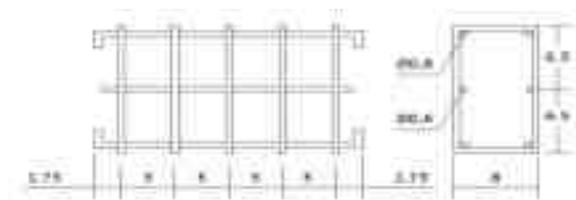


Figura 1. Armadura auxiliar modificada.

A metodologia utilizada não menciona o tipo de apoio e por isso optou-se por apoios móveis com a utilização de roletes de aço de 50 mm, como se pode constatar na Figura 2.

Observa-se na Figura 2 que se utiliza um único transdutor elétrico (LVDT), para determinar os valores de deslizamento. Este está acoplado na extremidade da armadura da semiviga à esquerda da Figura 2. A outra semiviga, a da direita, tem armadura totalmente aderida. Logo, para cada corpo-de-prova, constituído de duas semivigas, obtém-se somente o comportamento da aderência de uma semiviga, localizada à esquerda. São ensaiados 3 corpos-de-prova para cada concreto.



Figura 2. Ensaio de aderência da RILEM (1982) modificado em execução.

No ensaio da Figura 2, pode-se verificar que o dispositivo de aplicação de cargas, acoplado à rótula da prensa, permite uma distribuição uniforme de forças através dos roletes, regularizados por tiras de teflon sobre a superfície do concreto. Verifica-se ainda que os roletes de 50 mm de diâmetro utilizados nos apoios não modificam significativamente a distância entre eles. Fixadas as características geométricas do ensaio de flexão, pode-se determinar a resistência de aderência.

O momento fletor M é dado pela expressão:

$$M = \frac{P}{2} \left(\frac{l}{2} - \frac{a}{2} \right) \quad (1)$$

onde:

- P = força (kN)
- L = 45 cm (distância entre os apoios)
- a = 15 cm (distância entre os pontos de aplicação de forças)

Substituindo, tem-se:

$$M = \frac{P}{2} \left(\frac{45}{2} - \frac{15}{2} \right) = 7,5 P \quad (2)$$

A força F aplicada à barra é dada pela relação:

$$F = \frac{M}{z} \quad (3)$$

onde:

- $M = 7,5 P$ (momento fletor)
- $z = 7,5$ cm (braço mecânico)

$$\text{Logo: } F = \frac{7,5 P}{7,5} = P \quad (4)$$

A resistência de aderência σ_0 é dada pela fórmula:

$$\sigma_0 = \frac{P}{\pi d l} \quad (5)$$

onde:

- P = força aplicada à barra (kN)
- D = 1,2 cm (diâmetro da armadura)
- l = 12 cm (comprimento aderente)

O valor da resistência de aderência é dada pela expressão:

$$\sigma_0 = 0,221055 P \quad (\text{MPa}) \quad (6)$$

O comportamento da aderência entre a armadura e o CAAAR é realizado de acordo com o método RILEM (1982) adaptado, obtendo-se três curvas representativas dos três corpos-de-prova, conforme Figura 3.

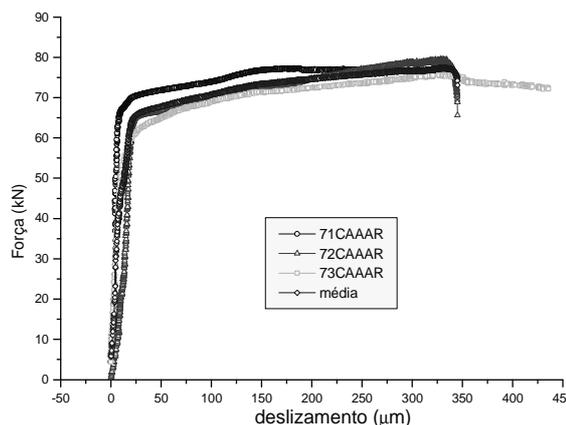


Figura 3. Comportamento da aderência do CAAAR aos 7 dias de idade.

Analisando a Figura 3, constata-se que o CAAAR, concreto que associa auto-adensamento com alta resistência, apresenta um comportamento de aderência diferente do concreto normal.

Neste último, atua a aderência por adesão que se estabelece na interface aço-concreto durante as reações de pega do cimento, o que não é suficiente para uma boa ligação, sendo destruído por pequenos deslocamentos. Atua também a aderência por atrito, que é decorrente das forças de atrito entre os dois materiais, que dependem do coeficiente de atrito entre eles e da pressão transversal exercida pelo concreto sobre a armadura.

A aderência mecânica é a parcela que mais contribui na aderência das barras de conformação superficial nervurada, devido à formação de consoles de concreto, que impedem o deslizamento da barra no concreto. No CAAAR, não há deslizamento até

que a força aplicada aumente consideravelmente o seu valor próximo de 60 kN. Como o corpo-de-prova deste ensaio apresenta armadura auxiliar, esta impede a propagação de fissuras e o fendilhamento do concreto de cobertura.

Como não há fendilhamento, a ruptura da aderência ocorre por cisalhamento do concreto dos consoles, formados devidos às nervuras. Para que haja um movimento relativo entre a armadura e o concreto da zona de transição (deslizamento), esses consoles devem ser cisalhados.

Estes cisalhamentos só ocorrem para valores elevados da força, neste caso acima de 60 kN, e é frágil, ou seja, a ruptura deste tipo de concreto é súbita, isto é, não apresenta nenhum tipo de manifestação anterior.

Da análise da Figura 4, constata-se que o CAMAR apresenta o mesmo comportamento do CAAAR, ou seja, a ruptura da aderência é súbita.

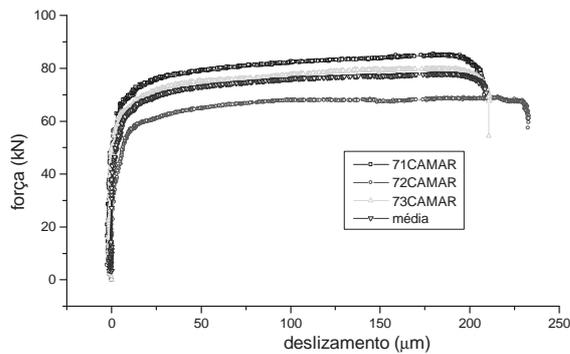


Figura 4. Comportamento da aderência do CAMAR aos 7 dias de idade.

Comparando o comportamento da aderência destes dois tipos de concreto, verifica-se que apresentam o mesmo comportamento, como mostra a Figura 5.

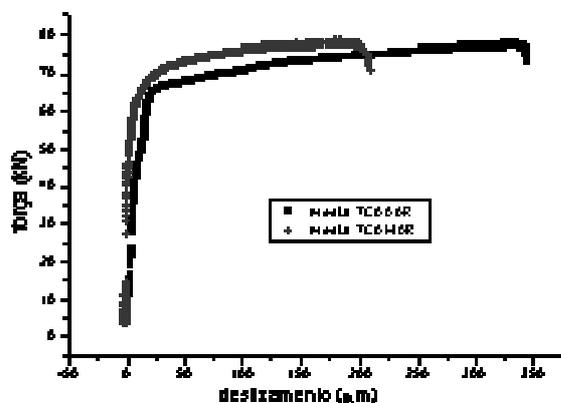


Figura 5. Comparação do comportamento da aderência do CAAAR e do CAMAR aos 7 dias.

Este mesmo comportamento pode ser constatado, analisando-se os valores de resistências médias e de ruptura, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resistências de aderência média e de ruptura do CAAAR e do CAMAR aos 7 dias de idade.

F(kN)	P ₁₀ (kN)	P ₁₀₀ (kN)	P _r (kN)	τ ₁₀ (MPa)	τ ₁₀₀ (MPa)	τ _{br} (MPa)	τ _{um} (MPa)
7CAAAR	46,54	70,74	77,89	10,28	15,64	17,22	14,38
7CAMAR	63,24	75,93	77,63	13,98	16,78	17,16	15,97

Esta constatação pode ser justificada através da análise dos resultados de resistência mecânica e deformação, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade do CAAAR e do CAMAR aos 7 dias de idade.

Tipo de concreto	CAAAR	CAMAR
Força (kN)	1017,56	1043,34
	1034,09	1045,00
	1047,26	1044,81
f _{c,7} (MPa)	57,6	59,0
	58,5	59,1
	59,3	59,1
f _{c,7} (MPa)	58,5	59,1
DP (MPa)	0,85	0,06
CV (%)	1,5	0,1
Tipo de concreto	CAAAR	CAMAR
Força (kN)	279,07	302,92
	275,70	312,82
	283,42	315,59
f _{t,7} (MPa)	3,95	4,29
	3,90	4,43
	4,01	4,46
f _{t,7} (MPa)	4,0	4,4
DP (MPa)	0,05	0,09
CV (%)	1,4	2,1
Tipo de concreto	CAAAR	CAMAR
E _{c,7} (GPa)	34,70	35,10
	33,85	34,74
E _{c,7} (GPa)	34,28	34,74
DP (%)	0,52	0,60
CV (%)	1,5	1,8

Analisando os valores da Tabela 3, verifica-se que a resistência mecânica (resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral) do CAMAR apresenta valores superiores ao do CAAAR. Justificam-se estes, pois o CAMAR, além de apresentar menor relação água/cimento igual a 0,36 /kg do que o 0,40 /kg do CAAAR, apresenta também maior conteúdo de agregados, qual seja, 1.870 kg contra 1.755 kg do CAAAR.

O módulo de elasticidade do CAMAR é ligeiramente superior ao do CAAAR, o que justifica a afirmação de que o alto módulo de elasticidade dos agregados incrementa o módulo de elasticidade do concreto, como constataram König *et al.* (2001) e Isa (2002).

Vários pesquisadores (Hamad, 1995; Isa, 2002) consideram que um aumento na resistência mecânica (tração e compressão) proporciona uma elevação na resistência de aderência. Em concretos auto-adensáveis, porém, o aumento de finos na mistura diminui as resistências de aderência (König *et al.*, 2001).

A força aplicada para romper a aderência entre a armadura e estes concretos é superior aos 80 kN, como se pode concluir, analisando o comportamento da aderência aos 7 dias (Tabela 2).

Conclusão

Procurou-se nesta pesquisa adequar a metodologia recomendada pela RILEM (1982) para os ensaios de flexão. Conclui-se que a fabricação do dispositivo para aplicação de cargas, a confecção de uma rota metálica que permite maior rotação e a utilização de roletes de maior diâmetro como apoios atenderam este aperfeiçoamento. Isto pode ser constatado examinando as curvas de comportamento da aderência dos 2 concretos, assim como a não dispersão dos valores de resistência de aderência obtidos.

Em relação as dimensões dos corpos-de-prova, conclui-se que deveriam atender às dimensões recomendadas pelos ensaios tipo A e B da RILEM (1982). Isto permitiria ensaiar principalmente os concretos de alta resistência, às maiores idades, sem se preocupar com a possível ruptura da armadura, aumentando o diâmetro do aço ou diminuindo o comprimento aderente da armadura.

Conclui-se que o CAAAR, quando devidamente dosado, apresenta o mesmo comportamento do CAMAR. A ligeira superioridade apresentada no valor da resistência de aderência média é decorrente do CAMAR ser dosado com a maior quantidade de agregados e conseqüentemente possuir maior resistência mecânica e módulo de elasticidade.

Conclui-se também que a aderência destes concretos apresenta uma ruptura frágil, o que necessita de recomendações precisas de normas técnicas.

Conclui-se finalmente a necessidade de mais estudos sobre o comportamento da aderência dos concretos auto-adensáveis de alta resistência com o uso de método de ensaio de flexão adequado. O conhecimento deste comportamento pode estimular a utilização destes concretos em estruturas novas aumentando a sua durabilidade e potencializando a sua utilização em reparo de estruturas degradadas.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece à Capes, pela concessão de bolsa pesquisa no exterior, que possibilitou a realização do seu Pós-Doutoramento na UPC-Barcelona/Espanha.

Referências

- CHAN, Y.W.; CHERN, J.C. *The applications of self-compacting concrete in Taiwan*. In: International Symposium ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 2, 2001, Tokio, Anais... v.1, 2001, p. 25-32.
- GOMES, P.C.C. *et al. Experimental optimization of high-strength self-compacting concrete*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 2, 2001, Tokyo, Anais... v.1, 2001, p.377 – 386.
- HAMAD, B.S. *Comparative bond strength of coated and uncoated bars with different rib geometries*. 1995. *Am. Concr. Inst. Mater. J.*, Houston, v. 92, n. 6, p. 579-90., 1995.
- HERRERO, C.V. *Estudo comparativo de las propiedades de adherencia de cordones de pretensado en elementos préfabricados de hormigones de altas prestaciones iniciales*, 2000. Tese (Doutorado) – Escola Técnica Superior Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de la Coruña, 2000.
- ISA, M.M. *Aderência entre concretos auto adensáveis de alta e de resistência normal e armadura: influência da resistência à compressão, resistência à tração e do módulo de elasticidade*. 2002. Tese (Pós-Doutorado)-Escola Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidade Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2002.
- KÖNIG, G. *et al. Self-compacting concrete-time development of material properties and bond behavior*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 2, Tokio, Anais... v. 1, 2001, p. 507-516., 2001.
- OKAMURA, H. *Self-compacting high-performance concrete*, 1997. *Concr. Int.* Paris, v.19, n.7, p.50-54, 1997.
- OZAWA, K. *et al. "Evaluation of Self Compactability of Fresh Concrete – Using the Funnel Test," J. Jpn Soc. Civil Eng.*, Tokyo, v. 23, n. 490, 1994, p. 71-80, 1994.
- RILEM/CEB/FIP Recommendation. RC 5: Bond test for reinforcing steel 1. Beam test, 1982. *Bulletin d'Information du Comité Euro-International du Béton*, Paris, v.2, n.1, p 213-217, 1982.
- SKARENDAHL, A. *Market acceptance of self-compacting concrete, the Swedish experience*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 2, 2001, Tokyo, Anais... v. 1, 2001, p.1-12.
- WALRAVEN, J.C. *State of the art on self-compacting concrete in the Netherlands*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 2, 2001, Tokio, Anais... v. 1, 2001, p. 13-24.

Received on September 30, 2004.

Accepted on December 17, 2004.