

ESTUDO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO REFORÇADAS COM LAMINADO DE FIBRA DE CARBONO

(STUDY OF MECHANICAL RESISTANCE TO FLEXION OF CONCRETE BEAMS REINFORCED WITH CARBON FIBER LAMINATE)

D. S. S. Ferreira¹; M. C. Lima¹, R. H. Silva¹, E. M. Sampaio¹, J. T. de Assis¹.

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

Rua Bonfim, nº 25 – Vila Amélia – Nova Friburgo – RJ. CEP: 28630-050¹.

danilo.ssf@hotmail.com

Resumo

No reparo de vigas de concreto submetidas à flexão, uma alternativa efetiva a demolições ou aplicação de novas camadas de concreto é a colagem externa de materiais compósitos de fibra de carbono (PRFC) com adesivos a base de epóxi. Neste estudo foram produzidos corpos de prova prismáticos de concreto, moldados em configurações distintas, sendo submetidos ao ensaio de resistência à flexão. As duas configurações principais consistiam em corpos de prova íntegros ou com um entalhe na metade de seu comprimento. Quando introduzido o entalhe, os elementos de concreto experimentaram uma redução na resistência à flexão de aproximadamente 50%. O preenchimento do entalhe com um adesivo foi capaz de aumentar a resistência à flexão em até 52%. Quando os corpos de prova íntegros foram reforçados com o PRFC, houve aumento de resistência à flexão em até 3,14 vezes, assim como o aumento de até 3,45 vezes quando foi reparada a falha.

Palavras chave: Concreto, reparo, materiais compósitos.

Abstract

In the repair of concrete beams subjected to bending, an effective alternative to demolition or application of new concrete layers is the external bonding of composite materials of carbon fiber (PRFC) with epoxy-based adhesives. In this study, prismatic concrete specimens were produced, molded in different configurations, and subjected to the flexural strength test. The two main configurations consisted of intact test specimens or with a notch in half their length. When the notch was introduced, the concrete elements experienced a reduction in bending strength of approximately 50%. Filling the notch with an adhesive was able to increase the flexural strength up to 52%. When the intact specimens were reinforced with the PRFC, there was an increase in flexural strength of up to 3.14 times, as well as an increase up to 3.45 times when the failure was repaired.

Keywords: Concrete, repair, composite materials.

INTRODUÇÃO

Devido a versatilidade em assumir diferentes formas, baixo custo e boas propriedades como resistência à compressão, o concreto é um dos materiais estruturais mais utilizados no

mundo[1]. Apesar disto, alguns fatores podem afetar o seu desempenho em serviço. O aumento de cargas não previsto no projeto, alterações ambientais e o envelhecimento estrutural diminuem sua vida útil. Em alternativa a demolições e alterações radicais na estrutura, a aplicação de um reforço externo pode restaurar sua capacidade de suportar cargas [2].

Em relação a reforços ou a reabilitação de estruturas consolidadas, existem materiais capazes de suprir necessidades em recuperação estrutural. Argamassas com sílica ativa e chapas de aço coladas externamente são algumas soluções clássicas [3]. Uma opção relativamente atual são os Polímero Reforçados com Fibras (PRF). Comparado a outros materiais, apresentam vantagens como alta resistência mecânica, boa durabilidade em ambientes quimicamente agressivos, baixo peso, facilidade e rapidez de instalação [4]. Os PRF mais comumente utilizados possuem em sua composição as fibras de aramida (PRFA), fibras de basalto (PRFB), fibras de carbono (PRFC) e fibra de vidro (PRFV) [5].

Esta técnica baseia-se na união de tecidos, placas ou perfis de PRF através da colagem ou inserção de um adesivo na superfície do elemento de concreto. Pode ser realizado em vários tipos de concreto, alvenarias, estruturas de madeira e até estruturas metálicas. Quanto ao reforço estrutural à flexão, um dos principais métodos de instalação mundialmente conhecido como *Externally Bonded Reinforcement* (EBR) [6].

É uma prática difundida na intervenção em estruturas de concreto. A invasão é reduzida e a instalação é conduzida de forma fácil e rápida se comparada a outras técnicas de reforço. Seu sucesso depende da ação conjunta de todo o sistema, com destaque para a durabilidade da interface adesiva estabelecida entre o substrato de concreto e o material compósito que ocorre por meio de um adesivo, geralmente uma resina epóxi [7].

É necessário um preparo da superfície do substrato para que se atinja boas condições de adesão, pois sua ausência pode afetar negativamente a eficiência do reforço [8]. A adesão é dependente de muitos fenômenos que podem estar presentes na interface de reparo, como por exemplo, as interações físicas e químicas, além dos mecanismos de interligação mecânica alcançados pelo nível de rugosidade superficial. O tratamento de superfície tem como objetivo eliminar substâncias que impeçam a correta adesão do adesivo com o substrato assim como aumentar a área de contato superficial por meio da rugosidade [9].

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo o estudo da resistência mecânica à flexão de corpos de prova prismáticos em condições de reparo e reforço. Foi realizado um tratamento de lixamento na superfície de colagem para que fosse garantido melhores condições de adesão do reforço à superfície do concreto.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

A preparação dos corpos de prova foi realizada com um concreto composto por cimento Portland CP II F 32, areia média e brita 0 [10] provenientes de uma indústria de concreto localizada na cidade Nova Friburgo – RJ, sem sofrer qualquer processo de beneficiamento ou cominuição. No amassamento de concreto foi utilizada água fornecida pela concessionária Águas de Nova Friburgo [11].

O tecido utilizado para a fabricação do reforço foi a fibra de carbono LT450-C10-C produzida pela Devold AMT[®]. Para laminação do reforço, foi utilizada a resina de Laminação Pipe Fix[®]. Para a colagem do reforço, foi utilizada o adesivo estrutural NVT 201E[®] fornecido pela Novatec soluções em reparos[®]. Este material geralmente é utilizado em intervenção e reparos de estruturas metálicas, como colagem de chapas, reparo de dutos, nivelador de superfície, revestimento corrosivo e outros. A utilização em reparos de concreto é avaliada pela primeira vez neste estudo.

Métodos

O programa experimental teve a finalidade de avaliar o comportamento dos elementos prismáticos de concreto em 5 configurações distintas a partir do ensaio de resistência à flexão de três pontos. Essas configurações são apresentadas na figura 1. A configuração (V1) não recebeu nenhum tipo de tratamento superficial ou aplicação de reforço. Os elementos da segunda configuração (V2) receberam um entalhe na metade do seu comprimento no intuito de simular um caso de falha crítica. A terceira configuração (V3) consistiu em submeter os elementos de concreto à um tratamento superficial de lixamento e posterior reforço de material compósito sem a existência de nenhuma falha.

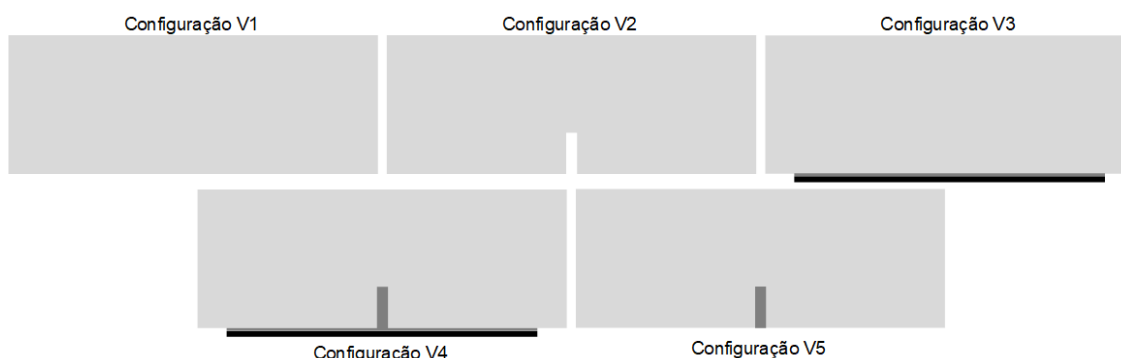


Figura 1 - Representação esquemática dos corpos de prova fabricados

Na quarta configuração (V4) um entalhe foi realizado e preenchido com o adesivo. A superfície do corpo de prova recebeu um tratamento superficial de lixamento e o reforço de material compósito foi colado. A quinta configuração (V5) concentrou-se em uma condição onde apenas os entalhes foram preenchidos com o adesivo estrutural NVT 201E®.

Fabricou-se 2 lotes de corpos de prova de concreto com a mesma composição, sendo cada lote composto por 32 amostras, e a cada 8 corpos de prova, foi atribuído uma configuração conforme a figura 1. Os elementos de concreto em seguem as recomendações do comitê RILEM TC 89 – FMT de 1991 [12], onde a largura (b_p) e altura (d_p) não devem ser menores que pelo menos 3 vezes o tamanho máximo do agregado graúdo d_a , que foi de 7,07 mm. A espessura do entalhe e não deve exceder em $0,5d_a$ e a razão a_0/d_p de estar compreendida entre 0,15 e 0,5.

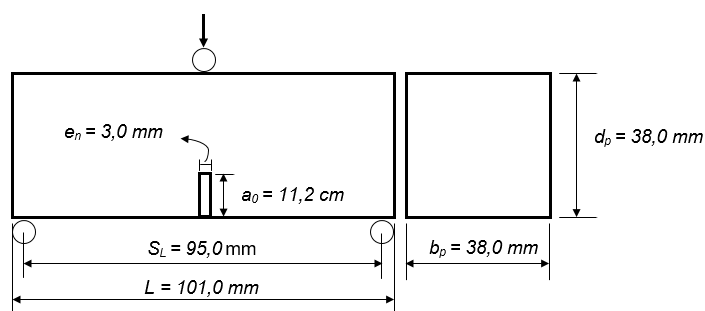


Figura 2 - Dimensões padronizadas do modelo de viga

Dosagem do concreto

Utilizou-se o método proposto pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Estipulou-se uma resistência à compressão média (F_{ck}) de 30 MPa aos 28 dias de cura. Com a curva de Abrams, definiu-se a relação água/cimento de 0,43 [13]. Para avaliar a resistência à compressão do traço de referência, fabricou-se 14 corpos de prova cilíndricos seguindo a norma NBR 5738. O abatimento de tronco de cone considerado para o cálculo foi entre 60 e 80 mm e o ensaio foi realizado segundo a norma NBR NM 67. Verifica-se na tabela 1 a quantidade dos materiais utilizados para um traço padrão de 1 m³ utilizado como referência. A escrita do traço é 1:1,49:1,54:0,43.

Tabela 1 - Quantidades de materiais para o traço de referência

Material	Unidade	1 m ³
Cimento CP II F 32	Kg	523
Areia	Kg	782
Brita 0	Kg	806
Água	Kg	225
Bautech polifuncional 3®	Kg	4,18

A introdução do aditivo Bautech polifuncional 3[®] teve como objetivo promover o aumento de resistência mecânica e melhorar as propriedades de plasticidade para que fosse facilitada a aplicação da massa de concreto nos moldes [14].

Desenvolvimento do reforço

O reforço desenvolvido empiricamente foi um laminado compósito de matriz polimérica com duas camadas de tecido de fibra de carbono com as fibras orientadas a 90°/0°. O processo de fabricação foi laminação manual, como visto na figura 3. As propriedades em flexão do material compósito de reforço seguiu a norma ASTM D 7264 e podem ser vistas na tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades em flexão do material compósito laminado

Módulo de elasticidade em flexão (GPa)	Resistência à Flexão (MPa)	Carga Máxima (N)	Deslocamento Máximo (mm)
32,81 ± 1,83	459,05 ± 28,86	532,66 ± 37,18	1,44 ± 0,10



Figura 3 - Etapas de laminação do reforço e reforço cortado

Após a laminação, o conjunto foi inserido em uma bolsa para aplicação de vácuo durante 6 horas, com o intuito de obter um material compósito com maior teor de fibras e melhores propriedades mecânicas [15]. Além disso, o processo contribui para eliminação de voláteis inibindo a formação de bolhas que podem prejudicar as propriedades mecânicas do compósito [16]. Após 24 horas em cura, a placa do material compósito foi retirada da bolsa e levada à máquina de corte.

Procedimento de colagem do reforço

Para garantir uma superfície adequada para a colagem, realizou-se um preparo superficial. Dentre os preparos apresentados pela literatura [9,17], apenas 3 estavam disponíveis: jateamento, escova giratória de cerdas metálicas e lixamento. Em testes preliminares, o lixamento foi escolhido, pois os outros dois procedimentos resultaram em perda das dimensões dos corpos de prova. Foi utilizada uma lixadeira circular com lixa d'água grão 24 a 2200 rpm, seguindo recomendações de profissionais da área. Cada corpo de prova foi lixado por aproximadamente 30 segundos.

Realizou-se um estudo de superfície para avaliar a influência do tratamento na rugosidade superficial. O método utilizado foi a Perfilometria mecânica por meio do rugosímetro modelo

Talyscan 150 da marca *Taylor Hobson Precision*[®]. Selecionou-se cinco corpos de prova e uma região de 9 mm² foi avaliada antes e após o lixamento.

A aplicação do reforço foi realizada seguindo recomendações técnicas do fabricante do adesivo e os seguintes passos foram adotados: mistura manual dos componentes A e B em proporção de peso de 1,9:1,0; espalhamento da adesivo sobre o substrato de concreto e a superfície do reforço; aplicação de pressão manual sobre o reforço no local de colagem até que o excesso surgisse nas bordas laterais dos corpos de prova como pode ser vista na figura 5.



Figura 4 - Etapas de aplicação do reforço

Após a cura foi realizada o desbaste do excesso de adesivo na lateral dos corpos de prova com lixa d'água grão 80. Apesar do tempo de cura especificado pelos fabricantes do adesivo ser de 24 horas, o tempo de espera para esse desbaste foi de aproximadamente 72.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resistência à compressão axial

O traço de referência foi avaliado em duas etapas. Dos 14 corpos de prova obtidos, 2 foram avaliados aos 7 dias de cura e 12 foram avaliados aos 28 dias de cura. Os resultados estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3 - Resistência à compressão axial para o traço de referência

Referência	Quantidade de CPs	Carga (tf)	Resistência à compressão (MPa)
CP07	2	9,98 ± 0,77	12,45 ± 0,96
CP28	12	20,51 ± 1,62	25,29 ± 2,02

O traço de referência não obteve a resistência à compressão de 30 MPa como esperado. Acredita-se que tal fato ocorreu devido a um erro na etapa de adição de materiais na concretagem, onde foi adicionada maior quantidade de água que o previsto na dosagem. Evidências que levam a crer nessa possibilidade tem base na realização do teste de consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone após a mistura do traço, seguindo as especificações da norma NBR NM 67. Houve desmoronamento da massa fresca impedindo a realização da medida.

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 [18]. Este fato não inviabiliza a utilização do traço para o estudo, pois além do resultado não ter demonstrado alto erro estatístico, o objetivo do trabalho foi a comparação entre o comportamento em flexão das diferentes condições previamente estabelecidas.

Rugosidade Superficial

São apresentados alguns resultados referentes às análises superficiais realizadas antes e após o lixamento da superfície dos corpos de prova que receberam a camada adesiva. Na figura 6 são apresentados perfis de rugosidade em 2 e 3 dimensões para um dos corpos de prova do primeiro lote. Alguns parâmetros de rugosidade são apresentados na tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros de rugosidade para o corpo de prova

Situação	Ra(μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	RΔa (Rad)	RΔQ (Rad)
Bruto	5,51 ± 1,62	6,79 ± 2,07	27,50 ± 8,67	0,295 ± 0,04	0,443 ± 0,09
Lixado	4,10 ± 1,12	5,34 ± 1,64	22,60 ± 7,14	0,153 ± 0,02	0,225 ± 0,05

Neste caso, o lixamento condicionou à diminuição dos valores dos parâmetros de rugosidade. Esse comportamento não foi reproduzido em outras análises. Nas outras avaliações, há tanto o aumento dos valores dos parâmetros como sua diminuição. Verificou-se alterações nas superfícies, porém não foi possível concluir o efeito deste processo no que se diz respeito a rugosidade superficial devido a alternância que ocorre na magnitude dos parâmetros avaliados.

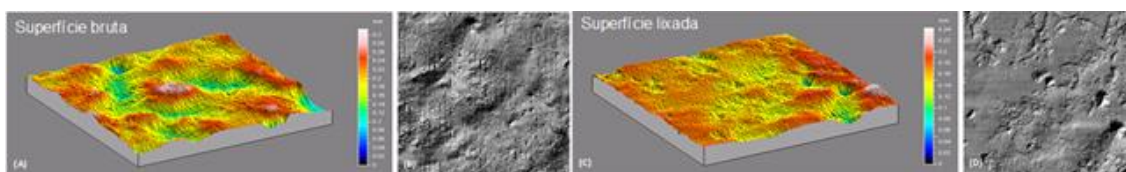


Figura 5 - Perfis de rugosidade para um corpo de prova do primeiro lote

Comportamento em flexão

As referências utilizadas para apresentar os resultados basearam-se no seguinte sistema de siglas: LiVj, onde Li representa a numeração dos lotes (i = 1, 2) e Vj representa a numeração das configurações (1 ≤ j ≤ 5). A referência L1V1, por exemplo, refere-se a um resultado geral para os corpos de prova na configuração V1 pertencente ao lote 1. A tabela 5 apresenta os resultados do primeiro lote.

Reduziu-se cerca de 47,66% da resistência à flexão com a introdução do entalhe. Essa diminuição era esperada, pois a seção transversal dos corpos de prova na zona de processo de fraturamento da configuração V2 é menor que na V1. A descontinuidade atuou localmente

como um concentrador de tensões, diminuindo a resistência à flexão. Houve redução na deflexão, ocasionando deslocamentos aproximadamente 50% menores.

Tabela 5 - Resultados referentes ao primeiro lote (L1)

Referência	CPs	Força de ruptura (kN)	Tensão nominal (MPa)	Deslocamento (mm)
L1V1	8	3,05 ± 0,18	7,91 ± 0,46	0,63 ± 0,20
L1V2	8	1,60 ± 0,12	4,14 ± 0,30	0,69 ± 0,58
L1V3	8	9,56 ± 1,17	24,83 ± 3,04	1,01 ± 0,25
L1V4	8	10,52 ± 0,96	27,32 ± 2,50	1,24 ± 0,26

Para o aumento da carga resistente, no grupo L1V3, houve o aumento de resistência à flexão cerca de 3,13 vezes em relação ao grupo L1V1. A adição do reforço ocasionou um aumento de resistência à flexão e um acréscimo na ductilidade do concreto. Houve um aumento na deflexão resultando em deslocamentos 1,60 vezes maiores que a condição de controle.

A execução do reparo no grupo L1V4 acarretou um aumento da resistência à flexão em 6,60 vezes em relação ao grupo L1V2 e 3,45 vezes em relação ao grupo L1V1. O reparo funcionou de forma eficiente, pois foi capaz de superar os resultados para as condições de reparo e reforço. O principal indicativo deste comportamento é a presença do entalhe preenchido na configuração L1V4.

Nos grupos de referência (L1V1 e L1V2), ocorreram falhas características de flexão pura do concreto. Nos grupos de reforço e de reparo (L1V3 e L1V4) foram observados modos de falha relacionados com esmagamento compressivo das extremidades dos corpos de prova, trincas de cisalhamento originadas na extremidade do material compósito ou sob os apoios do equipamento de ensaio. A figura 7 ilustra alguns casos observados.

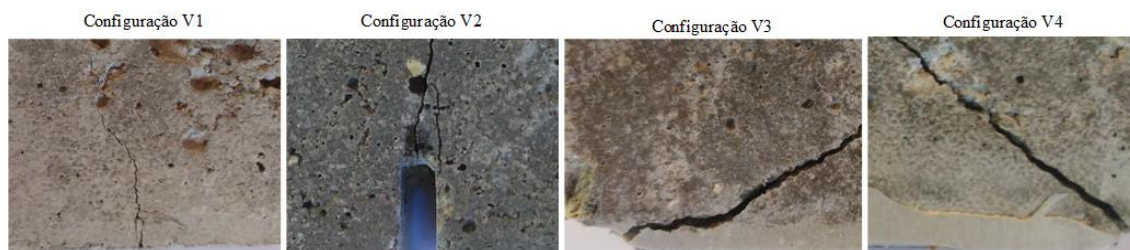


Figura 6 - Exemplo dos diferentes modos de falhas observados no primeiro lote

Os resultados na tabela 6 são referentes ao segundo lote. A resposta ao preenchimento do entalhe com o adesivo demonstrou um resultado positivo. Comparando o grupo L2V1, houve aumento de resistência à flexão de 52,41 %. Em relação ao grupo L2V2, observou-se que a proporção do reparo foi muito mais significativa, pois elevou-se a resistência em aproximadamente 2,87 vezes.

Tabela 6 - Resultados referentes ao segundo lote (L2)

Referência	CPs	Força de ruptura (kN)	Tensão nominal (MPa)	Deslocamento (mm)
L2V1	8	2,71 ± 0,09	7,04 ± 0,24	0,71 ± 0,21
L2V2	8	1,44 ± 0,11	3,74 ± 0,30	0,45 ± 0,12
L2V5	8	4,14 ± 0,18	10,73 ± 0,45	0,64 ± 0,11

O modo de fratura neste grupo também sofreu alterações significativas. A propagação da trinca foi semelhante ao observado em flexão pura, porém nas regiões circunvizinhas a região do entalhe preenchida com adesivo, como mostrado na figura 8.



Figura 7 - Exemplo dos diferentes modos de falhas observados no segundo lote

Devido à baixa resistência à tração do concreto, muito inferior à resistência à tração das resinas epóxi, o preenchimento do entalhe com a resina adesiva cria uma região com maior resistência à tração. Além de retardar o processo de fissuramento, outros dois efeitos são alcançados: maiores valores de resistência à flexão são atingidos da mesma maneira que uma maior deflexão máxima é permitida [19]. O adesivo no entalhe proporciona o aumento da interface concreto/adesivo, que aumenta a área de colagem e possibilita uma melhor redistribuição das tensões [20]. O preenchimento do entalhe com o adesivo foi capaz de promover uma capacidade de resistência superior à condição da viga em situação de controle.

CONCLUSÕES

A metodologia adotada mostrou-se adequada e os resultados apresentados constatarem que a utilização de materiais compósitos laminados tanto no reforço como no reparo de vigas de concreto podem ser uma alternativa eficiente. Além disso, a contribuição do adesivo para a efetividade da técnica é comprovada. É visto que sua introdução no entalhe contribui para que maiores resistências sejam alcançadas frente a condições em que não há entalhe ou que o entalhe não é preenchido. Ainda assim, são necessários testes em escalas reais, além da caracterização em fadiga, fluência e cisalhamento para comprovar a integral eficiência do adesivo NVT 201E.

AGRADECIMENTOS

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

dos laboratórios do Instituto Politécnico, LEFI, LAA e TECPOL, que contribuíram para que o estudo fosse realizado.

REFERÊNCIAS

- [1] A. S. KARZAD et al., *Matec Web Of Conferences*, v. 120, p.1008-1018, 2017.
- [2] F. M. MUKHTAR, R. M. FAYSAL, *Construction And Building Materials*, 2018, v. 169, p. 877-887.
- [3] MARQUES, G. G. Análise experimental de sistemas de reforço estrutural à flexão com laminados de PRFC aplicados a vigas de concreto armado. 2017. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2017.
- [4] M. FRIGIONE, M. LETTIERI, *Polymers*, 2018, v. 10, n. 3, p.247-262.
- [5] J. M. KAURA, *Nigerian Journal Of Technology*, Nsukka, 2017, v. 36, n. 1, p.45-49.
- [6] N. A. AMARASINGHE, J. C.P. GAMAGE, In: INT. CONF. ON STRU. ENG. AND CONS. MANAG. 6, 2015, Kandy. Proceedings, 2015, p. 170 - 177.
- [7] S. CABRAL-FONSECA et al., *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, 2018, v. 83, p. 153-167.
- [8] G. C. MAYS, A. R. HUTCHINSON, *Adhesives in Civil Engineering*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [9] A. GARBACZ, M. GÓRKA, L. COURARD, *Magazine Of Concrete Research*, 2005, v. 57, p. 49-60.
- [10] P. B. FUSCO, *Tecnologia do Concreto Estrutural: Tópicos aplicados*. São Paulo: Pini, 2008.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15900: Água para amassamento de concreto. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009. 15 p.
- [12] RILEM TC89-FMT. Size effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete, materials and structures, 23 – 1990.
- [13] BOGGIO, A. J. Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento Portland. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2000.
- [14] CORRÊA, A. C. A. Estudo do desempenho dos aditivos plastificantes e polifuncionais em concretos de cimento portland tipo CPIII-40. 2010. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2010.
- [15] ROHEM, N. R. F. Desenvolvimento de sistema de reparo de dutos e tubulações industriais utilizando materiais compósitos de matriz polimérica. 2010. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Departamento de Materiais, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2010.
- [16] AGARWAL, B. D.; BROUTMAN, L. J.; CHANDRASHEKHARA, K.. *Analysis and performance of fiber composites*. 3. ed. New Delhi: Wiley (2006).
- [17] M. R. E. F. ARIYACHANDRA et al., *Composite Structures*, 2017, v. 178, p. 476-482.
- [18] V. G. HAACH, G. VASCONCELOS, P. B. LOURENÇO, *Construction And Building Materials*, 2011, v. 25, n. 6, p. 2980-2987.
- [19] K. LAU, L. ZHOU, *Composites Part B: Engineering*, 2001, v. 32, p. 21-31.
- [20] D. MOSTOFINEJAD, S. M. SHAMELI, *Construction And Building Materials*, 2013, v. 38, p.751-758.