

08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

AVALIAÇÃO DA ENERGIA DE FRATURAMENTO EM VIGAS REFORÇADAS EXTERNAMENTE COM COMPÓSITO DE FIBRAS DE CARBONO

Danilo de Souza Salgueiro Ferreira¹ – danilo.ssf@hotmail.com

Eduardo Martins Sampaio¹ - edu.msampaio@gmail.com

Joaquim Teixeira de Assis¹ – joaquim@iprj.uerj.br

Carlos Ivan Ribeiro de Oliveira¹ – carlosivanr@gmail.com

¹ Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico – Nova Friburgo, RJ, Brazil

Resumo. A intervenção em estruturas de concreto torna-se uma opção quando são necessários reparos emergenciais ou há necessidade do aumento da capacidade de carga não prevista no projeto inicial. Uma alternativa efetiva é o reforço dessas estruturas com os materiais compósitos de fibra de carbono colados externamente na região submetida à tensão de tração. Dessa foi proposto no presente estudo a moldagem dos corpos de prova prismáticos de concreto, que foram analisadas em configurações distintas a fim de avaliar o comportamento de elementos com falhas críticas quando submetidos a esforços de flexão em situação reforçada e não reforçada com compósitos de fibra de carbono. Um tratamento superficial de lixamento foi realizado a fim de conferir uniformidade à geometria dos corpos de prova, além de proporcionar melhores características de adesão da resina epóxi à face submetida à colagem do reforço de compósito. Também foi realizada uma análise com rugosímetro para que se possa relacionar a rugosidade das superfícies de concreto lixadas e a capacidade de adesão do reforço compósito nos corpos de prova. A energia de fraturamento, que constitui um importante parâmetro de caracterização, foi obtida através do ensaio de flexão em três pontos. Foi verificado que a resistência a flexão dos elementos reforçados é superior a dos elementos não reforçados em um concreto projetado para resistência característica média de 30 MPa aos 28 dias de cura.

Palavras-chave: Reforço de concreto, Materiais compósitos, Fibras de carbono, energia de fraturamento.

1. INTRODUÇÃO

A reabilitação de estruturas na construção civil tornou-se uma preocupação crescente nas últimas décadas devido à necessidade de garantir que estruturas antigas consigam manter-se em adequado nível de funcionamento ou devido à necessidade do aumento na capacidade de carga. Diversos fatores como esforços que não estavam previstos no projeto inicial, seleção de materiais com qualidade inadequada às necessidades da estrutura ou até mesmo falhas na

execução do projeto contribuem para que seja necessário um intervenção por meio do reforço (CABRAL-FONSECA *et al.*, 2018). O concreto é um importante aliado da construção civil desde a antiguidade, mas apesar de ser um material versátil, enfrenta alguns problemas, principalmente em relação ao reajuste de sua estrutura ou aumento da capacidade de carga, uma vez que a estrutura já está consolidada (BEBER, 2003).

As regiões tracionadas dos concretos estão sujeitas à trincas, que muitas vezes são responsáveis pela iniciação da falha da estrutura. O surgimento e propagação dessas trincas são resultados de processos físicos explicados pela lei da conservação de energias, onde se considera o concreto como um material homogêneo (SANTOS, 2015). Devido à composição do concreto geralmente ser uma mistura de cimento Portland, agregados graúdos e miúdos, ela está sujeita à fissurações, trincas e apesar de ser considerada uma estrutura contínua e homogênea na teoria, na prática está longe disto. Microfissuras, vazios e regiões com diferentes distribuições de materiais criam heterogeneidades ideais para concentração de tensões que resultam na ruptura do elemento (GUETTI; RIBEIRO; MANTILLA, 2006).

Além da resistência à compressão, o módulo de elasticidade e resistência à tração, a energia de faturamento constitui um importante parâmetro para a caracterização deste tipo de material. No que tange ao efeito de escala em projetos de estrutura aliado à adequação às normas de projeto, é necessário determinar a energia de faturamento, que é a área sob a curva tensão x deformação (PESSÔA, 2007).

Uma técnica de reparo bastante utilizada na construção civil é a colagem externa de polímeros reforçados com fibras de carbono por meio de um adesivo epoxídico. As resinas epóxis são responsáveis por transferir as tensões dos elementos de concreto para os compósitos reforçados com fibras por dois mecanismos distintos. A ligação química que é uma reação do substrato de concreto com a resina e as ligações mecânicas, devido a heterogeneidade intrínseca da pasta de concreto (microfissuras e poros são bons exemplos). Essa heterogeneidade ainda pode ser alterada por meio de um tratamento de superfície como o jateamento ou esmerilhamento (TATAR *et al.*, 2018).

O objetivo deste trabalho é a avaliação da energia de fraturamento de elementos prismáticos de concreto sem reforço e com reforço de compósito de fibras de carbono colados externamente na face submetida à tração dos corpos de prova através do ensaio de flexão de três pontos. Também será realizado um estudo das propriedades do substrato, o qual receberá o reforço de compósito, por meio de análise de rugosidade.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Corpos de prova

Para avaliar a resistência à compressão do concreto formulado para este estudo, foram moldados 14 corpos de prova cilíndricos com altura de 20 cm e diâmetro de 10 cm, conforme especificado pela norma NBR 5738 (2008). É proposto caracterizar um total de 32 elementos prismáticos de concreto em 4 configurações distintas por meio do ensaio de resistência à flexão de três pontos, sendo 8 elementos para cada configuração, como pode ser visto esquematizado na figura 1.

A primeira configuração é denominada configuração de controle (V1) e os elementos não receberão nenhum tipo de reforço externo, tratamento superficial e não haverá entalhe. A obtenção de dados nessa etapa visa à padronização para posterior comparação com as outras configurações. A segunda configuração (V2) é denominada viga entalhada e os elementos receberão um entalhe na metade do seu comprimento e será simulado um caso de falha crítica.

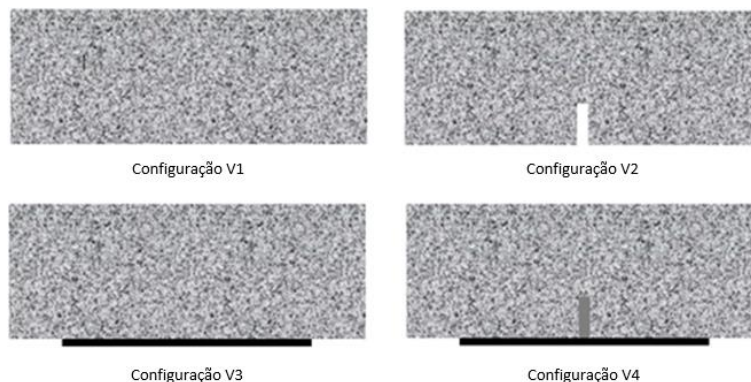


Figura 1 - Esquemática das corpos de prova prismáticos de concreto.

A terceira configuração (V3) é denominada viga reforçada e consiste em submeter os elementos de concreto à um tratamento superficial de lixamento e posterior reforço de material compósito de forma que não haja nenhuma falha e que toda a capacidade de resistir ao esforço de flexão da estrutura reforçada seja explorada. A quarta configuração (V4) é denominada viga entalhada reforçada e assim como a configuração V3, receberá um tratamento superficial de lixamento e posterior reforço de material compósito para avaliar a contribuição do mesmo no caso de um elemento com falha crítica. O entalhe deverá ser preenchido com a mesma resina epóxi responsável pela colagem do compósito na face do corpo de prova.

2.2 Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova projetados para este estudo foram confeccionadas com a utilização do cimento do tipo CP II – 32 F com resistência à compressão característica de 32 MPa aos 28 dias de cura conforme exigido pela norma NBR 11578 (1991) para cimento Portland composto. O agregado graúdo tem granulometria média entre 7,05 mm e 3,23 mm, selecionados em peneiras de construção civil denominadas peneiras de Café e Arroz com aro de polímero de 55 cm de diâmetro e malha de aço.

A composição do concreto foi desenvolvida através do método ABCP para dosagem de concretos e as proporções definidas seguem na tabela 1. Foram necessários um total de 30 ℓ de concreto para a moldagem de todos os corpos de prova cilíndricos e prismáticos, sendo este volume superdimensionado para que se alcançasse o número mínimo de corpos de prova previstos, considerando que no processo de concretagem existem altas taxas de perda de material. O aditivo Bautech Polifuncional 3 ® foi adicionado à composição do concreto. A proporção especificada pelo fabricante para todos os tipos de CP II é entre 0,80% e 0,85% do peso do cimento de acordo com as necessidades exigidas para o traço, como por exemplo, a trabalhabilidade (CONSTRUCHEMICAL, 2014).

Tabela 1 - Traço para concreto com resistência característica prevista de 30 MPa a 28 dias de cura.

Materiais	Padrão / m³	0,030 m³
Cimento CP II – 32 F	523,26 kg	15,69 kg
Areia	782,07 kg	23,46 kg
Brita	806,26 kg	24,19 kg
Água	225,00 kg	6,75 kg

A escrita do traço é 1:1,50:1,54:0,43.

Os corpos de prova cilíndricos em processo de cura imersa podem ser vistos na figura 2.



Figura 2 - Corpos de prova cilíndricos moldados para caracterização da resistência à compressão média do concreto utilizado.



Figura 3 – Corpos de prova prismáticos após retirada do molde.

2.3 Procedimento de caracterização

A determinação da energia de fratura será realizada através do ensaio de resistência à flexão de três pontos em corpos de prova prismáticos nas configurações supracitadas de acordo com a representação da figura 4.

As dimensões do corpo de prova são $L = 101 \text{ mm}$, $b = d = 38 \text{ mm}$. Segundo as recomendações do comitê RILEM TC 89-FMT (1991), o comprimento a_0 deve ser no máximo 0,5 a altura d , a largura e do entalhe deve ser a mínima possível não excedendo em 0,5 vezes o tamanho máximo do agregado graúdo utilizado e a razão s/d deve ser pelo menos igual a 2,5. A velocidade de carregamento deve conduzir o material ao rompimento após aproximadamente 60 segundos de ensaio, conforme sugerido pelo comitê RILEM 50 – Fracture Mechanics of Concrete (1985).

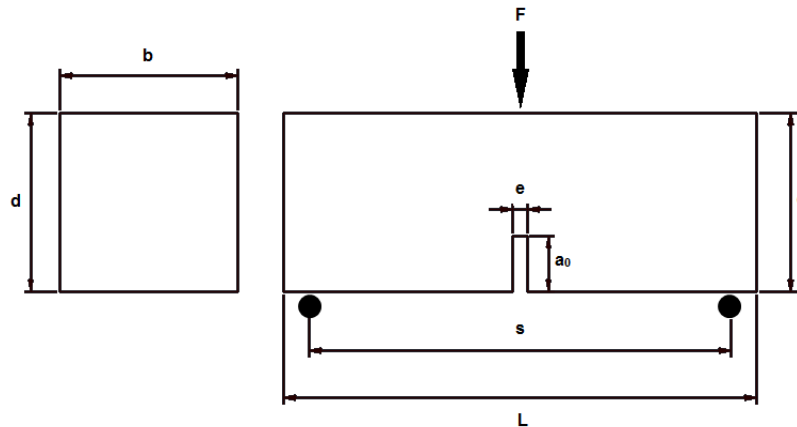


Figura 4 – Esquemática do ensaio de resistência à flexão de três pontos.

2.4 Dimensões críticas de colagem

O comprimento do reforço foi definido com base na razão entre a metade do vão livre, S_f , e comprimento não colado, L_u , estudada por El-Mihilmy e Tedesco (2001, apud PIMANMAS; PORNPONGSAROJ, 2004). É estabelecido que a razão L_u/S_f deve estar compreendida entre 0,013 e 0,15.

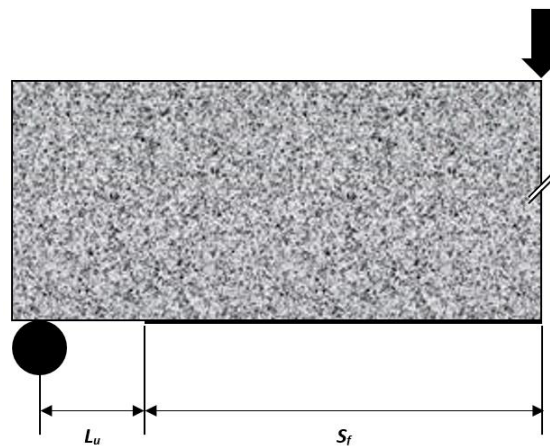


Figura 5 – Esquemática dos critérios adotados para determinação do comprimento de reforço.



Figura 6 – Corpo de prova de concreto reforçado com material compósito de fibra de carbono

2.5 Análise do perfil de rugosidade

Um estudo com o objetivo de registro do perfil de rugosidade das superfícies dos corpos de prova foi conduzido segundo especificações da norma ISO 4288 (1996) (*Geometrical Product Specifications - Surface texture: Profile method -- Rules and procedures for the assessment of surface texture*). Foram selecionados 5 corpos de prova aleatoriamente no lote para realizar a análise de superfície. Duas regiões em pontos distintos para cada corpo de prova foram escolhidas e demarcadas de forma que fosse realizado um estudo anterior e posterior ao tratamento superficial de lixamento. A área de análise utilizada neste estudo foi de 3 mm x 3 mm.

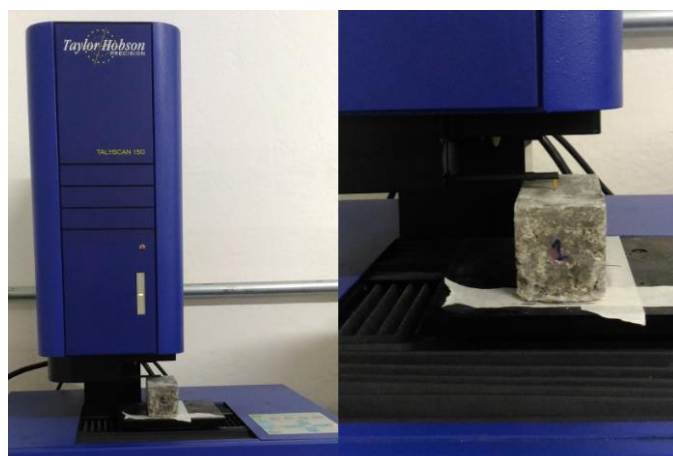


Figura 7 – Análise da rugosidade superficial do substrato de concreto.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação da resistência à compressão

Optou-se por realizar um ensaio de resistência à compressão em 2 corpos de prova com período de cura de 7 dias a fim de verificar a evolução da resistência à compressão máxima obtida para o traço estudado. Este resultado pode ser visto na tabela 2. A referência para os corpos de prova cilíndricos é dada por CPXX, onde XX são os dias em cura imersa, caracterizados em 07 ou 28 dias.

Tabela 2 – Resistência à compressão média concreto.

Referência	Resistência à compressão (MPa)
CP07	12,45 ± 0,96
CP28	25,59 ± 1,94

A partir dos resultados apresentados fica evidente que o traço de referência não obteve a resistência à compressão de 30 MPa como esperado. Ao realizar o teste de consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone, seguindo as especificações da norma NBR NM 67 (1998), percebeu-se que houve total desmoronamento da massa impedindo que fosse realizada a medida. Era esperado um abatimento entre 60 e 80 mm, porém a alta fluidez do traço gerou seu desmoronamento, sendo desconsiderado este teste.

Acredita-se que justificativa para tal fato leva em consideração um erro na etapa de adição de materiais no momento da concretagem, onde foi adicionada maior quantidade de

água a qual estava previsto nos cálculos de dosagem. É conhecido da literatura que a alteração do fator água/cimento devido à adição de água na massa do concreto varia inversamente com o valor da tensão de compressão máxima alcançada pelo concreto segundo a Lei de Abrams (HAACH; VASCONCELOS; LOURENÇO, 2011). Neste caso, a maior quantidade de água adicionada equivocadamente pode ter acarretado uma menor resistência à compressão final do traço de referência. Este fato isolado não inviabiliza a utilização deste traço para o estudo proposto, pois segundo a norma NBR 6118 (2014), concretos com resistência à compressão superior aos 20 MPa são adequados para a finalidade estrutural.

3.2 Resistência à flexão de três pontos.

Os ensaios de resistência à flexão de três pontos foram realizados segundo recomendações do comitê RILEM TC 89-FMT (1991) em um total de 8 corpos de prova para cada configuração. Os resultados são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Resultados obtidos para a resistência à flexão dos corpos de prova prismáticos.

Configuração	Força de ruptura (N)	Tensão nominal (MPa)	Deflexão na ruptura (mm)
V1	2963,39 ± 204,82	7,69 ± 0,53	0,68 ± 0,17
V2	1447,05 ± 126,08	3,76 ± 0,33	0,36 ± 0,17
V3	6915,85 ± 1380,47	17,96 ± 3,56	1,29 ± 0,36
V4	9224,79 ± 1486,63	23,96 ± 3,86	1,20 ± 0,48

Quando induzido um entalhe no prisma de concreto, houve a diminuição de aproximadamente 48,89% da tensão de ruptura em comparação às amostras que não possuíam o entalhe. Tal comportamento era esperado, pois a presença do entalhe além de diminuir a área de seção transversal perpendicular à direção de aplicação do carregamento, introduz uma zona de concentração de tensões ideais para formação de fissuras (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2012).

Para o elemento na configuração V3, reforçado com compósito de fibra de carbono, houve um aumento da tensão máxima suportada de aproximadamente 2,33 vezes em relação aos elementos de controle na configuração V1.

Quando aplicado o reforço em um elemento com falha crítica, percebeu-se que toda a capacidade resistente da viga foi reestabelecida. Além disso, os elementos na configuração V4 apresentaram cargas superiores em torno de 133,41 % em relação aos elementos da configuração V3, que não possuíam nenhum tipo de falha. É possível notar que o reforço também aumentou a rigidez no elementos da configuração V4 em relação a configuração V3, pois a deflexão na ruptura foi cerca de 6,97% menor. O preenchimento do entalhe com a resina aumentou a área superficial de contato do reforço com a estrutura de concreto, colaborando assim para uma redistribuição de tensões de forma mais eficiente. Acredita-se também que a o preenchimento do entalhe resultou em uma propagação de fissuras tardia elevando assim os valores de cargas que provocaram a falha do elemento (MOSTOFINEJAD; SHAMELI, 2013).

A tabela 4 mostra a energia de faturamento G_F média obtida a partir da área sob a curva tensão x deformação verificada no processo de ruptura das vigas. Apenas as vigas com entalhe são avaliadas para energia de faturamento, como proposto pelo comitê RILEM 50 – Fracture Mechanics of Concrete (1985) por meio do método do trabalho de faturamento.

Tabela 4 – Resultados obtidos para a energia de faturamento dos corpos de prova prismáticos.

Configuração	Peso da viga (N)	Área sob o gráfico (N.mm)	Energia de faturamento (N/m)
V2	3,360 ± 0,088	144,48 ± 54,83	144,11 ± 54,13
V4	3,410 ± 0,057	3835,88 ± 1784,73	3798,85 ± 1767,01

Assim como a resistência à flexão, é observado o aumento expressivo da energia de faturamento dos elementos da configuração V4 em relação a configuração V2. A energia de faturamento para os elementos sem reforço estão em concordância com outros trabalhos como os observados por Pessoa (2007). Para os elementos com reforço, não foi evidenciado a existência de um estudo similar para comparação.

4 CONCLUSÕES

Em relação a preparação dos corpos de prova, conforme previsto, a resistência à compressão do concreto alcançou maior valor ao prosseguimento de sua cura, porém este valor foi menor que o especificado em projeto devido à adição de água em quantidade inadequada no momento da primeira concretagem.

Para ambos os casos onde houve a aplicação do reforço, verificou-se o aumento da tensão de ruptura dos corpos de prova se comparados com os casos onde não foi aplicado nenhuma espécie de reforço. Dessa forma é comprovada a eficiência do método de reforço por colagem externa de materiais compósitos em estrutura de concreto tanto para aumentar sua capacidade resistente como para corrigir falhas de projeto ou danos estruturais.

No que se diz respeito ao programa experimental, sua eficácia também pode ser comprovada para avaliar a energia de faturamento de elementos de concreto reforçados com material compósito de fibra de carbono devido ao expressivo aumento observado quando comparadas as configurações V2 e V4.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERENCES

- Beber, A. J. (2003), “*Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbon*” Tese de doutorado – PPGEC/UFRG, Porto Alegre.
- Cabral-Fonseca, S. Correia, J.R. Custódio, J. Silva, H.M. Machado, A.M. Souza, J. (2018), “Durability of FRP - concrete bonded joints in structural rehabilitation: a review”. *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, 83, 153-167.
- Callister Junior, W. D.; Rethwisch, D. G. (2012), *Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução*. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2012. 817 p.
- Construchemical. (2014), “Hiperplastificantes e superplastificantes para concreto alta performance com apelo sustentável”. Agnelo Editora e Comércio Ltda, Santos.
- Guetti, P. C.; Ribeiro, G. O.; Mantilla, E. V. C. (2006), “Determinação experimental de energia de fraturamento do concreto”, VI SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO. Belo Horizonte, 1005 - 1067.
- Haach, V. G.; Vasconcelos, G.; Lourenço, P. B. (2011), “Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars”. *Construction And Building Materials*, 25, 2980-2987.

- Mostofinejad, D.; Shameli, S. M. (2013), Externally bonded reinforcement in grooves (EBRIG) technique to postpone debonding of FRP sheets in strengthened concrete beams. *Construction And Building Materials*, 38, 751-758.
- Pessoa, J. R. C. (2007), “*Análise numérico-experimental de estruturas de concreto com utilização da energia de fraturamento*”, Dissertação de mestrado – IPRJ/UERJ, Nova Friburgo.
- Pimanmas, A.; Pornpongsaroj, P. (2004), “Peeling behaviour of reinforced concrete beams strengthened with CFRP plates under various end restraint conditions”. *Magazine Of Concrete Research*, 56, 73-81.
- Santos, A. H. A. (2015), “*Estudo experimental do efeito de escala em estruturas de concreto utilizando correlação de imagem digital*”. Tese de doutorado – PPGEE/UFMG, Belo Horizonte.
- Tatar, J. Brenkus, N.R. Subhash, G. Taylor, C.R. Hamilton, H.R. (2018), “Characterization of adhesive interphase between epoxy and cement paste via Raman spectroscopy and mercury intrusion porosimetry”. *Cement and Concrete Composites*, 88, 187-199.

EVALUATION OF FRACTURING ENERGY ON EXTERNALLY REINFORCED BEAMS WITH CARBON FIBER COMPOSITES

Abstract. *Intervention in concrete structures becomes an option when emergency repairs are necessary or there is a need to increase the load capacity not foreseen in the initial design. An effective alternative is the reinforcement of these structures with carbon fiber composites bonded externally in the region subjected to tensile stress. From this, it was proposed in the present study the molding of prismatic concrete specimens, which were analyzed in different configurations in order to evaluate the behavior of elements with critical failure when submitted to flexural stresses in a reinforced and non - reinforced situation with fiber composites carbon. A surface sanding treatment was performed in order to give uniformity to the geometry of the specimens, as well as to provide better adhesion characteristics of the epoxy resin to the face submitted to the bonding of the composite reinforcement. A rugosimeter analysis was also performed to relate the roughness of the sanded concrete surfaces and the adhesion capacity of the composite reinforcement in the specimens. The fracturing energy, which is an important characterization parameter, was obtained through the three point bending test. It was verified that the flexural strength of the reinforced elements is superior to that of the non-reinforced elements in a concrete designed for average resistance resistance of 30 MPa at 28 days of cure.*

keywords: *Concrete Reinforcement, Composite Materials, Carbon Fiber, Fracturing Energy.*