

Bond strength between steel-concrete and between concretes with different ages in structural rehabilitation

Aderência aço-concreto e entre concretos de diferentes idades em recuperação de estruturas



M. R. DORIA^a
rezende_mariana@yahoo.com.br

A. T. C. SALES^a
angelasales19@gmail.com

N. F. de A. ANDRADE^a
nilmaandrade@hotmail.com

Abstract

In inspections of buildings, it is common to find structures that, well before reaching its useful life longer require repairs and reinforcements. This study examined the bond strength between concrete of different ages and between steel and concrete, focusing on the recovery of reinforced concrete structures. To analyze the bond between concrete of different ages, trials with specimens receiving three different types of treatments at the interface between the concrete were performed: brushing; brushing and mortar equal to concrete of substrate and brushing and epoxy layer. Indirect tensile tests and oblique and vertical shear tests at the interface were made. The bond stress between steel and concrete was evaluated by pull out test under the conditions of the bar inserted in the still fresh concrete and when inserted in the hardened concrete with epoxy. Results showed increased bond strength by indirect tensile stress of 15% and 37%; 4% and 12% for the adherence test by oblique shear, and 108% and 178%, for the testing of vertical shear, respectively, for the specimens whose interfaces have received, in addition to brushing, layer of mortar and epoxy bridge, compared to those who received only brushing. Insignificant loss (about 0.52%) of bond stress was noticed for pull out test of steel bar when compared with test results of the specimens that had steel bar inserted in the concrete in the hardened state with epoxy adhesion bridge, with those who had inserted steel bar in fresh concrete.

Keywords: concrete structures, recovery materials, bond strength.

Resumo

Em inspeções de construções, é comum encontrar estruturas que, muito antes de atingirem sua vida útil, já necessitam de reparos e reforços. O presente trabalho analisou a resistência de aderência entre concretos de diferentes idades e entre aço e concreto, visando à recuperação de estruturas de concreto armado. Para análise da aderência entre concretos de diferentes idades, foram realizados ensaios com corpos de prova que receberam três tipos de tratamentos distintos na interface entre os concretos: escovação; escovação e camada de argamassa igual à do concreto de substrato e escovação e camada de epóxi. Foram feitos ensaios de tração indireta e cisalhamento oblíquo e vertical na interface. Foi avaliada a aderência entre aço e concreto, por ensaio de arrancamento, nas condições da barra inserida no concreto ainda fresco e quando inserida no concreto endurecido, com ponte de aderência de epóxi. Os resultados dos ensaios de aderência dos corpos de prova de concreto mostraram aumento na resistência de aderência por tração indireta de 15% e 37%; de 4% e 12%, para o ensaio de aderência por cisalhamento oblíquo, e de 108% e 178%, para o ensaio de cisalhamento vertical, respectivamente, para os corpos de prova cujas interfaces receberam, além de escovação, camada de argamassa e ponte de epóxi, em relação àqueles que somente receberam escovação. Percebeu-se, no ensaio de arrancamento de barra de aço, perda insignificante (cerca de 0,52%) na aderência, quando compararam-se os resultados dos ensaios dos corpos de prova que tiveram a barra de aço inserida no concreto no estado endurecido com ponte de aderência epóxi, com os que tiveram a barra inserida no concreto no estado fresco.

Palavras-chave: estruturas de concreto, materiais de recuperação, aderência.

^a Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil.

1. Introdução

Conforme Mehta & Monteiro [1], pode-se afirmar que o material de construção mais consumido em todo o planeta é o concreto. Sua aplicação é bastante antiga e sua composição praticamente não sofreu grandes modificações ao longo do tempo. Assim, seria possível chegar à conclusão de que, pela sua vasta aplicação e relativamente pouca variabilidade de composição ao longo dos anos, a técnica de execução do concreto já estaria consolidada, a ponto de se obter estruturas quase que perfeitas. Entretanto, o que se vê no ambiente prático é o aparecimento cada vez mais comum de falhas em estruturas de concreto e a sua degradação precoce, sendo muitas vezes necessário restringir o uso da estrutura ou até mesmo demolí-la.

Segundo Helene [2], o concreto de cimento Portland tem provado ser o material de construção mais adequado para estruturas, apresentando vantagens em relação a outros sistemas construtivos, como madeira, aço e alvenaria. Entretanto, desde os primeiros indícios de seu uso, o concreto é submetido às mais variadas sobrecargas e ações ambientais, que culminam em uma grande incidência de manifestações patológicas, que são acompanhadas por altos custos das medidas tratativas.

Numa recuperação ou reparo em estrutura de concreto, em que haja necessidade de aderência entre concretos de diferentes idades, é importante que se tenha conhecimento acerca dos fatores que influenciam na resistência da interface entre concreto de substrato e concreto de recuperação. A incompatibilidade de deformações entre concretos de diferentes idades geram tensões na interface de ligação, principalmente as geradas por retração diferenciada. Em situações em que haja necessidade de reposição ou complementação de armadura, a transferência de esforços entre aço e concreto e a compatibilidade de deformações entre esses materiais, garantidas pela aderência entre os dois materiais, mostram-se importantes para a atuação da estrutura de concreto armado. De acordo com Neville e Brooks [3], a resistência de aderência entre armadura e concreto vem principalmente do atrito e da adesão e é afetada tanto pelas propriedades do aço quanto do concreto e pela movimentação relativa devido às variações de volume, como a retração do concreto.

De acordo com Souza & Ripper [4], a perda de aderência pode acontecer, entre dois concretos de idades diferentes, na interface de duas concretagens, ou no contato entre barra de aço e concreto. Este efeito pode ser bastante danoso, podendo levar a um baixo desempenho da estrutura. Assim, torna-se relevante o estudo experimental que mostre a importância e a eficácia do tratamento da interface concreto de substrato-concreto de recuperação, bem como entre o aço e o concreto, para o alcance da adequada aderência entre esses materiais, nos serviços de recuperação e reforço de estruturas de concreto armado.

1.1 Aderência entre concretos de diferentes idades

A compatibilidade dimensional entre concretos de reparo e de substrato está relacionada à capacidade do material de recuperação de difundir as tensões existentes na superfície de contato, causadas pelas diferentes deformações dos materiais, sem que haja descolamento do reparo ou aparecimento de fissuras, conforme Li & Li [5]. A falta de compatibilidade dimensional é citada como uma das principais causas de falha prematura da estrutura reparada, podendo gerar problemas de durabilidade do reparo.

Beushausen & Alexander [6] citam que é comum haver a união de concretos de diferentes idades, ocorrendo durante o reparo de estruturas de concreto e na junção de elementos de concreto pré-moldado. Cánovas [7] faz referência à frequente situação em que há ligação entre concretos de diferentes idades, nas juntas de concretagem, que ocorrem, na prática, de forma planejada, ou por interrupções involuntárias. O intervalo entre a primeira e a segunda concretagem pode ser de algumas horas, ou até mesmo dias. De acordo com Beushausen e Alexander [6], a simples sobreposição de concretos de diferentes idades pode levar ao aparecimento de fissuras e descolamento dos elementos que se pretendia unir. As causas que levam à ineficiência desta união são relacionadas a diversos fatores, como a preparação da superfície do substrato, a forma de aplicação do concreto mais novo, procedimento de cura e até mesmo fatores ambientais. Entretanto, as principais influências negativas para o insucesso da ligação entre concreto novo e antigo é a má execução da ligação e a retração de diferentes magnitudes entre os materiais com diferença de idade.

Bissonnette et al. [8] afirmam que a preparação de superfície onde haverá a união entre concreto velho e concreto novo é uma das questões-chaves para a obtenção de alta qualidade neste tipo de ligação. A boa preparação da superfície não se limita aos processos que ocorrem imediatamente antes da aplicação do concreto novo. Procedimentos, como a limpeza da superfície, lançamento do concreto e cura, devem ser meticulosamente conduzidos, até que se desenvolva uma resistência de união suficientemente elevada para que ocorra a acomodação das tensões.

De acordo com Beushausen & Alexander [6], a aderência é composta por mecanismos de interação mecânica, termodinâmica e química. É importante que se tenha a noção de que a aderência mecânica difere significativamente da resistência à tensão de cisalhamento. Por exemplo, alta rugosidade na interface pode melhorar a resistência ao cisalhamento, entretanto a resistência de ligação dependerá principalmente da ancoragem transversal nos poros e vazios.

Courard et al. [9] referem-se aos tratamentos superficiais no substrato de concreto para promover a interligação mecânica, sendo que o mais comumente utilizado é o aumento da rugosidade superficial, através de diferentes métodos de abrasão. No entanto, para métodos muito agressivos, podem surgir alguns efeitos colaterais indesejáveis, especialmente o desenvolvimento de microfissuras no interior do substrato. No experimento desenvolvido pelos autores citados, houve a comprovação de que, para concretos com resistência à compressão menor que 30 MPa, há acréscimo de aderência entre concreto do substrato e concreto novo, ao preparar-se a superfície com processo de jateamento de areia e hidrodemolição. Porém, ao utilizar tratamentos mais agressivos, como polimento e perfurações da superfície, houve uma perda significativa da aderência, o que não ocorreu com os concretos mais resistentes. Assim, pode-se afirmar que a resistência à compressão dos concretos é parâmetro importante para escolha do tipo de tratamento superficial, visando à boa aderência entre concretos de diferentes idades.

Bissonnette et al. [8] afirmam que há uma extensa pesquisa relacionada a fatores que afetam o vínculo entre substrato e sobreposição. Para que se obtenham resultados que possam ser quantificados, são necessários testes de resistência da união e, por esse motivo, um grande número de ensaios tem sido desenvolvido. Os testes analisam a atuação de forças de tração pura, cisalhamento

e várias combinações de tração e compressão. O ensaio predominante é o teste de arrancamento, entretanto podem ocorrer falhas no substrato, na interface ou na camada de recuperação e, quando a falha não se dá na interface, os resultados do teste serão apenas um limite inferior da resistência do vínculo.

Para Beushausen [10], os elementos de ligação, a serem utilizados na união entre concreto novo e concreto velho, vão desde produtos pré-fabricados até misturas cimentícias produzidas *in loco*. Apesar do grande número de aplicações de pontes de ligação entre concreto novo e concreto velho, a eficiência dos agentes de ligação ainda é um assunto muito debatido entre os pesquisadores e profissionais da área. Opiniões conflitantes também existem quanto à possibilidade da influência positiva na resistência da união de se fazer a molhagem prévia do substrato de concreto. Esse autor constatou que, ao comparar a aderência entre um substrato preparado por pré-molhagem e outro, que se encontrava seco, não houve aumento significativo na aderência e, em alguns casos, houve valores de resistência significativamente menores, quando as superfícies se encontravam saturadas. Esta situação pode ser explicada pelo fato de que, quando o substrato está seco, há uma maior penetração do concreto novo, ou do material de ponte de ligação, nos poros insaturados do concreto do substrato.

De acordo com a norma NBR 14931:2004 [11], podem-se utilizar produtos que melhorem a aderência entre concretos de diferentes idades, desde que não causem danos ao concreto e seja possível comprovar um desempenho pelo menos igual ao da interface produzida por métodos usuais, ressaltando-se que, no caso de uso de resinas, deve-se verificar seu comportamento ao fogo.

Cánovas [7] cita um estudo realizado no Instituto Eduardo Torroja, de Madri, Espanha, em que, com o emprego de resina epóxi como elemento de ligação entre concretos de diferentes idades, obteve-se uma eficiência de união de até 100%, levando ao total monolitismo da estrutura de concreto.

1.2 Aderência entre aço e concreto

Numa estrutura de concreto armado, a aderência entre concreto e aço é tão importante quanto a resistência à compressão do concreto. De acordo com Neville [12], a ligação entre concreto e aço é importante tanto em relação ao comportamento estrutural, como em relação à fissuração provocada pela retração e aos efeitos térmicos nas primeiras idades.

De acordo com Araújo et al. [13], costuma-se separar a aderência em três parcelas que seriam adesão, atrito e mecânica, classificação baseada em curvas de tensão de cisalhamento *versus* deslocamento relativo. A adesão é a aderência química, o atrito surge quando há deslocamento entre os materiais e a aderência mecânica se refere ao engrenamento mecânico.

Entretanto, esses autores afirmam que a separação da aderência nessas três partes é apenas esquemática, pois não se pode avaliar isoladamente cada uma delas. Isso se justifica pelo fato de que mesmo uma barra que possua aspecto visual liso pode apresentar aderência mecânica, em função da rugosidade superficial, devida à corrosão e ao processo de fabricação, gerando saliências na superfície. Torre-Casanova et al. [14] afirmam que as principais características que influenciam no vínculo de aderência são o tipo de concreto usado (geometria dos agregados, adições com propriedades pozolânicas, fibras), a geometria das nervuras das barras e parâmetros de carregamento.

Além das características citadas, Soylev & François [15] indicam a posição das barras e o método de execução do adensamento do concreto como fatores influenciadores do vínculo aço-concreto, sendo a relação água/cimento ressaltada como principal fator influenciador da aderência. Dentro do exposto, os autores propuseram um experimento em que foi medida a aderência das barras de aço posicionadas horizontalmente no concreto, simulando o que ocorre em lajes, em ambiente prático. Foi observado que, quando usado o concreto com alta relação água/cimento, houve a formação de vazios em volta da barra de aço, caracterizando um enfraquecimento da aderência nestes pontos. Foram estudadas cinco amostras de concreto, com relações água/cimento de 0,75, 0,53, 0,60 e 0,39, sendo essa última usada para concreto convencional e auto-adensável. Os resultados mostraram que apenas as amostras com relação água/cimento de 0,39 não apresentaram segregação. O melhor desempenho de aderência foi obtido com o concreto auto-adensável. Conforme Neville [12], vários fatores podem favorecer a aderência, tais como a retração do concreto em relação ao aço, a geometria da armadura e o estado da superfície do aço. A presença de ferrugem na barra favorece a aderência, enquanto o uso de revestimento por galvanização ou resina epóxi prejudica a ligação aço-concreto.

De acordo com a norma NBR 6118:2014 [16], a ancoragem por aderência se dá quando os esforços são ancorados por meio de um comprimento reto, ou com um grande raio de curvatura, seguido, ou não, de gancho. Este comprimento é denominado "comprimento de ancoragem" e é importante que haja um tamanho suficiente, para que ocorra a transferência dos esforços da barra para o concreto. A norma também apresenta fórmulas para o cálculo da resistência de aderência e do comprimento de ancoragem necessário para que se garanta que o aço trabalhe solidariamente ao concreto.

2. Procedimento experimental

Nesse estudo, foram feitos ensaios de medida da resistência de aderência entre concretos de diferentes idades, sob condições diferenciadas de solitação mecânica, tais como: sob tração por compressão diametral, sob cisalhamento oblíquo a 45° e sob cisalhamento vertical. A medida da aderência entre concreto e aço foi feita por ensaio de arrancamento (*pull out*). A Tabela [1] resume as quantidades de corpos de prova para cada tipo de ensaio e de tratamento de superfície. Beushausen & Alexander [6] afirmam que, ao avaliar os valores de resistência de aderência entre concretos, é importante considerar o estado de tensão da interface, causado pelo respectivo método de avaliação, que pode, ou não, representar o principal estado de tensão encontrado na estrutura. Entretanto, pela variedade de estados de tensão que podem causar perda de aderência entre os materiais, há dificuldade em eleger o método que melhor represente a condição presente em determinada estrutura, levando a que, muitas vezes, seja escolhido o método para o qual há disponibilidade de equipamentos. Visando encontrar o método mais adequado de avaliação da resistência de aderência entre o concreto de substrato e os materiais de recuperação estrutural, Momayez et al. [17] desenvolveram um estudo comparativo entre os principais testes de aderência entre concretos. Os procedimentos descritos no

Tabela 1 - Número de corpos-de-prova dos ensaios

Tratamento da superfície de contato		Técnicas de ensaio de aderência			
		Tração indireta	Cisalhamento oblíquo	Cisalhamento vertical	Arrancamento
Concretos diferentes idades	Esc1	4	4	3	-
	Esc/Arg ²	4	4	3	-
	Esc/epx ³	4	4	3	-
Aço-concreto	Aço Mold ⁴	-	-	-	4
	Fur/epx ⁵	-	-	-	-
	Standard	-	-	-	4

¹ Escovação; ² Escovação e argamassa; ³ Escovação e epóxi; ⁴ Aço inserido na moldagem; ⁵ Furação e epóxi.

estudo desses autores basearam a escolha dos tipos de ensaios do presente estudo. Segundo os autores citados, para medida da aderência entre concretos de diferentes idades, os testes que apresentaram melhores resultados, baseando-se no menor coeficiente de variação, e menor nível de dificuldade de execução, foram os ensaios de cisalhamento oblíquo, seguidos dos ensaios de cisalhamento vertical, concluindo que o ensaio aderência por tração indireta foi o menos eficiente.

No presente estudo, foram utilizados dois tipos de concreto para a realização dos experimentos, denominados concreto de substrato, com o traço em massa 1,00: 1,74: 2,37 e relação água/cimento de 0,45, e concreto de recuperação, com traço em massa 1,00: 1,56: 1,85 e relação água/cimento de 0,40. Para o concreto do substrato, foi estabelecida uma resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) de 30 MPa, com abatimento de 80 mm. Para o concreto utilizado na recuperação, o f_{ck} foi de 35 MPa, com características auto-adensáveis. Usou-se a sílica ativa para melhoria da resistência mecânica e da estabilidade da mistura fresca, num teor de substituição do cimento de 12,5%. O ensaio de espalhamento desse concreto resultou em 600 mm, segundo a norma NBR 15823-2:2010 [18].

Os corpos de prova foram moldados de acordo com a NBR 5738:2003 [19], adensados por vibrador de imersão e curados imersos em água por 28 dias. Buscando reproduzir uma situação de recuperação ou reforço estrutural por aumento da seção da peça, o concreto de recuperação foi do tipo auto-adensável, pois as condições de lançamento do concreto, em recuperação de estruturas, costumam dificultar o adensamento. Utilizou-se uma menor relação água/cimento que a utilizada para o concreto do substrato, no intuito de promover maior durabilidade, na tentativa de evitar possíveis fatores causadores de deterioração da estrutura.

A análise de variância (ANOVA um fator) foi utilizada para comparar as resistências de aderência para os tipos de tratamentos de superfície utilizados.

2.1 Ensaios de resistência de aderência por tração por compressão diametral

Com o concreto do substrato, foram moldados 10 corpos de prova

cilíndricos, com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, adensados com vibrador de imersão, curados por imersão em água saturada de cal, por 28 dias de idade e rompidos sob tração por compressão diametral (tração indireta). Foi obtido o valor médio de resistência a esse esforço, tomado como parâmetro de comparação com o resultado a ser obtido para a ligação entre concreto novo e concreto antigo, sob as mesmas condições de solitação. Obtiveram-se, dessa forma, 20 metades dos corpos de prova seccionados, sendo escolhidas as 12 com melhor geometria, que foram deixadas ao ar, no ambiente do Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas, por seis meses, para envelhecimento. Após esse período, as metades dos corpos de prova produzidas foram recolocadas nos moldes cilíndricos e estes foram complementados com o concreto de recuperação. As superfícies de ruptura das metades dos corpos de prova do concreto de substrato receberam um dos três tipos de tratamentos, antes do lançamento do concreto de recuperação, descritos a seguir.

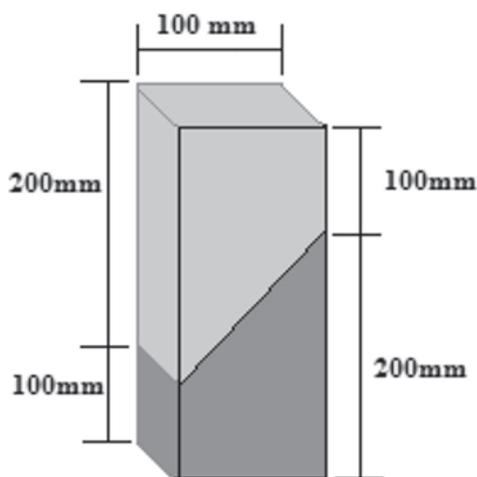
- Apenas escovação da superfície com escova de fios de aço
- Escovação e aplicação de camada de cerca de um centímetro de argamassa do mesmo traço do concreto de substrato
- Escovação da superfície e aplicação de adesivo epóxi

Para cada tipo de tratamento da superfície, foram moldados quatro corpos de prova. Após a desmoldagem, com 24 horas, os corpos de prova, com concretos de substrato e recuperação, foram mantidos em cura por imersão em água por 28 dias. Após esse período, foram realizados ensaios de tração por compressão diametral, de modo a solicitar a interface entre concreto novo e concreto antigo. Dessa forma, foi obtida a resistência de aderência na interface. Os valores obtidos foram comparados com a resistência do concreto do substrato a esse esforço.

Para encontrar os valores da tensão de resistência de aderência por tração por compressão diametral nos corpos de prova, foram utilizados os valores de força fornecidos pela máquina universal de ensaios na Equação 1.

$$\tau_b = \frac{2P}{\pi \cdot d \cdot l_i} \quad (1)$$

Figura 1 – Esquema dos corpos de prova para o ensaio de aderência por cisalhamento oblíquo



Onde:

P é a carga de ruptura à tração do corpo de prova;

d é o diâmetro do corpo de prova;

l_i é o comprimento do corpo de prova de concreto.

2.2 Ensaios de aderência por cisalhamento oblíquo

Para esses ensaios, foram produzidos 12 corpos de prova prismáticos de concreto, medindo 100 mm x 100 mm x 300 mm, com os concretos de substrato e de recuperação, conforme a Figura [1]. Inicialmente, foi aplicado, em uma das metades da forma, o concreto do substrato, limitando-o à

Figura 2 – Molde completado com o concreto do substrato



metade do molde, através de uma placa separadora. Após serem desmoldados e curados por 28 dias por imersão em água, os meios corpos de prova, com concreto de substrato, passaram por um processo de envelhecimento natural, no ambiente do laboratório por 90 dias. Após esse período, esses corpos de prova receberam os tratamentos previstos para a interface entre os dois tipos de concreto. Assim, foram produzidos quatro corpos de prova para cada série, com seu respectivo tipo de tratamento, dentre aqueles utilizados nos ensaios de resistência de aderência por tração por compressão diametral (Item 2.1).

Após aplicação dos tratamentos, os corpos de prova envelhecidos foram recolocados nos moldes e esses foram completados com concreto de recuperação, como mostrado na Figura [2]. Após a cura por imersão durante 28 dias, os corpos de prova foram ensaiados à compressão axial de modo a provocar tensões de cisalhamento oblíquo, para a verificação da aderência entre concreto novo e concreto antigo.

As tensões de aderência por cisalhamento oblíquo foram obtidas através da Equação 2.

$$\tau_b = \frac{P \cdot (\cos 45^\circ) \cdot (\sen 45^\circ)}{l_i^2} \quad (2)$$

Onde:

P é a carga de ruptura do corpo de prova;

l_i é o comprimento do lado da seção transversal do corpo de prova de concreto.

2.3 Ensaios de aderência por cisalhamento vertical

Foram produzidos nove corpos de prova, com a forma e as dimensões frontais mostradas no esquema da Figura [3] e com 180 mm de comprimento. Inicialmente, foram moldadas as partes centrais dos corpos de prova. Esses elementos foram

Figura 3 – Esquema dos corpos de prova para o ensaio de aderência por cisalhamento vertical

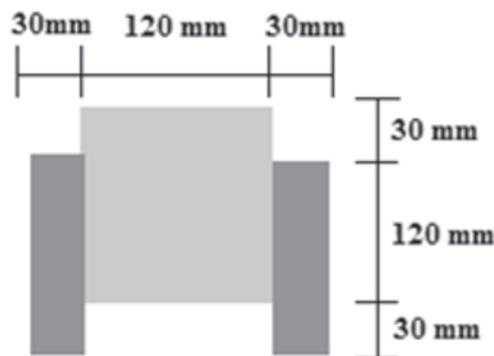
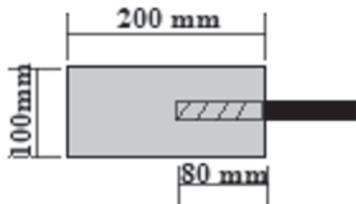


Figura 4 – Esquema dos corpos de prova para ensaio de *pull out*



desmoldados com 24 h e curados imersos em água, por 28 dias. Após esse período, os corpos de prova, ainda incompletos, foram divididos em três grupos de três corpos de prova cada um, que posteriormente receberam os tratamentos na interface com o concreto de recuperação, descritos no item 2.1. Esses corpos de prova incompletos foram submetidos a envelhecimento no ambiente do laboratório, por 90 dias. Após o envelhecimento, os corpos de prova foram recolocados nos moldes e complementados com concreto de recuperação, nas duas laterais do molde, após o tratamento específico para a interface entre os dois tipos de concreto, conforme a cada grupo de corpos de prova. Os corpos de prova foram ensaiados sob compressão axial.

Os resultados da tensão de aderência por cisalhamento vertical foram obtidos pela Equação 3.

$$\tau_b = \frac{P}{2.b.h} \quad (3)$$

Onde:

P é a carga de ruptura do corpo de prova;

b é a base da área da superfície de contato entre os concretos;

h é a altura da área da superfície de contato entre os concretos.

2.4 Ensaios de arrancamento de barras inseridas em concreto (*pull out*)

Com os ensaios de *pull out*, pretendeu-se determinar a aderência aço-concreto, simulando a situação de reposição ou adição de armadura, em estruturas de concreto armado. Foram moldados oito corpos de prova prismáticos de concreto de substrato, com dimensões de 100 mm x 100 mm x 200 mm. Quatro deles foram produzidos com um segmento de barra de aço, de oito milímetros (5/16") de diâmetro, inserido já durante a concretagem, numa profundidade de 80 mm, ou seja, dez vezes o diâmetro nominal da barra. Os outros quatro corpos de prova foram mantidos sem armadura inserida, desde a cura até o final do período de envelhecimento. A modalidade de cura escolhida, para esses corpos de prova, foi a inserção em sacos plásticos hermeticamente fechados, por 28 dias. Após o período de cura, os corpos de prova foram deixados ao ar, no

ambiente do laboratório, por 90 dias. Em seguida, os corpos de prova que não continham barras inseridas foram perfurados com uma furadeira de impacto, com broca de diâmetro de 10 mm, e os orifícios foram preenchidos com epóxi, material usado como ponte de aderência entre aço e concreto. Imediatamente, foram inseridos os segmentos de barra de aço, de mesmas dimensões daqueles que foram utilizados nos quatro corpos de prova já moldados com segmento de barra inserido. Tanto os segmentos de barra colocados durante a concretagem, quanto os inseridos com adesivo à base de epóxi, tiveram 80 mm de seu comprimento inserido no concreto, como mostrado na Figura [4]. Esse valor de comprimento de barra inserido foi estabelecido, nesse estudo, baseando-se no trabalho de Zhu et al. [20], que realizou testes de *pull out* para determinar a resistência da aderência entre barras de aço e concreto, de acordo com a recomendação do RILEM TC 9-RC [21], em que cada corpo de prova foi reforçado com barras de 12 mm ou 20 mm de diâmetro e utilizou o comprimento de ancoragem de 120 mm para todas as barras. Para as barras de 12 mm de diâmetro, o comprimento de ancoragem correspondeu a 10 vezes o diâmetro da barra. Além disso, a norma NBR 6118:2014 [16] recomenda que, em apoios intermediários, o comprimento de ancoragem deve ser igual a 10 vezes o

Figura 5 – Aparato do ensaio de arrancamento (*pull out*)



Tabela 2 – Resultados dos ensaios de aderência por tração por compressão diametral entre concreto de recuperação e de substrato

Método de tratamento	Parâmetros de resistência de aderência	
	Média (MPa)	Coef. de variação (%)
Escovação	1,94	8,99
Escovação-argamassa	2,23	9,00
Escovação-epóxi	2,66	19,49

diâmetro da barra, na ausência de momento positivo na região. Os corpos de prova foram ensaiados à tração para arrancamento do segmento de barra de aço inserido no concreto. Foi montado um aparato para o ensaio de arrancamento, composto por um apoio para o corpo de prova de concreto. Esse aparato possuía uma barra lisa soldada à sua parte superior, de modo, que, nas garras do equipamento de ensaio de tração, ficavam fixadas, superiormente, a barra lisa soldada ao aparato e, inferiormente, o próprio segmento de barra inserido do corpo de prova de concreto, conforme Figura [5]. Obtidas as cargas de arrancamento dos segmentos de barra, as resistências de aderência (f_b) foram calculadas pela Equação 4.

$$f_b = \frac{P}{\pi \cdot d \cdot l_i} \quad (4)$$

Figura 6 – Corpos de prova após ensaio de aderência por tração por compressão diametral com apenas escovação



Onde:

P é a carga máxima de arrancamento da barra;

d é o diâmetro da barra;

l_i é o comprimento de barra inserido no corpo de prova de concreto.

3. Resultados e discussão

3.1 Resistência à tração indireta do concreto de substrato

Os corpos de prova cilíndricos moldados somente com concreto de substrato foram rompidos em ensaio de tração por compressão diametral e os valores obtidos serviram como parâmetro de comparação para a análise do desempenho da ligação entre o concreto original e o de recuperação, quando sujeita a esforços dessa natureza. Foram rompidos dez corpos de prova, resultando no valor médio de 2,88 MPa e desvio padrão de 0,45. Como esse concreto de substrato foi dosado para uma resistência característica à compressão (f_{ck}) de 30 MPa, o valor médio obtido no ensaio de tração por compressão diametral está próximo do esperado. De acordo com Mehta & Monteiro [1], a relação entre os valores de resistência à tração e os de resistência à compressão em concretos fica em torno de 7% a 10%.

3.2 Resistência de aderência entre concreto de substrato e de recuperação sob tração por compressão diametral

Os resultados obtidos para a resistência de aderência por tração por compressão diametral estão mostrados na Tabela [2]. Em relação à interface entre o substrato e o concreto de recuperação que somente recebeu escovação, os resultados dos mostraram que houve um incremento de 15% na aderência, quando se aplicou,

Figura 7 – Corpos de prova pós-ensaiados à aderência por tração por compressão diametral com camada de escovação e argamassa

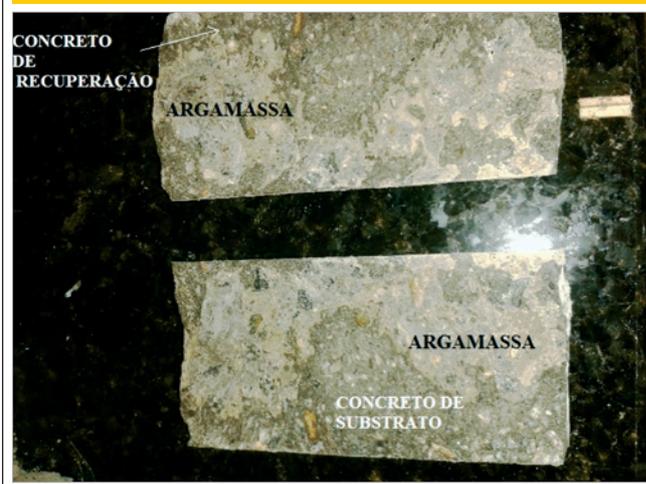
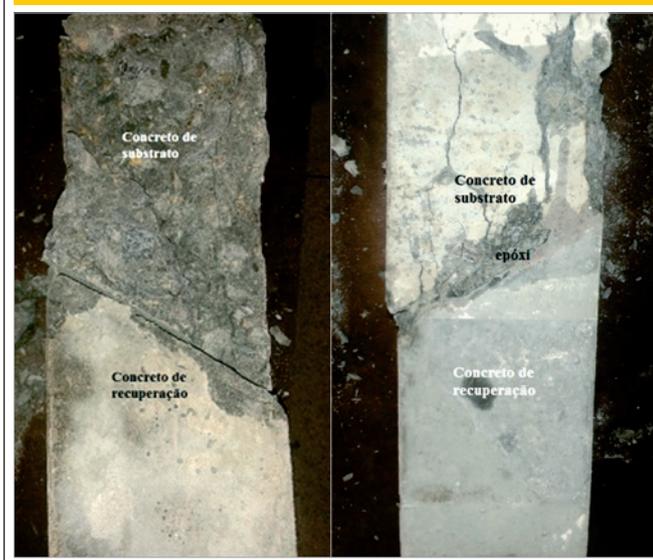


Figura 8 – Corpos de prova ensaiados à aderência por tração por compressão diametral com camada de escovação e epóxi



além da escovação, uma fina camada de argamassa na superfície de contato entre os concretos. Quando comparados os valores médios obtidos dos corpos de prova, submetidos somente à escovação, com os submetidos à escovação e aplicação de camada de epóxi, verificou-se um aumento de 37% na resistência de aderência para os corpos de prova com ponte de aderência de epóxi. Comparando-se o valor médio de resistência à tração por compressão diametral do concreto de substrato, que foi de 2,88 MPa, com o valor médio obtido dos ensaios de aderência por tração indireta dos corpos de prova compostos por concreto de re-

Figura 9 – Corpos de prova ensaiados à aderência por cisalhamento oblíquo



cuperação e de substrato, somente com escovação, percebeu-se que houve uma redução de cerca de 33% na resistência à compressão diametral. Essa redução foi de 23%, para os corpos de prova que receberam escovação e a camada de argamassa, e de 8% para os corpos de prova que receberam escovação e camada de epóxi. Isso leva à conclusão de que, sob tração por compressão diametral, a aderência entre concreto de substrato e concreto de recuperação não atinge o mesmo nível de resistência obtido para corpos de prova monolíticos, mesmo utilizando-se ponte de aderência com adesivo de epóxi. De acordo com a análise de variância, não ocorreu diferença significativa entre os valores obtidos (ANOVA, $F= 3,49$; $F_{crit}= 5,14$; $p= 0,10$).

Pôde-se perceber o modo de ruptura na interface entre os materiais (concretos de substrato e de recuperação), observando-se onde se deu, preferencialmente, essa ruptura dos corpos de prova. Nos corpos de prova onde houve apenas escovação, notou-se que a quebra da ligação ocorreu tanto na interface entre os dois concretos, quanto em algumas regiões, no concreto do substrato, como mostrado na Figura [6]. Nos corpos de prova que receberam escovação e camada de argamassa, o rompimento da ligação ocorreu na camada da argamassa, como mostra a Figura [7], observando-se que restaram partes da argamassa aderidas ao concreto do substrato e outras partes aderidas ao concreto de recuperação.

Nos corpos de prova que receberam escovação e ponte de aderência de epóxi, houve rompimento preferencial entre o epóxi e o concreto de recuperação, como mostra a Figura [8], percebendo-se maior aderência entre o epóxi e o concreto de substrato, que teve maior relação água/cimento que o concreto de recuperação, portanto mais poroso. Além disso, o concreto de recuperação continha sílica ativa, o que certamente contribuiu para uma menor porosidade. Isso pode explicar a maior aderência do epóxi ao concreto de substrato.

3.3 Resistência de aderência entre concreto de substrato e de recuperação por cisalhamento oblíquo

Os resultados dos ensaios de aderência por cisalhamento oblíquo são mostrados na Tabela [3]. Observou-se que, em relação aos corpos de prova de concreto de recuperação e de substrato apenas com escovação, a média de valores de resistência de aderência dos corpos de prova que receberam escovação e camada intermediária de argamassa foi superior em 4%. Para os corpos

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de aderência por cisalhamento oblíquo entre concreto de recuperação e de substrato

Método de tratamento	Parâmetros de resistência de aderência	
	Média (MPa)	Coef. de variação (%)
Escovação	20,88	17,83
Escovação-argamassa	21,71	14,07
Escovação-epóxi	23,38	8,07

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de aderência por cisalhamento vertical entre concreto de recuperação e de substrato

Método de tratamento	Parâmetros de resistência de aderência	
	Média (MPa)	Coef. de variação (%)
Escovação	1,43	6,68
Escovação-argamassa	2,97	4,58
Escovação-epóxi	3,97	25,48

de prova com ponte de aderência de epóxi, a resistência de aderência média foi superior em 12%. De acordo com a análise de variância, não ocorreu diferença significativa entre os valores obtidos (ANOVA, $F= 0,75$; $F_{crit}= 4,74$; $p= 0,51$). Notou-se que os corpos de prova, com quaisquer dos tipos de tratamento da interface, apresentaram um esfacelamento na parte relativa ao concreto de substrato, porém a ruptura se iniciou e se propagou na interface entre os dois concretos, como mostra a Figura [9].

3.4 Resistência de aderência entre concreto de substrato e de recuperação por cisalhamento vertical

A Tabela [4] apresenta os valores obtidos no ensaio de aderência por cisalhamento vertical. Comparando o desempenho de aderência por cisalhamento vertical entre concreto de substrato e de recuperação, foi observado que, para os corpos de prova que receberam camada de argamassa na interface, a resistência de aderência foi superior ao dobro da resistência de aderência dos corpos de prova que receberam apenas escovação na interface. Esse aumento correspondeu a 108%. Para os corpos de prova que receberam camada de epóxi na interface, esse aumento da resistência de aderência foi de 178%. De acordo com a análise de variância, ocorreu diferença significativa entre os valores obtidos (ANOVA, $F= 15,30$; $F_{crit}= 6,94$; $p= 0,01$).

Pode-se observar que a ruptura ocorreu nas duas faces de contato entre os concretos, como mostra a Figura [10], sendo que, nos corpos de prova que receberam escovação e camada de argamassa, houve rompimento, preferencialmente, da camada de argamassa. Já nos corpos de prova que receberam escovação e ponte de aderência de epóxi, notou-se que a camada de epóxi ficou aderida ao concreto de substrato, supondo-se que isso se deu pelo mesmo motivo citado no item 3.2.

3.5 Comparação entre os métodos de ensaio de aderência

Comparando-se os métodos de ensaios, por tração por compressão diametral, por cisalhamento vertical e por cisalhamento oblíquo, percebeu-se que esse último apresentou valor médio de resistência de aderência muito superior aos obtidos nos demais ensaios. Enquanto os valores obtidos nos ensaios de resistência de aderência

por tração indireta e por cisalhamento vertical variaram entre 2 a 4 MPa, os obtidos no ensaio por cisalhamento oblíquo ficaram no intervalo entre 21 a 23 MPa. Essa discrepância entre os resultados de ensaios de resistência de aderência se devem, principalmente, aos estados de tensão que preponderaram nos corpos de prova. Percebeu-se maior resistência de aderência para o ensaio de cisalhamento oblíquo, explicado pelo fato de que o estado de tensão predominante nesse ensaio é um estado combinado de tensão de compressão e de cisalhamento, sendo a tensão de compressão aquela para a qual o concreto apresenta melhor resistência mecânica. Percebeu-se, também, que as variações entre os resultados dos ensaios com corpos de prova com tratamentos diferenciados na interface, para um mesmo tipo de ensaio, foram bastante díspares. Enquanto que, para o ensaio de aderência por cisalhamento oblíquo, houve um aumento da resistência, entre os corpos de prova com tratamento de epóxi e os corpos de prova somente com escovação, de 12%, no ensaio de aderência por cisalhamento vertical esse aumento foi de 178%. Assim, pode-se indicar que, para os diferentes tipos de ensaio, foi mostrado que a importância do tratamento aplicado à interface entre os concretos é variável. Ou seja, para o ensaio de aderência por cisalhamento vertical, o efeito do tratamento aplicado à interface foi mais importante do que para os demais ensaios.

3.6 Ensaios de aderência entre aço e concreto

Os resultados dos ensaios de arrancamento da barra de aço inserida no concreto são mostrados na Tabela [5]. Notou-se que,

Figura 10 – Corpo de prova após submissão à compressão axial para ensaio de aderência por cisalhamento vertical



Tabela 5 – Resultados dos ensaios de aderência entre aço e concreto

Condição de aderência	Parâmetros de resistência de aderência	
	Média (MPa)	Coef. de variação (%)
Barra inserida durante a concretagem	13,47	16,8
Barra inserida com ponte de epóxi	13,40	12,5

praticamente, não houve diferença entre a aderência aço-concreto, nas condições da barra de aço ter sido inserida no concreto ainda fresco, inserida no concreto após 90 dias de envelhecimento. Embora devam ser consideradas as condições específicas dos ensaios do presente estudo, pode-se sugerir que a ancoragem de barras de aço, em recuperação de estruturas, usando ponte de aderência de epóxi, pode-se aproximar, em desempenho, à ancoragem da barra de aço originalmente inserida no concreto.

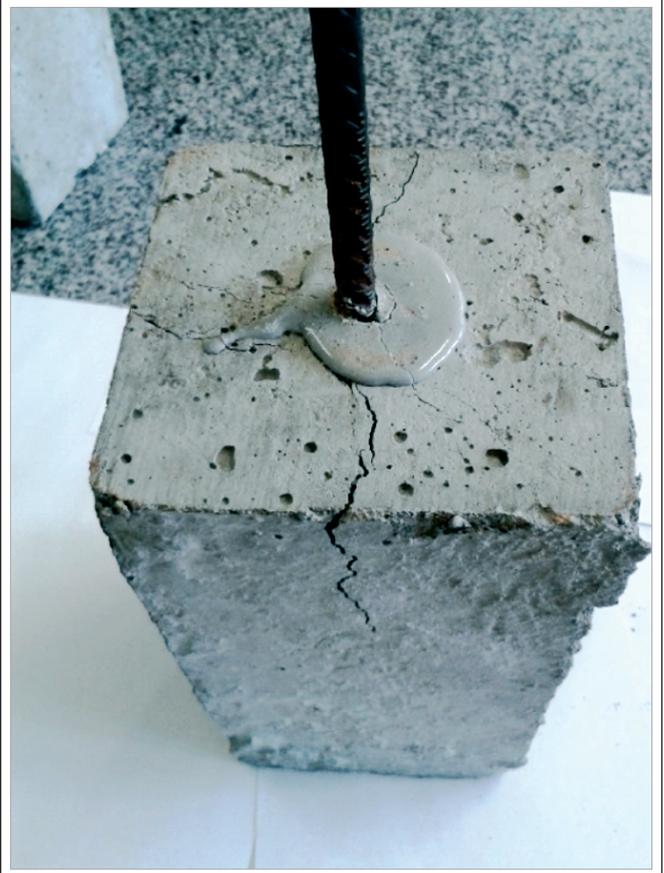
Após o ensaio, percebeu-se que os corpos de prova que não receberam ponte de aderência de epóxi apresentaram esfacelamento do concreto, enquanto os que receberam ponte de aderência de epóxi apresentaram fissuras que se propagaram a partir do ponto de inserção da barra no concreto, como mostrado na Figura [11]. Pode-se supor que, no aço que foi inserido no concreto ainda fresco, quando há o arrancamento da barra, o concreto no entorno da barra é puncionado, criando-se um estado de tensão de tração a ser suportado pelo concreto. Havendo a inserção da barra, com ponte de aderência de epóxi e sendo esse polímero dotado de maior resistência à tração do que o concreto, o dano ao concreto causado pelo ensaio de arrancamento da barra é minimizado, não havendo desagregação do concreto.

4. Conclusões

Os ensaios de aderência por tração por compressão diametral demonstraram que, mesmo com o uso de tratamentos na interface entre os concretos de substrato e de recuperação, a aderência entre concreto de recuperação e concreto de substrato não se equipara ao valor de resistência à tração do elemento monolítico, composto pelo concreto original. Comparando-se a aderência entre os concretos de recuperação e de substrato e a resistência à tração por compressão diametral do corpo de prova de concreto de substrato, notou-se uma redução da resistência, que correspondeu acerca de 8%, quando havia uma interface entre concretos de substrato e de recuperação, mesmo quando foi aplicado tratamento na interface, com escovação e posterior ponte de aderência de epóxi.

Comparando-se os resultados obtidos nos ensaios de aderência por tração por compressão diametral entre concreto de recuperação e de substrato, percebeu-se que houve um aumento de 15% na aderência, quando, além de simplesmente fazer a escovação, aplicou-se uma camada de argamassa na interface entre os concretos. Quanto o tratamento constou de escovação e ponte de

Figura 11 – Corpo de prova com ponte de aderência de epóxi após ensaio pull out



aderência, esse incremento foi de 37%, comparado à aderência entre os concretos, com apenas escovação na interface.

Nos ensaios de resistência de aderência por cisalhamento oblíquo entre concreto de recuperação e de substrato, percebeu-se uma menor variação nas resistências de aderência, entre os três tipos de tratamento aplicados. Os corpos de prova que receberam escovação e camada de argamassa tiveram resistência média de aderência superior em apenas 4%, em relação àqueles que receberam somente escovação na interface. Já os corpos de prova que receberam, além a escovação, a camada de epóxi, tiveram aumento de aderência média de cerca de 12%, em relação aos que receberam apenas escovação.

Nos ensaios de aderência por cisalhamento vertical, os resultados mostraram uma variação bastante significativa entre os valores médios de resistência de aderência da interface entre os dois tipos de concreto, para os diferentes tratamentos na interface. Essa variação atingiu 178%, entre os corpos de prova que receberam camada de epóxi na interface e os que receberam apenas escovação. Entre os que receberam argamassa e os que receberam apenas escovação, esse aumento foi de 108%.

Momayez et al. [17] afirmaram que, dentre os ensaios de aderência entre concretos o que apresentou maior confiabilidade, baseando-se nos coeficientes de variação, foi o de cisalhamen-

to oblíquo. Entretanto, ao avaliar as médias dos ensaios de aderência entre concretos, para os três tipos de ensaios realizados, percebeu-se que o ensaio de aderência por cisalhamento oblíquo apresentou os maiores valores médios, para essa propriedade, num intervalo entre 20 e 24 MPa. Já para os ensaios de aderência por tração indireta e cisalhamento vertical, os valores médios de aderência ficaram na mesma ordem de grandeza, variando entre 1,5 e 4,0 MPa.

No presente estudo, os resultados mostraram que os ensaios de aderência por tração por compressão diametral e cisalhamento vertical provocaram estados de tensão nos corpos de prova que solicitaram mais intensamente a interface entre concreto de substrato e concreto de recuperação. Pode-se supor que as maiores médias de resistência de aderência observadas no ensaio de cisalhamento oblíquo foram consequência do estado de tensões, a que os corpos de prova estiveram submetidos durante o ensaio, com prevalência de esforços de compressão no concreto. Sendo o esforço de compressão melhor resistido pelo concreto, pode-se concluir que esse fator influenciou na determinação de maiores valores obtidos para a resistência, nesse ensaio.

Na análise da aderência entre concreto e aço, notou-se irrelevante diferença na resistência de aderência da interface entre esses dois materiais, quando o aço foi inserido ainda no concreto fresco e quando o aço foi inserido por furação no concreto endurecido, com ponte de aderência de epóxi. Isso mostra a grande capacidade de aderência do epóxi, tanto em relação ao concreto, quanto ao aço, a ponto de igualar-se em desempenho, em relação à capacidade de ancoragem.

Chegou-se à conclusão que o tratamento de interface que apresentou melhores resultados na aderência entre concreto de substrato e concreto de recuperação, entre os três tipos de tratamento estudados, foi a escovação da superfície e posterior aplicação de ponte de aderência de epóxi. Esse tratamento pode ser tomado como a melhor alternativa de reparo ou reforço de estrutura de concreto, dentre os tratamentos estudados, chegando a superar em até 178%, como no ensaio de cisalhamento vertical, a resistência de aderência entre concretos, quando comparado aos valores obtidos para corpos de prova que receberam apenas camada de escovação.

5. Agradecimento

Os autores agradecem à CAPES pela concessão da bolsa de estudos à aluna de mestrado.

6. Referências bibliográficas

- [1] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais. HASPARYK, N. P.; HELENE, P.; PAULON, V. A. (rev. e coord.). São Paulo: IBRACON, 2008.
- [2] HELENE, P. Introducción. In: HELENE, P., PEREIRA, F. (Ed). Rehabilitación y Mantenimiento de Estructuras de Concreto. Bogotá, Colombia, SIKA, 2007, p. 17-32.
- [3] NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. Tecnologia do concreto. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- [4] SOUZA, V. C. M; RIPPER, T. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. São Paulo: PINI, 2005.
- [5] LI, M.; LI, C. V. High-early strength engineered cementitious composites for fast, durable concrete repair: its fol just online journalism. ACI Material Journal. Miami. Mai, 2011.
- [6] BEUSHAUSEN, H.; ALEXANDER, M. G. Bond strength development between concretes of different ages. Magazine of Concrete Research, v. 60, n. 1, 2008, p. 65-74.
- [7] CÁNOVAS, M. F. Patología y Terapéutica del Hormigon Armado. Madrid: ETS de Ingenieros de Caminos, 1994.
- [8] BISSONNETTE, B.; COURARD, L.; BEUSHAUSEN, H.; FOWLER, D.; TREVINO, M.; VAYSBURD, A. Recommendations for the repair, the lining or the strengthening of concrete slabs or pavements with bonded cement-based material overlays. Materials and Structures, vol 46, 2013, p. 481- 494.
- [9] COURARD, L.; PIETROWSKI, T.; GARBACZ, A. Near-to-surface properties affecting bond strength in concrete repair. Cement & Concrete Composites, vol. 46, 2013, p.73-80.
- [10] BEUSHAUSEN, H. The influence of concrete substrate preparation on overlay bond strength. Magazine of Concrete Research, v. 62, n. 11, 2010, p. 845-852.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Execução de estruturas de concreto - Procedimento. – NBR 14931, Rio de Janeiro, 2004
- [12] NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. São Paulo: PINI, 1997.
- [13] ARAÚJO, D. L.; DANIN, A. R.; MELO, M. B.; RODRIGUES, P. F. Influence of steel fibers on the reinforcement bond of straight steel. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais - RIEM, v.6, n.2, 2013.
- [14] TORRE-CASANOVA, A.; JASON, L.; DAVENNE, L.; PINELLI, X. Confinement effects on the steel-concrete bond strength and pull-out failure. Engineering Fracture Mechanics. Paris, out. 2012.
- [15] SOYLEV, T. A.; FRANÇOIS, R. Effects of bar-placement conditions on steel-concrete bond. Materials and Structures, v. 39, n.2, 2006, p 221-222.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. – NBR 6118, Rio de Janeiro, 2014.
- [17] MOMAYEZ, A.; EHSANI, M.R.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; RAJAIE, H. Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials. Cement and Concrete Research, n.35, 2005, p. 748-757.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto auto-adensável- Classificação, controle e aceitação no estado fresco – NBR 15823-2, Rio de Janeiro, 2010.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. – NBR 5738, Rio de Janeiro, 2003.
- [20] ZHU, W.; SONEBI, M.; BARTOS, P. J. M. Bond and interfacial properties of reinforcement in self-compacting concrete. Materials and Structures, v. 37, 2004, p. 442-448.
- [21] RILEM TC 9-RC. Bond test for reinforcement: Pull-out test. 1992.