https://doi.org/10.4322/CBPAT.2022.031

REFORÇO ESTRUTURAL COM AUMENTO DA SEÇÃO TRANSVERSAL E EXECUÇÃO DE CAMADA COM FIBRA DE CARBONO: ESTUDO DE CASO VIGA COM SEÇÃO I EM CONCRETO ARMADO

Leandro Filgueiras[1], Lucas Oliveira[2], Larissa Xavier[3*], Gustavo Maia[4]
* larissa.xavier@gmaia.com.br

[1] Gerente técnico, construtora gmaia, Belo Horizonte, Brasil
[2] Gerente comercial, construtora gmaia, Belo Horizonte, Brasil
[3]Estagiária gerência técnica, construtora gmaia, Belo Horizonte, Brasil
[4] Diretor, construtora gmaia, Belo Horizonte, Brasil

RESUMO

O presente artigo possui a finalidade de apresentar estudo de caso do reforço com fibra de carbono no combate ao cisalhamento em vigas de concreto armado. O elemento estrutural está localizado em uma região de intensa agressividade ambiental, em área industrial. O reforço foi desenvolvido através do estudo da técnica que incidisse superficialmente no funcionamento do galpão, sendo sua execução rápida, impactando menos na produção e atividades diárias. Foi utilizado fibra de carbono seguindo recomendações do ACI - American Concrete Institute. De forma cronológica, segue descrição resumida das atividades: escoramento da estrutura, garantindo a segurança no trabalho, aumento de seção transversal com graute estrutural nas extremidades da viga, execução da técnica do reforço com fibra de carbono. É demonstrado ganho de resistência da seção transversal de concreto a partir da técnica desenvolvida e executada pela construtora G MAIA.
Palavras-chave: concreto armado; graute; fibra de carbono, recuperação estrutural.

ABSTRACT

This article aims to present a case study of carbon fiber reinforcement in combating shear in reinforced concrete beams. The structural element is located in a region of intense environmental aggression, in an industrial area. The reinforcement was developed through the study of the technique that superficially affected the functioning of the shed, being its execution fast, impacting less on production and daily activities. Carbon fiber was used following the recommendations of the ACI - American Concrete Institute. Chronologically, a brief description of the activities follows: shoring the structure, ensuring safety at work, increasing the cross-section with structural grout at the ends of the beam, execution of the technique of carbon fiber reinforcement. Strength gain of the concrete cross section is demonstrated from the technique developed and executed by the construction company G MAIA.
Keywords: reinforced concrete; grout; carbon fiber; structural recovery.

1. INTRODUÇÃO

Quando uma estrutura de concreto não atende mais suas funções originais, ou se tem uma mudança na função que exija desta estrutura um aumento em sua capacidade de suporte de carga, o reforço estrutural passa a ser uma alternativa.

Para a ABNT NBR 15575 o conceito de vida útil pode ser descrito como o período de tempo em que um edifício e seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos. Já a durabilidade é, segundo a mesma norma, a capacidade da edificação ou de seus sistemas desempenharem suas funções sob as condições de uso e manutenção especificadas. Esses dois conceitos estão diretamente ligados à deterioração estrutural, um processo bastante complexo, com diversas causas e consequências que deve ser compreendido a fim de garantir a qualidade de uma edificação em serviço.

As causas da deterioração são variadas, podendo acontecer naturalmente ao passo do envelhecimento da estrutura, ou de maneira imprevisível e repentina, ocasionando, por vezes, grandes acidentes.

Segundo Zuchetti (2015), os problemas patológicos poderão surgir em qualquer uma das etapas construtivas, provenientes de erros ou falhas cometidas durante alguma etapa da obra. Geralmente nas etapas de uso e execução. Em todo caso, é de grande importância conhecer a origem da manifestação, principalmente para fins judiciais, para que se possa identificar quem cometeu a falha.

No caso de estruturas de concreto armado, o processo de deterioração provoca diferentes graus de degradação da rigidez de seus elementos componentes, independentemente da causa. A quantificação da rigidez de elementos deteriorados é um aspecto de grande importância para avaliação estrutural e consequente decisão sobre a necessidade de realizar procedimentos de reparo e/ou reforço.

De maneira geral, os processos de reforço e reparo estrutural visam adequar uma estrutura de modo que ela possua, respectivamente, a resistência e as condições em serviço necessárias para atender às atividades para as quais foi projeta e construída. Portanto, quando os serviços a serem executados implicarem em introdução de novos materiais com finalidade de aumentar ou reconstituir a capacidade portante da estrutura, tem-se um procedimento de reforço estrutural.

Por outro lado, caso os serviços sejam executados no intuito de atender às condições de serviço e de durabilidade do elemento estrutural, sem a adição de materiais para aumento ou restituição de sua resistência, tem-se um processo de reparo estrutural (Souza e Ripper, 1998). Existem técnicas que podem ser aplicar para a reabilitar ou reforçar a estrutura. O reforço estrutural com fibra de carbono é uma tecnologia que se desenvolveu na Suíça desde os anos 1980, porém sua utilização no Brasil ainda é de pouca expressão.

Para a realização do reforço estrutural (Souza, 2003) citam que a utilização de materiais compósitos tem recebido considerável atenção nos últimos anos, havendo muitos estudos desenvolvidos em diferentes instituições de pesquisa. Os autores afirmam que este tipo de reforço oferece uma alternativa interessante principalmente devido à sua leveza, o que facilita as operações de manuseio e instalação. Além disso, esses materiais, dos quais se destacam os polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polimer), possuem alta resistência, são inertes ao

processo de corrosão eletroquímica ou corrosão por outros agentes agressivos e possuem grande versatilidade de aplicação, o que gera seu vasto campo de aplicação na engenharia.

O reforço de fibra de carbono possibilita reabilitar a estrutura de forma rápida, sem grande acréscimo ao peso próprio da estrutura, sem grandes alterações em suas formas arquitetônicas. O sistema de compósitos estruturados com fibras de carbono (CFC), é um sistema obtido pela associação de dois elementos. Cabe a cada um desses elementos exercerem funções distintas (Machado, 2002).

A matriz polimérica, a quem cabe a função de manter as fibras que as estruturam coesas propiciando a transferência das tensões de cisalhamento entre os dois elementos estruturais, concreto e fibra de carbono; O elemento estrutural, constituído pelas fibras de carbono.

As fibras dispostas unidirecionalmente dentro das matrizes poliméricas absorvem as tensões de tração decorrentes dos esforços solicitantes atuantes. A fibra de carbono é a que melhor apresenta características mecânicas para o reforço estrutural sendo, por este motivo, o tipo de fibra mais aconselhável para essa finalidade (Carvalho, 2011).

A ausência de normas nacionais sobre a área de reforço das estruturas e as consequentes faltas de esclarecimentos técnicos sobre reforço de estrutura de concreto armado é o que torna o estudo estritamente relevante. O presente trabalho faz um estudo de um caso prático, descreve e analisa o diagnóstico e os procedimentos executivos de reforço de vigas.

1.1: Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo apresentar estudo de caso e analisar os critérios de dimensionamento avaliando a eficiência da contribuição do reforço estrutural com fibras de carbono no cisalhamento, aplicados em vigas de concreto armado. Para isso foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Revisão bibliográfica sobre a recuperação estrutural com reforço de fibra de carbono;
- Apresentar estudo de caso, detalhando dimensionamento, etapas de projeto, ensaios e execução;

1.2: Metodologia:

A partir de dados do projeto original da estrutura foi avaliada a capacidade estrutural da estrutura. Para essa atividade foi realizado modelo de cálculo da estrutura existente, aplicando os carregamentos permanentes e acidentais na estrutura.
O modelo em elementos finitos para retratar o comportamento da estrutura foi desenvolvido no software SAP 200, mediante aos esforços provenientes da utilização.O programa utiliza o método dos elementos finitos para a discretização da estrutura, sendo o cálculo realizado pela resolução do seguinte sistema de equações lineares:
KU = R
Sendo:
K - matriz de rigidez.
U - vetor dos deslocamentos.
R - vetor das cargas.

A análise foi realizada recorrendo a modelos globais elástico lineares constituídos por elementos finitos de barra com 6 GL por nó, e por elementos finitos de chapa de 4 nós com 6 GL por nó, modelados tridimensionalmente.

Em função desses resultados e critérios de carregamentos, foi definido reforço a ser utilizado: Fibra de carbono e aumento de seção. Das etapas a serem executadas:

- Montagem de andaimes.;
- Execução seguindo boas práticas, projeto e fiscalzação;
- Ensaios de aderência;
- Acabamentos;
- Entrega final da estrutura;
- Desmobilização.

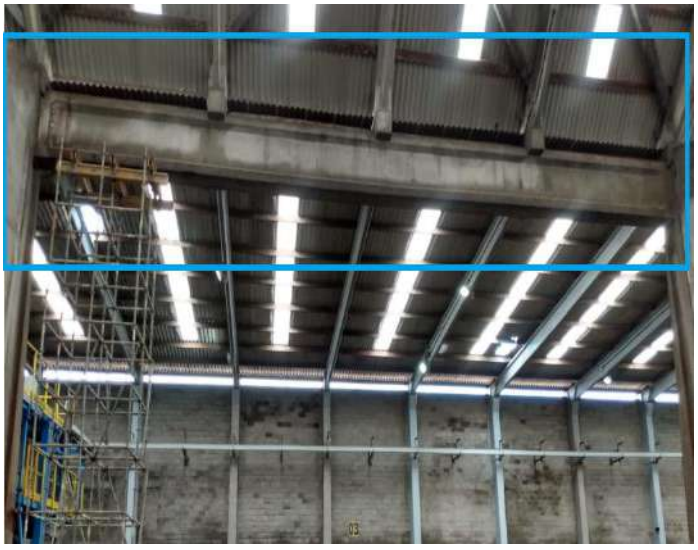
2. CARACTERÍSTICA DAS VIGAS E MATERIAIS

Atualmente há uma grande necessidade referente a reforço de estruturas que sofreram patologias no decorrer do tempo, com a finalidade de reaver a capacidade portante original da estrutura. Diante de muitos métodos, os polímeros reforçados com fibras (PRF) tornaram-se uma alternativa eficiente de reforço estrutural, sendo que a fibra mais apropriada é a fibra de carbono, por apresentar maior resistência e rigidez, elevada resistência a tração, elevado módulo de elasticidade, facilidade de sua aplicação, redução de carga em relação a métodos convencionais como: colagem de chapas metálicas ou método de aumento de suas secções em concreto armado.

As fibras de carbono, podem ser utilizadas para elevar a resistência da estrutura, principalmente à flexão e ao esforço transversal de vigas e lajes, requerendo, porém, um grande cuidado quanto aos detalhes da sua aplicação e amarração na estrutura de concreto (MENACKER, 2021).

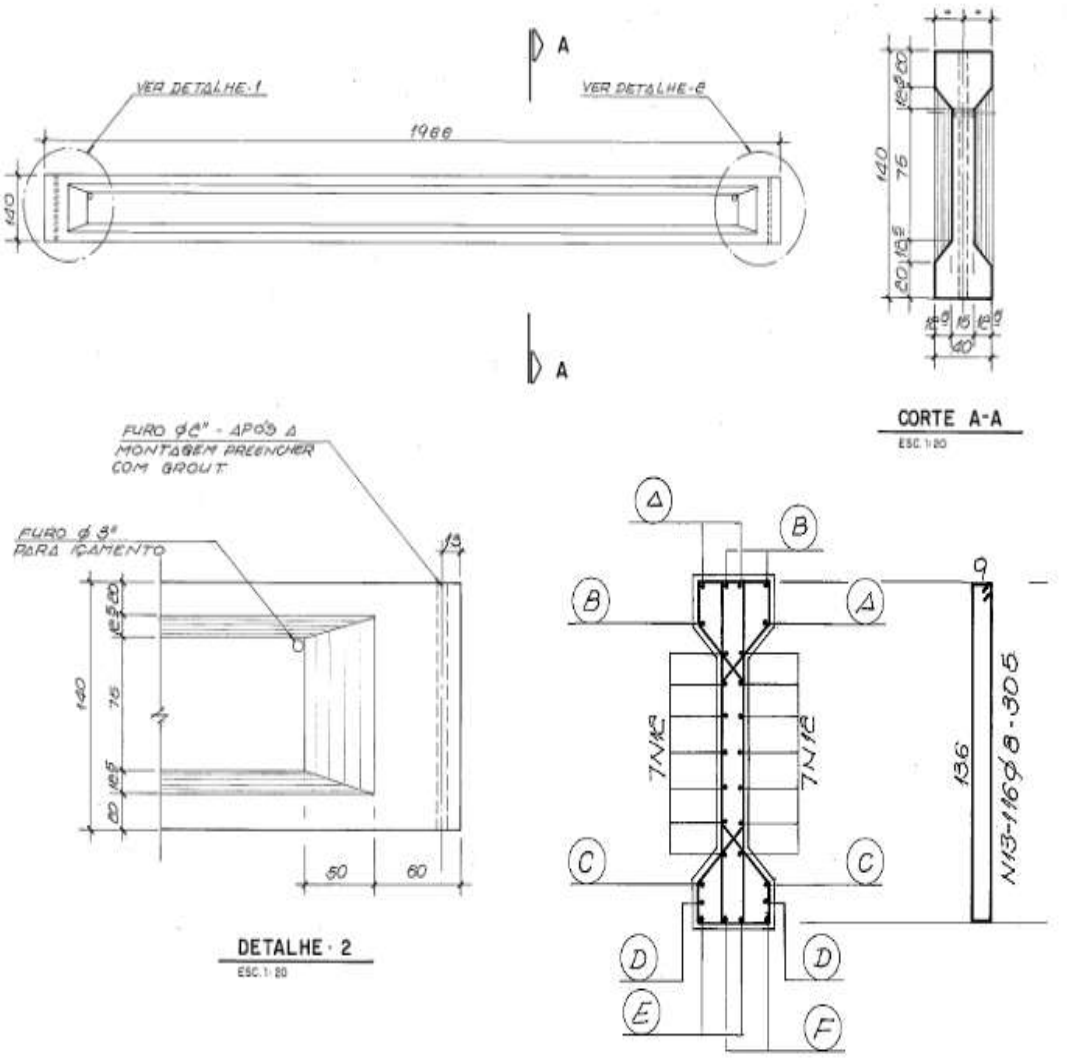
A partir dos dados de projeto e visitas em campo, foi levantado seção do elemento estrutural e esforços solicitantes. Foi gerado modelo de cálculo verificando os esforços cortantes nas regiões de apoios, para começar a determinar a faixa de implantação das fibras de carbono.

Figura 1 – Vista frontal da viga seção I



Fonte: os autores.

Figura 2 – Planta e seção transversal da viga

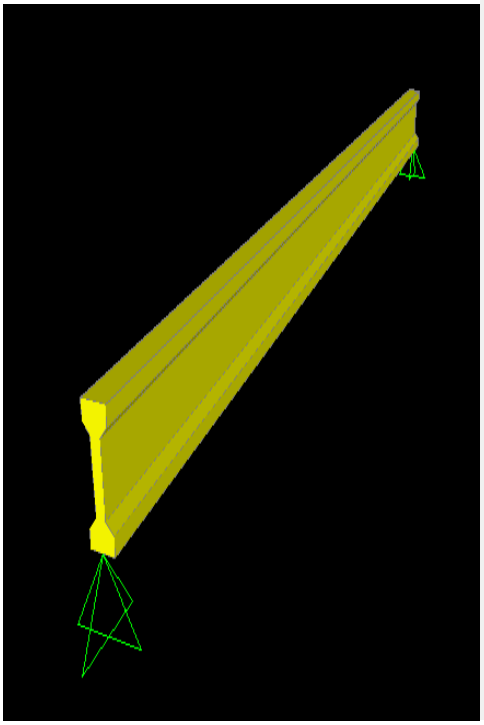


Fonte: os autores.

2.1 Verificação de esforços solicitantes cortantes

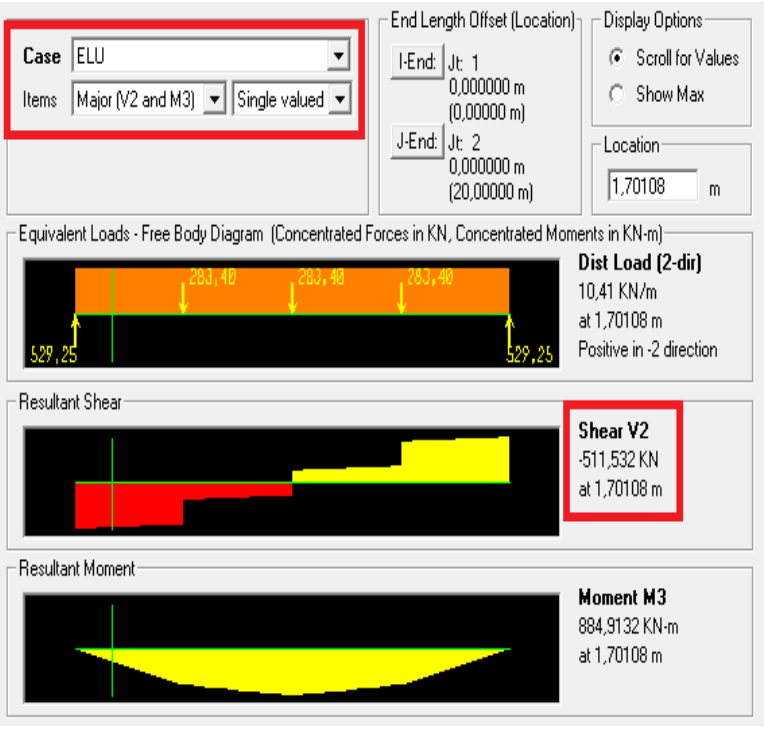
É apresentado na figura 3 e 4 vista uma esquemática da viga e diagramas de momentos fletores/ cortantes respectivamente. O elemento estrutural possui vão livre de 19 metros, como apresentado na figura 2, com sobrecarga permanente vertical proveniente da cobertura do galpão. Os carregamentos devido ao vento também são aplicados à estrutura.

Figura 3 – Perspectiva em modelo 3D



Fonte: os autores

Figura 4 – Diagrama de momento fletor e cortante



Fonte: os autores

Como se observa na figura 4, na posição 1,7 m para o apoio, o valor do diagrama de esforço cortante indica carga de 51,15 ton. A seção transversal não resistente a esse esforço com armadura indicada em projeto, situação agravada pelas condições de degradação do concreto, ou seja, não consegue absorver sozinha os esforços.

3. APLICAÇÕES PARA FIBRA DE CARBONO COMO REFORÇOS AO CISALHAMENTO

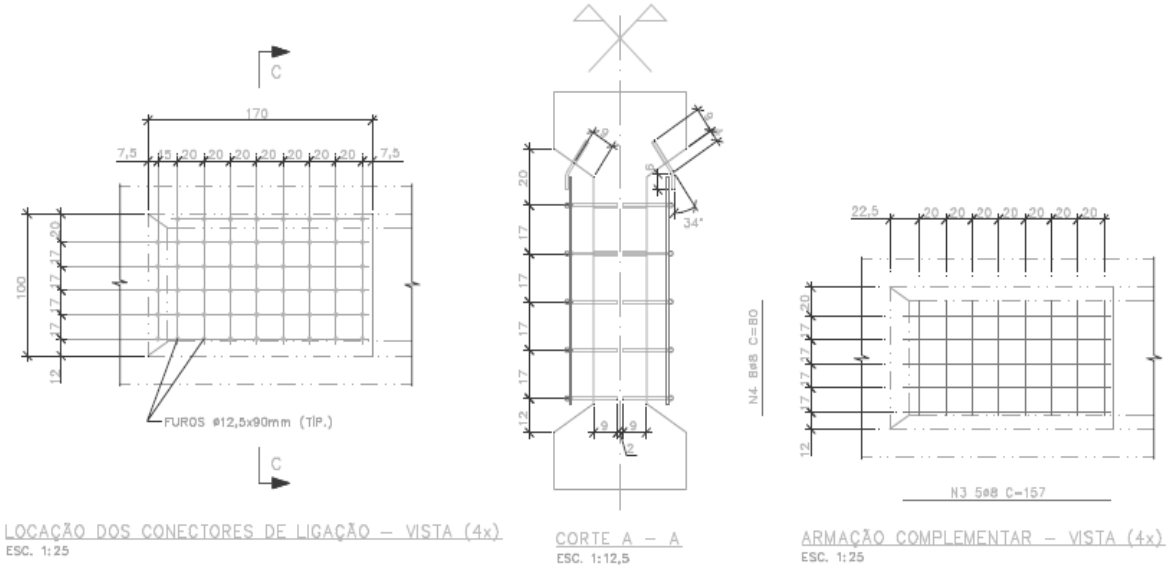
Figura 5 - Vista frontal da viga com escoramento



Fonte: os autores.

Após o escoramento, as regiões próximas aos apoios deverão ter suas “cavidades” preenchidas conforme detalhado em projeto. É realizada ancoragem previa de armaduras com adesivo estrutural, posteriormente a seção é preenchida com graute estrutural.

Figura 6 – Detalhe aumento de seção transversal nos apoios



Fonte: os autores.

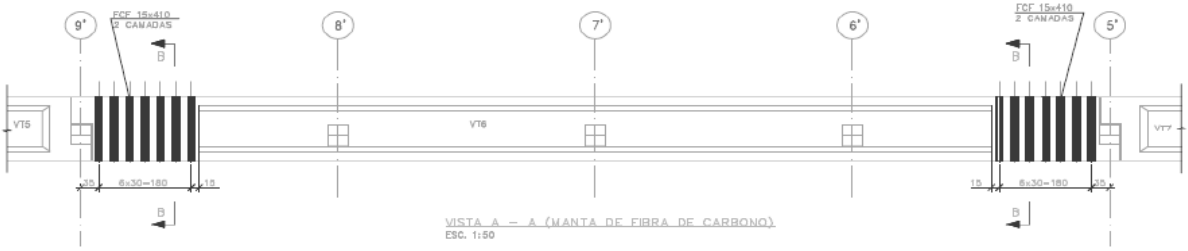
Figura 7 - Detalhe armadura complementar nos apoios Figura 8 – Detalhe da armadura



Fonte: os autores

4. PROCEDIMENTO EXECUTIVO: MANTA DE FIBRA DE CARBONO

Figura 9 – Vista lateral indicação reforço fibra de carbono



Fonte: os autores.

Figura 10 – Fibra de carbono executada



Figura 11 – Fibra de carbono executada



Fonte: os autores.

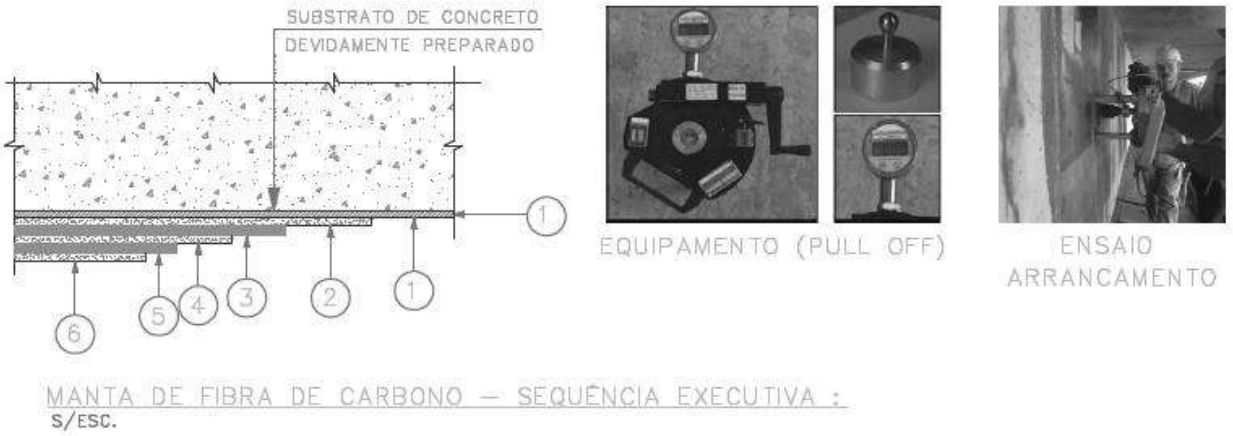
- Arredondar os "cantos" dos elementos estruturais a serem objetos de intervenções considerando raio mínimo de 2,5cm;
- Lixar e preparar os substratos de forma a obter superfícies sem abaulamentos e/ou depressões utilizando argamassa para reparos estruturais, atendendo às recomendações do fabricante, inclusive no que diz respeito a espessuras de camadas e condições de cura;
- Executar limpeza dos substratos deixando-os isentos de contaminações, material solto e/ou pulverulento;
- Aplicar 1 farta demão de resina epoxídica sobre o substrato preparado;
- Emulsionar resina sobre a manta a ser instalada sobre uma bancada externa;
- Aplicar a manta emulsionada sobre o substrato preparado. A manta deve ser pressionada contra a resina ainda fresca, utilizando-se "rolo" com discos metálicos, de forma que fique completamente saturada com a resina e manter o prefeito alinhamento das fibras no seu sentido longitudinal;
- Impregnar a manta com outra camada de resina;
- Aplicar a segunda camada de manta emulsionada sobre o substrato úmido e pressionada mais uma vez com o rolo de discos metálicos, de forma que fique completamente saturada com a resina e com as fibras devidamente alinhadas no sentido longitudinal;
- Aplicar sistema de proteção mecânica e ambiental sobre a manta;

5. ENSAIO DE VERIFICAÇÃO – FIXAÇÃO FIBRA: ARRANCAMENTO POR TRAÇÃO (PULL OFF)

Este ensaio consiste na mensuração da força de tração necessária ao arrancamento de "pastilhas metálicas" (seção circular com diâmetro de 50mm), previamente coladas na superfície das mantas de fibra de carbono já curadas.

- A profundidade do corte deve ser da ordem de 15 milímetros no concreto;
- A tensão mínima deve ser de 1,5MPa. (15kg/cm²) para 80% dos resultados e nenhum menor que 1,0 MPa (10kg/cm²);
- Esse ensaio admite a tensão de aderência seja o mesmo valor da tensão de tração do concreto (fct,p), obtendo-se dividindo a força aplicada na ruptura pela seção transversal da pastilha.

Figura 11 – Sequência executiva ensaio de arrancamento por tração



Fonte: os autores.

6. DIMENSIONAMENTO DA FIBRA DE CARBONO PARA REFORÇO

Para o dimensionamento da nova seção reforçada utilizamos a sequência de cálculo estabelecida pelo ACI 440.2R-08 - Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.

O sistema de reforço em fibra de carbono aumenta a resistência ao cisalhamento das vigas e colunas de concreto existentes, sendo a seção transversal envolvida de forma total – pilares - ou parcial – vigas - (Malvar et al., 1995).

Orientar as faixas do reforço em fibra de carbono nas posições transversais ao eixo do elemento estrutural ou perpendiculares a possíveis trincas por cisalhamento é eficaz para fornecer resistência ao cisalhamento adicional na seção.

Figura 12- Indicações de posicionamento de fibra de carbono

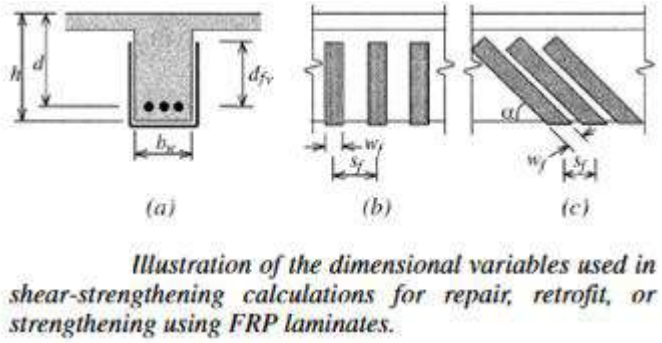


Illustration of the dimensional variables used in shear-strengthening calculations for repair, retrofit, or strengthening using FRP laminates.

Fonte: ACI 440-0. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*

É apresentado a seguir orientações sobre o cálculo da resistência ao cisalhamento resultante da adição de reforço com camadas de fibra de carbono em uma viga de concreto armado.

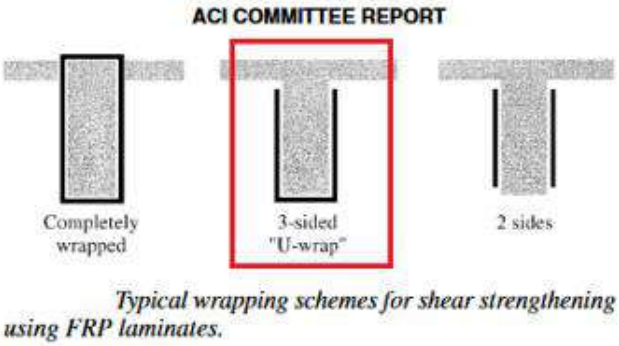
A resistência ao cisalhamento adicional que pode ser fornecida pelo sistema fibra de carbono é baseada em muitos fatores, incluindo geometria da viga ou coluna, esquema de empacotamento e

força de contato superficial no concreto existente, mas sempre deve ser limitada de acordo com as disposições do Capítulo 9 do ACI 440.2R-08.

Para o reforço externo com fibra de carbono na forma de tiras discretas, o espaçamento centro a centro entre as tiras não deve exceder a soma de d / 4 mais a largura da tira.

Os três tipos de esquemas de embalagem de fibra de carbono usados para aumentar a resistência ao cisalhamento de vigas prismáticas retangulares ou colunas são ilustrados abaixo:

Figura 13- Envelopamentos fibra de carbono



Fonte: ACI 440-08. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*

O empacotamento completo do sistema FRP ao redor da seção nos quatro lados é o processo mais eficiente e mais comumente utilizado em elementos estruturais em que o acesso aos quatro lados está disponível.

Tabela 1 – Fatores de redução dimensionamento manta

440.2R-24 ACI COMMITTEE REPORT

Table 9.1—Environmental reduction factor for various FRP systems and exposure conditions

Exposure conditions	Fiber type	Environmental reduction factor C_E
Interior exposure	Carbon	0.95
	Glass	0.75
	Aramid	0.85
Exterior exposure (bridges, piers, and unenclosed parking garages)	Carbon	0.85
	Glass	0.65
	Aramid	0.75
Aggressive environment (chemical plants and wastewater treatment plants)	Carbon	0.85
	Glass	0.50
	Aramid	0.70

Fonte: ACI 440-08. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*

Resultado:

Tabela 2 – Cálculo da propriedade da manta de fibra de carbono

Reforço complementar:		
d	1300	mm
dfv	1300	mm
Largura FC	150	mm
Espalamento entre eixo fibras	300	mm
Comprimento área cortante	1800	mm

Propriedades material		
Espessura	0,16	mm
fu	3790	N/mm²
εfu	0,017	mm/mm
Ef	227,53	N/mm²

ffu	3,6005	kN/mm²
εfu	0,01615	

Fonte: os autores.

Resultados:

Tabela 3 - Nível de deformação efetivo no reforço

n	2	camadas
tf	0,1651	mm
Ef	227,5	kN/mm²
Le	33,97	mm

fc	20,7	kN/mm²
K1	0,838	

dfv	1300	mm
Le	33,97	mm
K2	0,974	

Kv	0,144	<0,75	ok
εfe	0,0023	<0,004	ok

Fonte: os autores.

Resultados:

Tabela 4 – Cálculo da contribuição do reforço para a resistência ao cisalhamento

Afv	96	mm²
ffe	0,529	kN/mm²
Vf	220,3	kN

Fonte: os autores.

Resultados:
Parâmetros estabelecidos pelo ACI- 440:
Ligação em U:

Tabela 5 – Cálculo de resistência ao cisalhamento

Vc	360	kN
Vs	200	kN
ψf	0,85	
Vn	560,4	kN

Fonte: os autores.

$$\psi_f = 0.85 \quad (1)$$

Vn > Vsd ➔ 56,04 > 51,15 ton ➔ OK.

Figura 14 – Vista frontal viga com reforço executado



Fonte: os autores

7. CONCLUSÃO

Apesar de ainda não haver norma de referência no Brasil especificando o processo de reforço com fibra de carbono, essa técnica é largamente utilizada na América e Europa. O reforço estrutural utilizando materiais compósitos como a fibra de carbono tem se tornado comum na engenharia, pois garante a resistência necessária à peça deteriorada sem grande interferência construtiva. Os sistemas compostos estruturados com fibras de carbono não são eficientes para a absorção de esforços de compressão. Entretanto, por meio do confinamento da seção das peças axialmente solicitadas, a deformação transversal do concreto, oriunda da atuação da carga axial, consegue-se aumentar substancialmente a resistência dos pilares à compressão, além de propiciar um representativo aumento na ductibilidade do elemento reforçado.

Foi apresentado estudo de caso onde é definido dimensionamento para o reforço, seguindo indicações do documento do ACI-440 American Concrete Institute, que a seção transversal ao término da execução do reforço, aumenta sua capacidade de suporte a esforços cisalhantes, utilizando a técnica descrita nesse artigo. O dimensionamento demonstrou que o reforço aumentou a resistência da seção transversal passando de 360 kN para 560 kN de resistência ao cisalhamento, atendendo aos esforços solicitantes na estrutura. Não houve evidencias de fissuras quando o escoramento foi retirado, evidenciando a assertividade do reforço.

Aumentar a resistência ao cisalhamento também pode resultar em falhas de flexão, quando não acorrem reforços nessa área. Entretanto falhas de flexão são relativamente mais dúcteis(escoamento) em comparação com as falhas de cisalhamento.

A partir do estudo de caso prático, com o levantamento de dados e vistoria técnica, foi possível compreender como se deve estabelecer um diagnóstico preciso referente a manifestações patológicas que afetam uma viga de transição, bem como a melhor forma de escolher o método de reforço. Além disso, aprendeu-se de maneira sólida as etapas para a execução de reforço com fibra de carbono.

Vale ressaltar que os procedimentos de recuperação estrutural envolvem uma série de fatores que não foram exemplificados nesse material, sendo exposto aqui o procedimento de uma forma resumida. A execução e acompanhamento técnico dos serviços devem ser realizados por empresa com experiência nesse segmento, como é o caso da G Maia.

Após o estudo do caso prático, conclui-se que a empresa cumpriu bem com os procedimentos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a equipe operacional e administrativa da construtora G-Maia pelo excelente trabalho.

REFERÊNCIAS

American Concrete Institute (2008). *ACI 440-08: Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*:. USA

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *NBR 15575: Desempenho de edificações habitacionais*. Rio de Janeiro.

CARVALHO, F. L.(2002). "*Procedimento Experimental para Avaliação do Fator de Amortecimento em Estruturas"*, Dissetação (Mestrado) – Área de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Geais, Belo Horizonte, p.141.

LEAL, Lilian Luna De Souza. FAGUNDES, Fabiano. Reforço estrutural com fibra de carbono. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 05, Ed. 11, Vol. 09, pp. 31-46. novembro de 2020. ISSN: 2448-0959.

MALVAR, L.M.R, 1998, “Durability of Composites in Reinforced Concrete,” Proceedings of the First International Conference on Durability of Composites for Construction, Sherbrooke, QC, Canada, Aug.

MENACKER, Eduardo de Faria. 2021. *Reforço estrutural com fibra de carbono em estruturas de concreto armado*. Universidade São Judas. São Paulo, SP.

SERRA, Marcus Vinícius Cardoso; SILVA, Thiago Henrique Lira. *Fibra de carbono: reforço estrutural em estrutura de concreto armado*. In Revista Cientifica Semana Acadêmica. Fortaleza – CE. Editora Unieducar. Novembro de 2019.

Souza, V. (1998), “*Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto”*. Editora Pini, São Paulo.

Souza, Regina Helena F. de; Appleton, Júlio (2003). “*Estudo Experimental sobre o Reforço de Vigas de Concreto Armado com Tecido Compósito de Fibras de Carbono*” in: Congresso Brasileiro do Concreto, Brasil.

ZUCHETTI, Pedro. Patologias da construção civil: *Investigação patológica em edifício corporativo de administração pública no Vale Do Taquari/RS*. Lajeado, 2015.