

Pullout performance of steel bars partially bonded in concrete with epoxy resin

Avaliação da aderência de barras de aço coladas ao concreto com resina epóxi



R. H. SOUZA ^a
reginahsouza@uerj.br

M. E. TAVARES ^a
etavares@uerj.br

D. V. FERNANDES ^b
dennisvideira@gmail.com

Abstract

The installation of new reinforcing bars onto an existing structure is a common practice in civil construction both for old and new structures. The use of anchors has been extensively studied and normalized. The placement of steel reinforcement bars in holes filled with epoxy resin, despite their wide use, still lacks a satisfactory methodology for the design of such systems. In this context, the aim of this paper is to present the results of an experimental programme for confined pullout tests, comparing the performance of cast steel reinforcement bars to that of bars bonded to concrete with epoxy resin. The investigated test parameters included the bar diameter, the embedment length and the resin thickness. Tests results showed a significant efficiency of epoxy resin as structural bonding agent and allowed the verification of sizeable reduction in the anchorage lengths for bonded bars.

Keywords: pullout tests, bond, retrofit, epoxy resin.

Resumo

A fixação de armaduras novas em estrutura existente é prática usual na construção civil, tanto em construções novas como em antigas. A aplicação de chumbadores já está bastante estudada e regulamentada. A fixação de barras de alta resistência em furos preenchidos com resina epóxi, apesar de amplamente utilizada, ainda não dispõe de metodologia satisfatória para o dimensionamento desses sistemas. Neste artigo apresentam-se os resultados de um programa experimental que teve por objetivo estudar a ligação de barras coladas ao concreto com resina epóxi através de ensaios de arrancamento, onde foram testados diferentes diâmetros de barras, de comprimentos de colagem e de espessuras de resina. Os resultados dos ensaios mostraram a grande eficiência da resina epóxi como adesivo estrutural e permitiram verificar reduções significativas nos comprimentos de ancoragem das armaduras coladas.

Palavras-chave: ensaio de arrancamento, aderência, resina epóxi, recuperação estrutural.

^a Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Departamento de Estruturas e Fundações, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
^b Marinha do Brasil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Received: 05 Apr 2017 • Accepted: 16 Oct 2017 • Available Online:

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

1. Introdução

Nos trabalhos de recuperação e reforço das estruturas de concreto muitas vezes é necessário incluir novas armaduras. Visando a garantia da transferência dos esforços, estas armaduras podem ser fixadas e ancoradas ao elemento existente através de: emendas por sobreposição, por fixação aparafusada ou em furos preenchidos com resina ou argamassas especiais, pela ligação com conectores ou com chumbadores pós-instalados em furos feitos no concreto, podendo ser fixados por grautes ou por adesivos sintéticos.

O comportamento de chumbadores colados tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores que estudaram analítica e experimentalmente as ligações coladas, tendo por base modelos de ensaio confinados e não confinados. Nos modelos confinados a reação do sistema de carregamento é colocada adjacente ao chumbador para garantir ruptura por aderência e evitar a ruptura do cone de concreto; nos modelos não confinados, o ponto de reação é posicionado a uma grande distância do chumbador e, por isso, permitem a formação irrestrita do cone.

Nos ensaios para a avaliação do desempenho de chumbadores colados são normalmente utilizados modelos constituídos por lajes, não confinados, que levam à ruptura combinada de um cone raso de concreto e da interface chumbador-adesivo. Estes ensaios têm o seu comprimento de embutimento totalmente preenchido pelo adesivo. Como exemplo tem-se os ensaios de McVay, Cook e Krishnamurthy [1] que, em ensaios não confinados, testaram chumbadores constituídos por barras roscadas com diâmetro $d = 15,9\text{mm}$, diâmetro dos furos $d_o = 19\text{mm}$ e comprimentos de aderência de 76, 102, 127 e 152mm. Os resultados indicaram tensão de cisalhamento *média* $\tau_o = 11,8\text{MPa}$ e tensão de cisalhamento *máxima* $\tau_{\text{max}} = 13,8\text{MPa}$.

No caso da recuperação de estruturas, em geral com concretos de resistências mais baixas, a capacidade deste chumbador tradicional fica prejudicada, uma vez que a baixa resistência do concreto

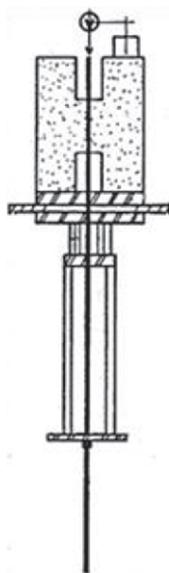


Figura 1
Modelo de Souza, esquema de ensaio [4]

dessas estruturas leva à ruptura prematura do cone de concreto. A fim de melhor estudar esta questão, Gurbuz e Ilki [2] conduziram ensaios de arrancamento de barras total e parcialmente aderidas em modelos confinados e não confinados e observaram diferentes modos de ruptura. Enquanto os chumbadores totalmente aderidos romperam bruscamente com a ruptura do cone e o arrancamento do fuste, os chumbadores parcialmente aderidos romperam pelo arrancamento após o escoamento do aço. De acordo com os resultados, os chumbadores parcialmente aderidos apresentaram uma resistência média 73% maior do que os completamente aderidos. Estes chumbadores romperam pelo escoamento da barra ou, no caso de pequenos comprimentos de colagem, pelo escorregamento da barra. Estes resultados indicaram que os chumbadores parcialmente aderidos têm um desempenho melhor (comportamento dúctil) para aplicações em reabilitação, onde os concretos são de baixa resistência e os espaços limitados. As tensões cisalhantes para esses chumbadores parcialmente aderidos variaram de 15,7MPa a 23,6MPa, portanto valores superiores aos de McVay, Cook e Krishnamurthy [1]. Desse modo, os autores concluíram que para a avaliação do comprimento de ancoragem de barras deformáveis a serem usadas em reparos de estruturas existentes, deve-se prever ensaios em que as barras sejam parcialmente aderidas ao concreto. Os autores também verificaram que para chumbadores total ou parcialmente colados, a resistência ao arrancamento aumenta com o aumento do comprimento de colagem, enquanto que a tensão média de aderência decresce com o aumento do comprimento.

Os chumbadores aderidos já foram objeto de muitos estudos e já têm predições de projeto normalizadas, como a norma AC308 Post-installed Adhesive Anchors in Concrete Elements [3]. Entretanto, ainda há carência de estudos no que diz respeito à colagem de barras de alta aderência usadas como complemento das armaduras de recuperação e reforço. Nestes casos, os elementos estruturais normalmente apresentam concreto de menor resistência que os atuais e os espaços para fixação destas armaduras são exíguos.

A seguir estão relacionados estudos experimentais que tiveram por base ensaios confinados, sem a formação do cone de concreto, visando a recuperação e o reforço, com o objetivo de comparar o comprimento de ancoragem de barras normalmente embutidas no concreto com barras coladas com resina epóxi.

Souza [4] conduziu ensaios de arrancamento em modelos em forma de H, conforme indicado na Figura 1, de modo a impedir a transferência da reação de compressão no modelo à barra a ser tracionada e que facilitasse a execução do furo e a colagem da barra. Foram testados dois diâmetros de barras de alta aderência: 8 e 12mm, sendo os valores das tensões de escoamento $f_y = 500\text{MPa}$ e $f_y = 401\text{MPa}$ respectivamente, com variados comprimentos de colagem: 7,5cm; 10cm e 15cm. Foram executadas duas séries de ensaios: modelos SR (Sem Resina), com barras embutidas no concreto e modelos CR (Com Resina) que foram moldados sem as barras, sendo estas coladas posteriormente com resina epóxi em furos cujo diâmetro correspondeu ao diâmetro da barra, mais 6 mm. A resistência à compressão no dia do ensaio era de 42MPa. Os resultados desses ensaios mostraram que a resistência de aderência da ligação com resina epóxi aumenta com o aumento do comprimento de colagem e com o tipo de ligação. As ancoragens com resina epóxi em barras $d = 8\text{mm}$

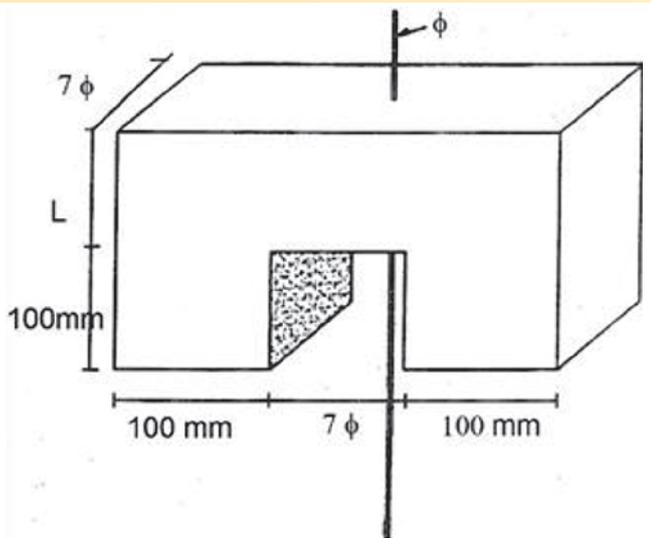


Figura 2
Modelo de Felício [5]

permitiram uma redução do seu comprimento até 33% e em barras $d=12$ mm até 50%, em relação aos comprimentos de ancoragem sem resina epóxi.

Felício [5] procedeu a ensaios de arrancamento em modelos com a configuração geométrica apresentada na Figura 2 e barras de

aço de alta aderência com diâmetros de 10; 12,5 e 16mm, sendo $f_y=620$ MPa, $f_y=600$ MPa e $f_y=660$ MPa, respectivamente. A resistência à compressão no dia do ensaio era de 32MPa. As dimensões dos modelos foram ajustadas proporcionalmente aos seus diâmetros. Foram estudados quatro comprimentos para cada diâmetro: 5d ; 7,5d ; 10d e 12,5d. O cobrimento de armadura adotado era igual a três vezes o diâmetro da barra de aço ($c/d=3$). Os modelos do tipo SR tinham a armadura posicionada no momento da concretagem; os do tipo CR foram concretados sem a armadura, sendo esta colada posteriormente com a resina. Os furos atravessavam toda a extensão do comprimento de aderência e a relação $d_{\text{furo}}/d_{\text{barra}}$ era de 1,3 e 1,4. Os resultados mostraram que em ambos os modelos para um dado diâmetro, maiores comprimentos de colagem acarretaram maiores valores das cargas máximas, maiores deslocamentos e tensões de aderência bem próximas. Verificou-se a grande eficiência da resina epóxi como adesivo estrutural e reduções significativas nos comprimentos de ancoragem das armaduras coladas de: 24% para as barras $d=10$ mm; 42% para as barras $d=12,5$ mm e 29% para as barras $d=16$ mm.

Bouzaoui et al [8] investigou a resistência de aderência das ligações aço-concreto e aço-epóxi-concreto em ensaio confinado de modelos cilíndricos de 320mm de comprimento e 160mm de diâmetro. Foram testadas barras com diâmetros de 12, 16 e 20mm e comprimentos que variaram de 100 a 300mm. Estas barras foram coladas com resina epóxi de forma totalmente aderida, com espessura constante de 1mm. A tensão de escoamento do aço

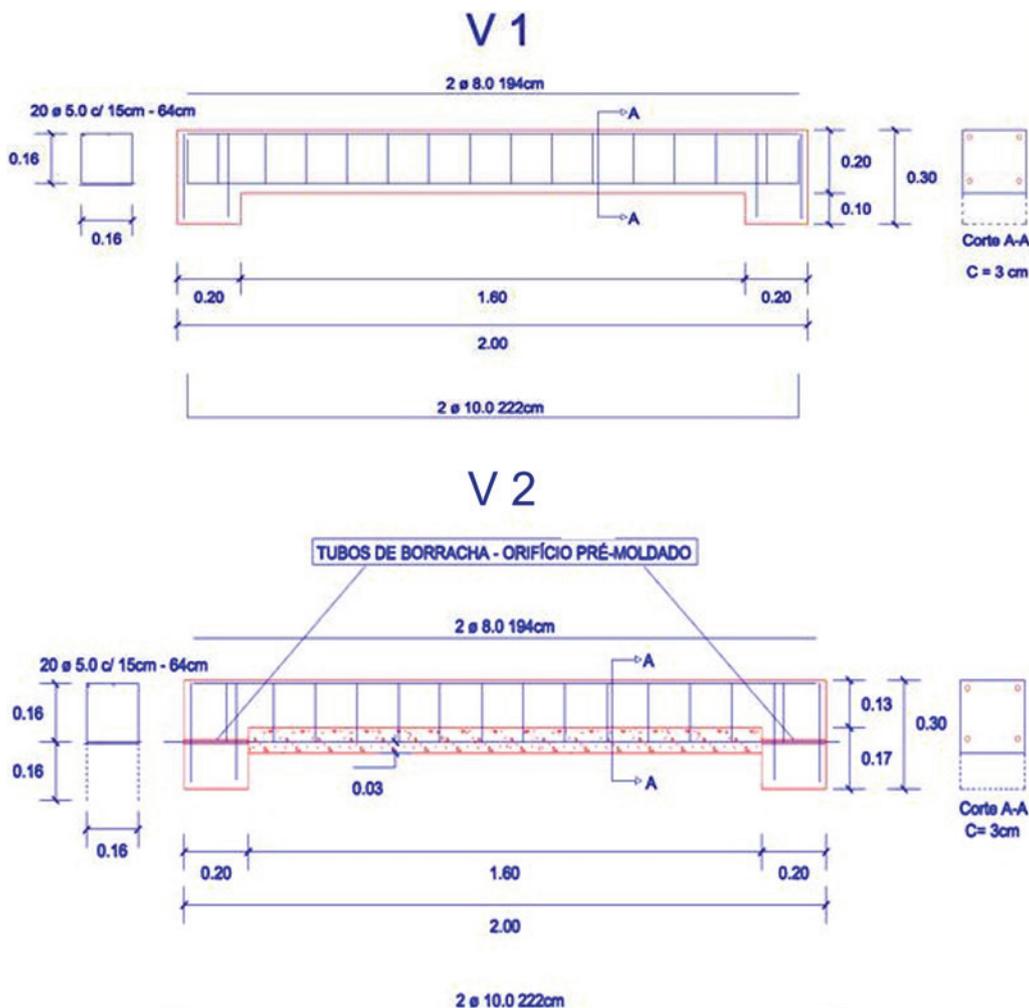


Figura 3
Formas e armaduras das Vigas V1 e V2

era de 340MPa e a resistência à compressão do concreto era de 40MPa. A aplicação do carregamento dava-se pela base do cilindro. Quanto ao modo de ruptura, foram observados: o fendilhamento do concreto, o deslizamento da barra de aço e a ruptura da barra de aço. O autor verificou que a força última aumenta linearmente com o diâmetro da barra e com o comprimento de ancoragem, mas que aumenta parabolicamente com o aumento da superfície aderente.

A seguir apresenta-se o trabalho de Fernandes [6] que deu prosseguimento a esta linha de pesquisa, visando contribuir para o aumento do conhecimento científico de uma prática empírica da construção civil, usada, sobretudo na área do reforço e da recuperação estrutural. O objetivo deste trabalho consistiu na avaliação da capacidade de aderência de barras de armaduras coladas às estruturas de concreto, tendo por base ensaios laboratoriais.

2. Materiais e métodos

Fernandes [6] efetuou ensaios de arrancamento em modelos prismáticos e ensaios à flexão em vigas, a fim de avaliar o comprimento de ancoragem das barras longitudinais tracionadas.

2.1 Ensaios de vigas

As vigas de concreto bi-apoiadas foram ensaiadas à flexão, sendo o carregamento constituído por duas cargas concentradas localizadas nos terços do vão. O ensaio das vigas pretendeu verificar o comportamento da aderência de barras de aço coladas ao concreto, semelhante ao que ocorre nos trabalhos de reforço ou recuperação estrutural em vigas já existentes. Para tal foram moldadas duas vigas, uma integralmente em concreto armado e com armadura tradicionalmente ancorada em ganchos, denominada por viga V1, e outra moldada em duas etapas, sendo suas barras

longitudinais inferiores coladas nas extremidades dos apoios com resina epóxi em furos pré-executados no concreto denominado por viga V2. As vigas possuíam 2m de comprimento e seção retangular com 20 cm de altura e 20 cm de largura.

A viga V2 foi moldada em duas etapas de concretagem. Na 1ª etapa sua altura era de apenas 13cm e foram colocados tubos de borracha na região dos apoios, de modo a garantir-se os furos para a posterior colagem das barras longitudinais. O comprimento de ancoragem dessas barras retas correspondeu a toda a extensão do apoio, ou seja, as barras foram coladas em um comprimento de 20cm. Além disso, as pernas dos estribos ficaram expostas para futura dobragem e amarração na parte inferior da viga que recebeu o complemento de concreto correspondente a 6 cm, moldado após a fixação das armaduras longitudinais. Vide Figura 3.

Após a desmoldagem da viga V2 procedeu-se a colagem das barras longitudinais: primeiramente fez-se a limpeza dos furos retirando-se todo o pó, em seguida aplicou-se a resina epóxi dentro do furo e logo após inseriu-se as armaduras nos furos, estando estas abundantemente embebidas em resina de modo a garantir-se o total preenchimento do furo com a resina. Após um período de cura de quatro dias efetuou-se um apicoamento na superfície do concreto na região a ser completada, para melhorar a aderência entre os dois concretos, retirando-se a nata de cimento existente. A partir daí, procedeu-se a dobragem e amarração dos estribos e a molhagem do fundo da viga, preparando-a para a 2ª fase de concretagem. O concreto da 2ª etapa foi idêntico ao da 1ª etapa, de mesma resistência e granulometria.

A Figura 4 mostra o esquema de carregamento utilizado nos ensaios à flexão das vigas, tendo-se utilizado uma prensa hidráulica do tipo Losenhausen – LOS de 100t. Para a instrumentação foram utilizados deflectômetros analógicos e extensômetros elétricos colados à superfície do concreto, nos vão de corte e no meio do vão, com o objetivo de avaliar as deformações sofridas pela barra longitudinal colada.

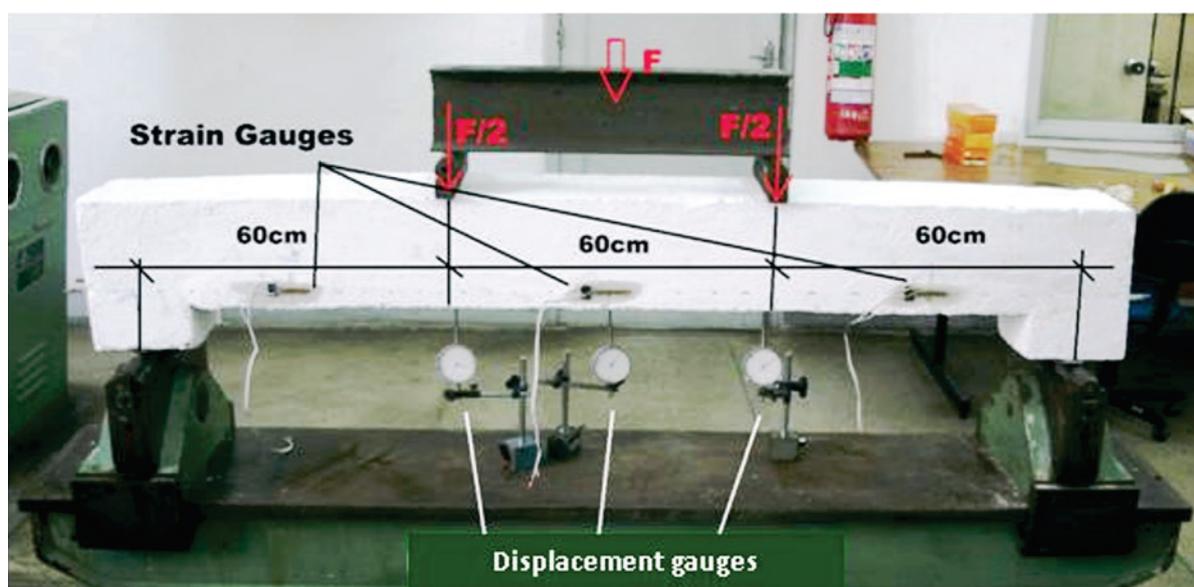


Figura 4
Instrumentação dos ensaios das vigas

Tabela 1

Resultados dos ensaios de arrancamento

Modelo	Comprimento de colagem l (mm)	Diâmetro do furo d_o (mm)	Superfície de aderência (cm ²)	Resistência última (kN)	Tensão de aderência τ_b (MPa)	Incremento de resistência $\tau_{b,CR} / \tau_{b,SR}$
10-5-0	50	-	15,7	12,2	7,8	-
10-7,5-0	75	-	23,6	34,4	14,6	-
12,5-5-0	62,5	-	24,5	24,4	9,9	-
12,5-7,5-0	93,8	-	36,8	51,8	14,1	-
16-5-0	80	-	40,2	53,2	13,2	-
16-7,5-0	120	-	60,3	77,8	12,9	-
10-5-1	50	12	15,7	48,8	31,1	4,0
10-7,5-1	75	12	23,6	54,8	23,3	1,6
12,5-5-1	62,5	14,5	24,5	68,0	27,7	2,8
16-5-1	80	18	40,2	90,4	22,5	1,7
16-7,5-1	120	18	60,3	123,0	20,4	1,6
10-5-2	50	14	15,7	48,8	31,1	4,0
10-7,5-2	75	14	23,6	52,6	22,3	1,5
12,5-5-2	62,5	16,5	24,5	69,8	28,4	2,9
12,5-7,5-2	93,8	16,5	36,8	90,6	24,6	1,8
16-5-2	80	18	40,2	101,4	25,2	1,9
16-5-3	80	22	40,2	117,2	29,2	2,2
16-7,5-3	120	22	60,3	83,8	13,9	1,1

2.2 Ensaios de arrancamento

O tipo de ensaio adotado no trabalho baseou-se no pullout test, normalizado pela RILEM [7]. Este tipo de ensaio possui características simples de execução e foi adaptado ao estudo de modo a permitir a colagem com resina epóxi. Foram efetuados 61 ensaios de arrancamento de barras de aço de alta aderência embutidas em prismas de concreto durante sua concretagem - modelos sem resina (SR) - ou embutidas posteriormente, por meio de colagem com resina epóxi - modelos com resina (CR).

Com o objetivo de comparar modelos com diferentes armaduras, as dimensões dos modelos e o comprimento de colagem foram ajustados proporcionalmente aos diâmetros das barras. Foram testados três diâmetros de barras: 10mm; 12,5mm e 16mm e dois comprimentos de colagem para cada diâmetro: 5d e 7,5d. As dimensões dos espécimes variaram de acordo com o diâmetro da barra tanto para os pré-aderidos quanto para os pós-aderidos, na proporção de 10d. Para cada tipo de modelo foram moldados e ensaiados pelo menos três exemplares; os resultados obtidos referem-se à média desses 3 ensaios. Foram testadas três



Figura 5
Direção da concretagem dos modelos ensaiados



Figura 6
Esquema do ensaio

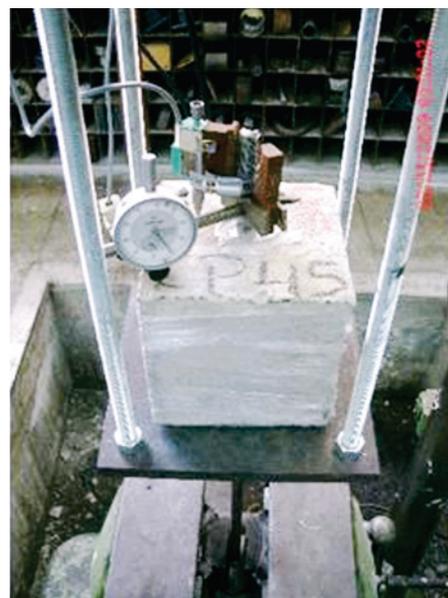


Figura 7
Instrumentação para leitura dos deslocamentos

espessuras de resina epóxi: 1mm (CR1), 2mm (CR2) e 3mm (CR3). A identificação dos modelos está indicada na Tabela 1 e segue o exemplo: modelo 10-7,5-2 corresponde à barra de 10mm de diâmetro, comprimento de colagem de 7,5d e espessura de resina de 2mm.

Antes da concretagem dos modelos que iriam receber barras coladas foram embutidos tubos plásticos, a fim de servirem de gabarito aos furos de passagem das barras de aço e minimizar os efeitos negativos da furação. Estes tubos tinham o diâmetro exato que se previa para cada modelo, ou seja, contemplavam o diâmetro da barra mais a espessura que a resina epóxi iria ocupar. O lançamento do concreto nas formas foi feito manualmente, em camadas, perpendicularmente à posição das armaduras, (conforme mostra a Figura 5). O adensamento foi feito por meio de vibrador elétrico de imersão, após a colocação de cada camada. O acabamento do corpo de prova foi dado com colher de pedreiro.

Após a concretagem, estes tubos foram retirados e procedeu-se a limpeza dos furos e das barras de armadura, de modo a remover todo o pó e qualquer impureza que pudesse prejudicar a aderên-

cia. Na região onde desejava-se ter o comprimento não aderente, a barra foi revestida com filme PVC, finalizando-se com um tampão de fita isolante, de modo a evitar o escoamento da resina da região aderente para a região não aderente.

A montagem do ensaio teve por objetivo permitir a aplicação de uma carga de tração em uma das extremidades da armadura e a leitura do deslocamento relativo entre a armadura e o concreto na outra extremidade. Para isso foi utilizada uma gaiola metálica com a função de reagir contra o bloco de concreto, enquanto a extremidade livre da barra era tracionada, Figuras 6 e 7.

2.3 Materiais

A composição adotada para o concreto procurou representar as características das construções de concreto armado em idade passível de recuperação e intervenção estrutural. Assim, a resistência média à compressão do concreto na época dos ensaios dos modelos foi de 26,9MPa. Os valores das tensões resistentes dos aços no escoamento e na ruptura foram, respectivamente:

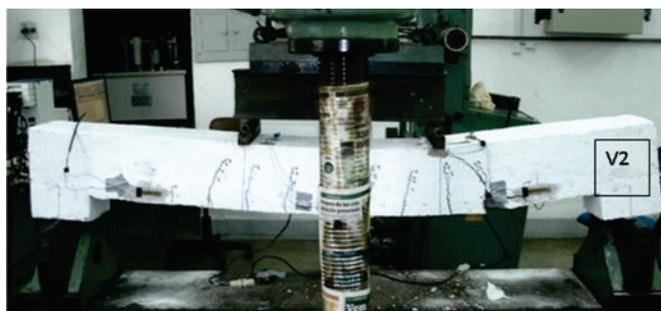


Figura 8
Aspecto da ruptura e da fissuração das Vigas V1 e V2

603MPa e 742MPa para a barra de 10mm; 584MPa e 735MPa para a barra de 12,5mm e 564MPa e 714MPa para a barra de 16mm. A escolha da resina epóxi, de uso corrente na construção civil, considerou as características de fluidez, de manipulação e de acessibilidade ao material e foi aplicada conforme as instruções do fabricante. Foram testados o sistema RE 500 da Hilti que, devido à sua característica tixotrópica, mostrou-se desfavorável à passagem da barra pelo furo, condição deste trabalho, e o Sikadur 32 que, de acordo com o fabricante, é um adesivo estrutural à base de resina epóxi, de média viscosidade (fluido), bi-componente e de pega normal, especialmente formulado para ancoragens em geral e colagens de concreto velho com concreto novo e chapas metálicas ao concreto; sua resistência à compressão após 24h é de 60MPa, a cura inicial dá-se em 5 horas e a cura final em 7 dias; a temperatura de aplicação varia entre +10°C a +30°C.

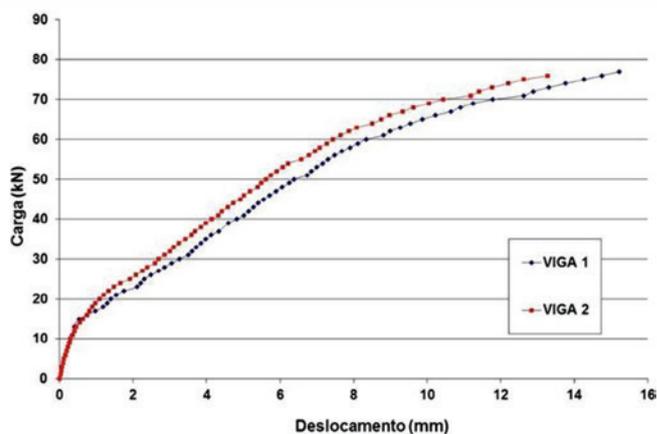


Figura 9
Curva carga-deslocamento no meio do vão das vigas



Figura 10
Ruptura típica por fendilhamento nos modelos CR e aspecto da ligação rompida

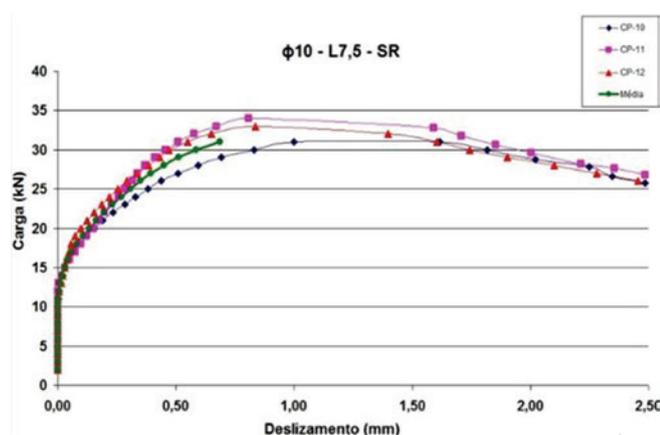


Figura 11a
Curvas carga-deslizamento dos ensaios dos modelos SR 10-7,5-0

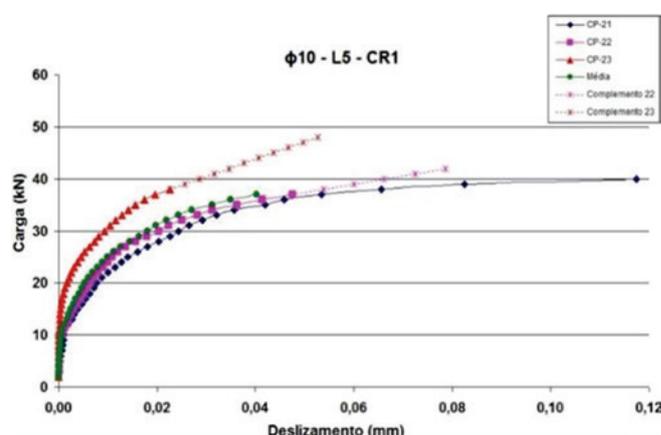


Figura 11b
Curvas carga-deslizamento dos ensaios dos modelos CR 10-5-1

3. Resultados

3.1 Resultados dos ensaios de vigas

A ruptura da viga V1 deu-se por compressão no concreto da mesa superior e deformação excessiva da barra tracionada (ruptura clássica de flexão). A ruptura da viga V2 foi caracterizada pela ruptura da biela de compressão formada a partir de um dos pontos de aplicação da carga. As fissuras de flexão tiveram comportamento simétrico em relação ao meio do vão e não foram verificadas fissuras de esforço cortante. Os ex-

tensômetros colados no vão de corte apresentaram deformações muito pequenas, não significativas, e foram desconsiderados. A Figura 8 ilustra o aspecto da ruptura e o modo de fissuração de ambas as vigas. A viga V2 não apresentou qualquer fissuração de aderência na interface das duas camadas de concreto indicando que tanto a ligação concreto-concreto como a colagem de barras de aço no concreto foram eficientes. A resina epóxi cumpriu de maneira eficiente sua característica adesiva, garantindo a ancoragem das barras longitudinais de tração.

O gráfico carga-deslocamento no meio do vão apresentado na

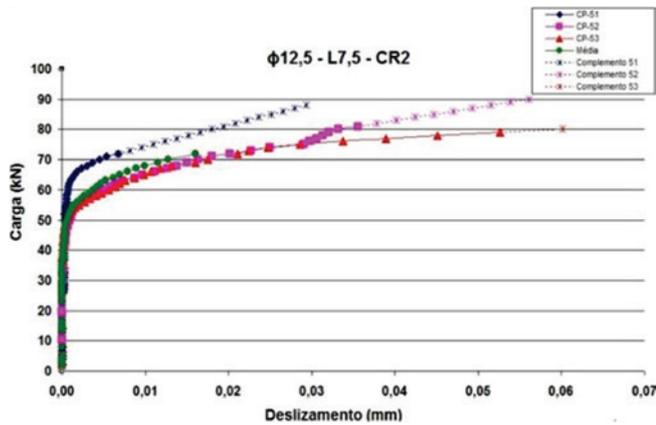


Figura 11c
Curvas carga-deslocamento dos ensaios dos modelos CR 12,5-7,5-2

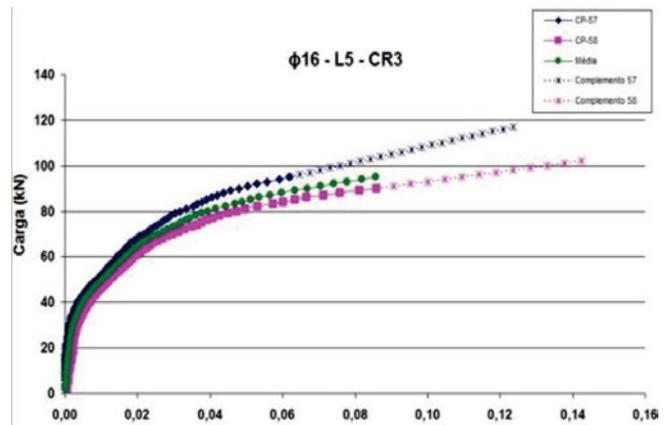


Figura 11d
Curvas carga-deslocamento dos ensaios dos modelos CR 16-5-3

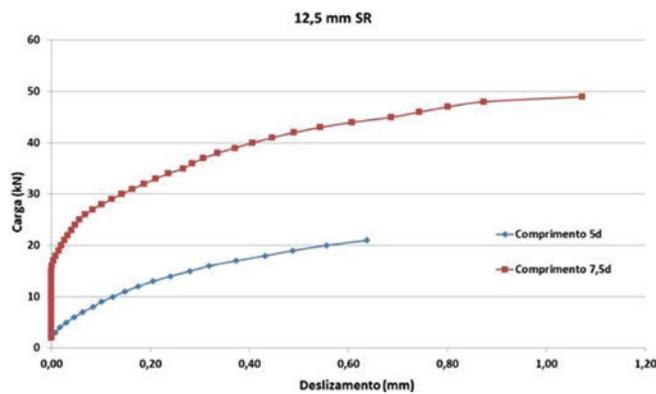


Figura 12
Influência do comprimento de colagem, modelos: 12,5-5-0 e 12,5-7,5-0

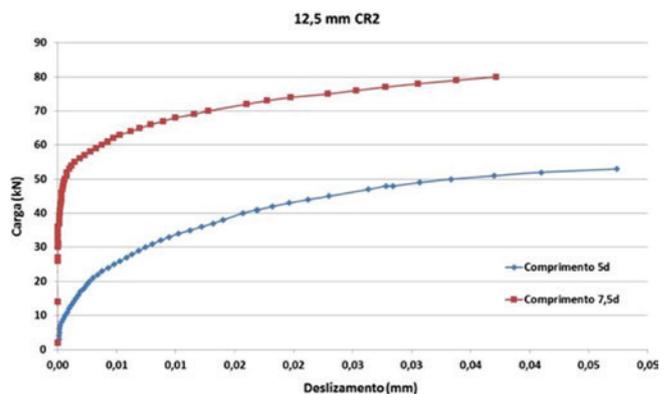


Figura 13
Influência do comprimento de colagem, modelos: 12,5-5-2 e 12,5-7,5-2

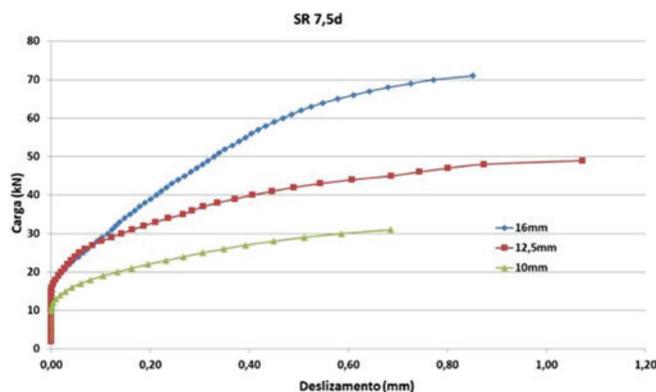


Figura 14
Influência do diâmetro da barra, modelos: 10-7,5-0; 12,5-7,5-0 e 16-7,5-0

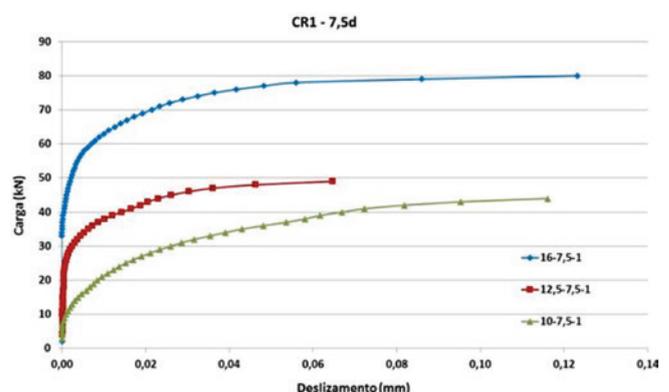


Figura 15
Influência do diâmetro da barra, modelos: 10-7,5-1; 12,5-7,5-1; 16-7,5-1

Figura 9 mostra o comportamento idêntico de ambas as vigas, ao longo do carregamento.

3.2 Resultados dos ensaios de arrancamento

Os modelos sem resina apresentaram ruptura por arrancamento, caracterizada pelo deslizamento da barra em relação ao concreto, com grandes deslocamentos.

Nos modelos com resina a ruptura deu-se por fendilhamento do concreto, caracterizada pela ruptura brusca do bloco de concreto e pequenos deslocamentos relativos entre a barra e o concreto, como ilustra a Figura 10. Observou-se também, em apenas um espécime, a ruptura por tração da barra de aço. Alguns exemplares apresentaram bolhas de ar na ligação colada levando, nestes casos, à ruptura por arrancamento.

As curvas típicas dos ensaios dos modelos SR e CR estão apresentadas nas Figuras 11a a 11d; estes gráficos também mostram

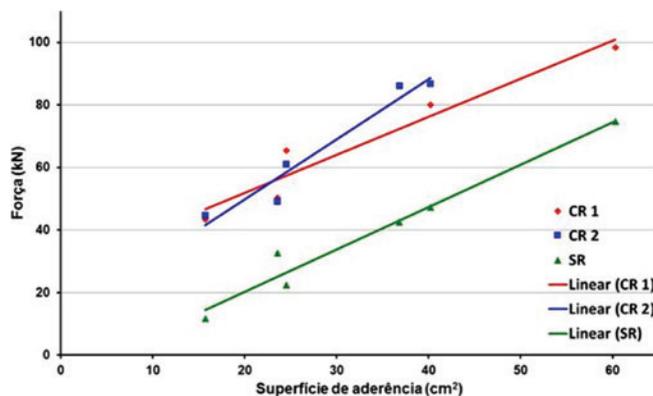


Figura 16 Força máxima-Superfície de aderência, modelos SR e CR

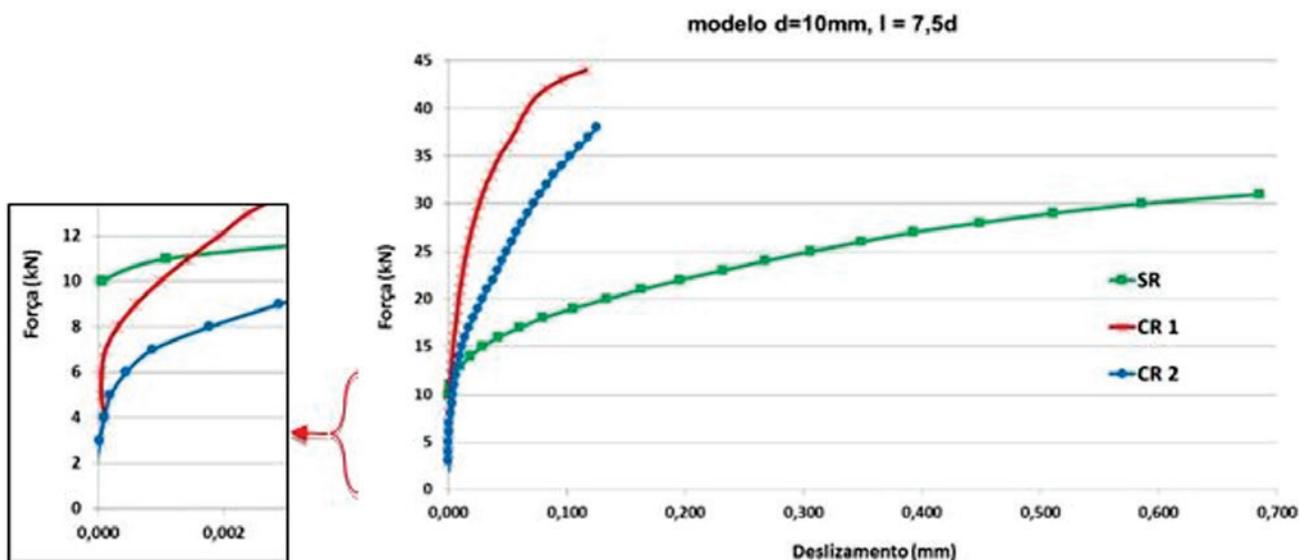


Figura 17 Curvas força-deslizamento, modelos: 10-7,5-0; 10-7,5-1; 10-7,5-2

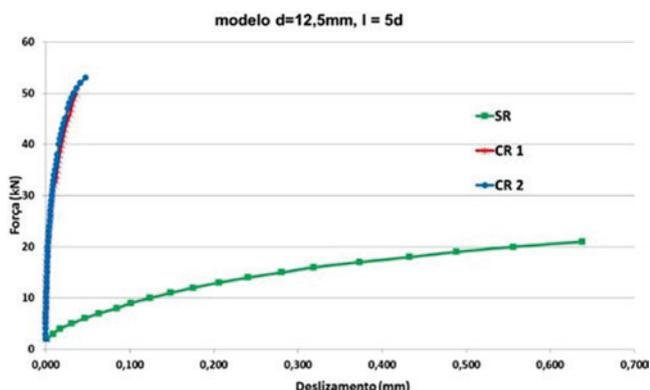


Figura 18 Curvas força-deslizamento, modelos 12,5-5-0; 12,5-5-1; 12,5-5-2

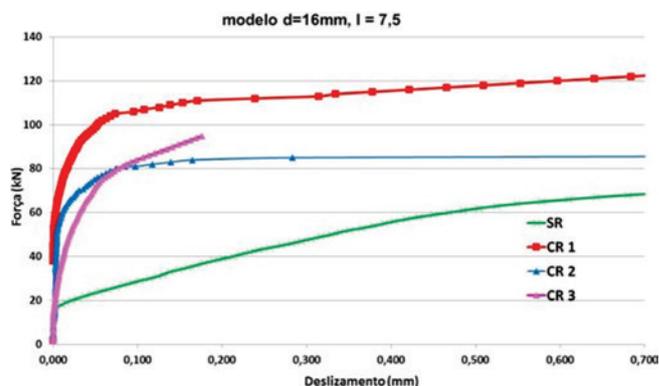


Figura 19 Curvas força-deslizamento, modelos 16-7,5-0; 16-7,5-1; 16-7,5-2; 16-7,5-3

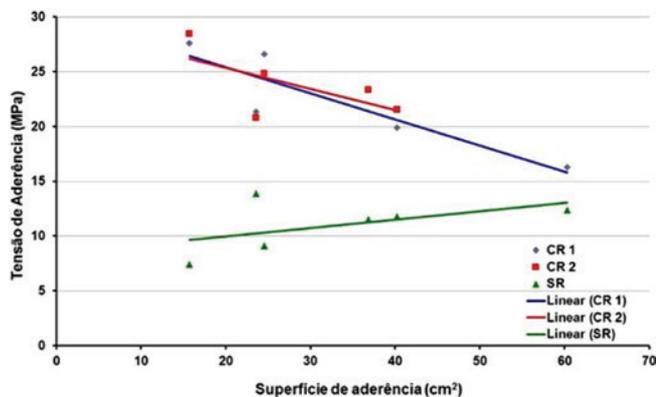


Figura 20
Tensão de aderência-Superfície de aderência, modelos SR e CR

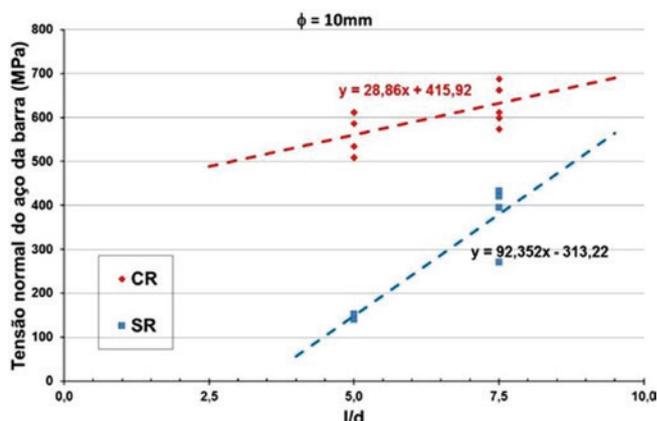


Figura 21
Tensão normal na barra - l / d, modelos d=10mm

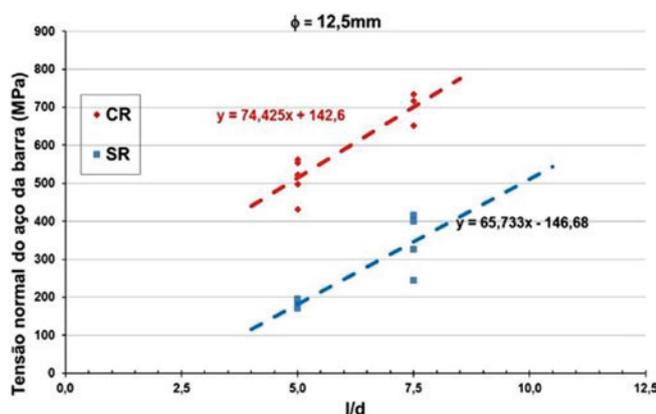


Figura 22
Tensão normal na barra - l / d, modelos d=12,5mm

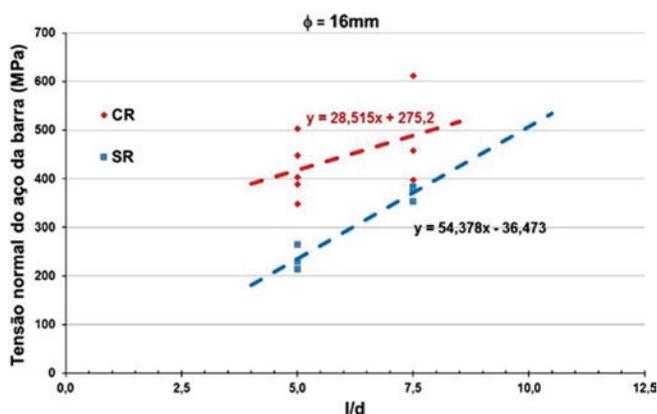


Figura 23
Tensão normal na barra - l / d, modelos d=16mm

a homogeneidade dos resultados. A Tabela 1 apresenta o resumo dos resultados obtidos, considerando o valor médio dos ensaios de três espécimes.

4. Discussão

A influência do comprimento de colagem pode ser vista nos gráficos das Figuras 12 e 13 onde para um mesmo diâmetro de barra, o aumento do comprimento de colagem conduziu a maiores valores de força de adesão e carga última em todos os modelos estudados.

Da mesma forma, a influência do diâmetro da barra pode ser vista nos gráficos das Figuras 14 e 15 onde para um mesmo comprimento de colagem, os valores da força de adesão e da carga última aumentaram quanto maior era o diâmetro da barra, em todos os modelos estudados. Estas constatações podem ser facilmente percebidas através da superfície de aderência, ou seja, a superfície de contato barra-concreto ou barra-resina-concreto, parâmetro único que relaciona o diâmetro da barra e o comprimento de colagem. A Figura 16, que relaciona a força máxima com a superfície de aderência indica que quando aumenta-se a superfície de aderência (diâmetro e comprimento de aderência), aumenta-se a

capacidade resistente última ao arrancamento. Tal fato também foi observado por Gurbuz [2], Souza [4], Felício [5] e Bouazaoui et al [8].

Os gráficos das Figuras 17, 18 e 19 exemplificam, respectivamente, o comportamento dos modelos: d=10mm, l = 7,5d ; d=12,5mm, l = 5d e d=16mm, l = 7,5d. Nestes gráficos verifica-se que a colagem com resina epóxi aumenta a rigidez da ligação aço-concreto e leva a maiores valores de carga última.

A colagem com resina proporciona também o aumento das tensões de aderência, como é possível verificar na coluna Incremento de Resistência da Tabela 1 e no gráfico da Figura 20. Neste gráfico, verifica-se que os modelos com resina possuem maiores valores de tensão de aderência quando comparados aos sem resina, e que os valores desta tensão diminuem com o aumento do diâmetro da barra e com o aumento do comprimento de colagem. Isto parece indicar que na ligação com resina epóxi, pequenos comprimentos já são suficientes para garantir a aderência e que maiores comprimentos talvez não contribuam para o desenvolvimento de tensões ao longo de todo o comprimento colado. Esta constatação também foi feita por Gurbuz [2]. Os valores das tensões de cisalhamento verificados nos ensaios de Fernandes [6] variaram de 16 a 29MPa, portanto, faixa compatível com os valores encontrados por Gurbuz [2].

Nos gráficos das Figuras 15 e 20, que compara os desempenhos dos modelos sem e com resina referentes às espessuras de 1 e 2mm, verifica-se que a variação na espessura da resina não afeta significativamente a capacidade última da ligação.

Com o objetivo de verificar a eficiência da colagem, foram construídos os gráficos apresentados nas Figuras 21 a 23, que relacionam os valores das tensões normais máximas nas armaduras com o valor de l/d . Essas tensões normais nas armaduras referem-se a F_{\max}/d , no caso dos modelos sem resina e F_{\max}/d_o no caso dos modelos com resina. Considerando a tensão limite de escoamento para o aço CA50, $f_y=500\text{MPa}$, e entrando-se nas equações das curvas de regressão linear apresentadas tem-se uma possível redução do comprimento de ancoragem da ordem de 67% para a barra de 10mm, 51% para a barra de 12,5mm e 20% para a barra de 16mm.

5. Conclusões

Tendo por base a técnica de colagem, os materiais utilizados e a metodologia de ensaios adotados neste estudo, os autores concluem que:

- A parcela da adesão é muito significativa nos modelos CR; nestes modelos os valores dos deslizamentos verificados para as cargas iniciais e médias foram extremamente baixas, quando comparadas com os modelos SR.
- Quanto ao modo de ruptura, todos os modelos SR romperam por arrancamento. Nos modelos CR a ruptura deu-se de forma brusca no concreto, considerado o elo mais fraco da ligação.
- Em todos os modelos – sem resina e com resina - o aumento do diâmetro de barra e do comprimento de colagem conduziram a maiores valores de força de adesão e carga última.
- A colagem com resina epóxi possibilita redução dos comprimentos de ancoragem das barras.
- As vigas apresentaram comportamento significativamente semelhante, apesar de suas configurações de ancoragem serem bastante diferentes. Isto reafirma a eficiência da colagem de barras com resina epóxi, visando a diminuição do comprimento de ancoragem necessário.
- A variação de espessura de resina epóxi de 1mm a 3mm não influenciou significativamente na ruptura, mas ainda requer novos estudos que avaliem o seu comportamento em serviço.
- Sugere-se o desenvolvimento de novas pesquisas que tenham por objetivo avaliar o comprimento de ancoragem de barras coladas com resina epóxi em elementos de concreto submetidos a diferentes esforços.

6. Agradecimentos

Esta pesquisa foi realizada no Laboratório de Estruturas da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ (Brasil). Os autores agradecem o apoio da CAPES, da FAPERJ e da Hilti Brasil.

7. Referências bibliográficas

- [1] McVay, M.; Cook, R. A.; and Krishnamurthy, K.. Pullout Simulation of Postinstalled Chemically Bonded Anchors. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 122, No. 9, Sept. 1996, pp. 1016-1024.
- [2] Gurbuz, T.; Ilki, A.. Pullout Performance of Fully and Partially Bonded Retrofit Anchors in Low-Strength Concrete. *ACI Structural Journal*, V. 108, nº1 (2011), pp. 61-70.
- [3] ICC International Code Council. AC308 Post-installed Adhesive Anchors in Concrete Elements, USA, 2014. <http://www.icc-es.org/>.
- [4] Souza, R. H.F. Análise do comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão e ao esforço transversal, Lisboa, 1990, Tese (doutorado), Instituto Superior Técnico, 320p.
- [5] Felício, M. D. Eficiência da Ligação Aço-Concreto Utilizando Colagem com Resina Epóxi. Rio de Janeiro, 1995, Dissertação (mestrado), Universidade Federal Fluminense, 159p.
- [6] Fernandes, D.V..Estudo da aderência de barras de aço coladas ao concreto com resina epóxi. Rio de Janeiro, 2011, Dissertação (mestrado), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 160p.
- [7] RILEM, FIP, CEB, 1973, Essai portant sur l'adhérence des armatures du béton. 1. Essai par flexion (7-II-28D). 2. Essai par traction (7-II-128), Recommandations Provisoires. *Matériaux et Constructions*, (mars – avr), v. 6, n. 32, pp. 96–105.
- [8] Bouzaoui, L.; LI, A. Analysis of steel/concrete interfacial shear stress by means of pull out test. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 28. Elsevier. 2008. pp. 101–108.