

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Maria Elisabeth Farina Correia

**DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO DE ANCORAGEM DE
FIBRAS DE CARBONO EM VIGAS DE CONCRETO COM
OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA**

Porto Alegre

Maio 2022

MARIA ELISABETH FARINA CORREIA

**DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO DE ANCORAGEM DE
FIBRAS DE CARBONO EM VIGAS DE CONCRETO COM
OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Prof. José Alberto Azambuja (UFRGS) - Dr. pela UFRGS

Porto Alegre

Maio 2022

MARIA ELISABETH FARINA CORREIA

**DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO DE ANCORAGEM DE
FIBRAS DE CARBONO EM VIGAS DE CONCRETO COM
OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, maio de 2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. José Alberto Azambuja (UFRGS)
Dr. pela UFRGS

Prof. Humberto Ramos Roman (UFSC)
Dr. pela Universidade de Sheffield

Eng. Thomás Laydner Quinteiro Vasconcellos Leal (UFRGS)
Eng. Civil pela UFRGS

Desenvolvimento de Processo de Ancoragem de Fibras de Carbono em Vigas de Concreto com Otimização Topológica

Maria Elisabeth Farina Correia¹

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 90035-190, Brasil.

mariaelisabethfc@gmail.com

ABSTRACT

The objectives of this study were to develop a carbon fiber anchoring solution for a topologically optimized beam and analyze of its structural performance and technical feasibility when compared with a traditional beam of reinforced concrete with steel bars. The beam geometry with topology optimization was achieved with the help of Ansys software. In order to improve the design of the beam, its geometry was changed, allowing for a final concrete reduction of 64% in volume compared to the traditional beam. The result obtained in the static bending test of the beam showed a total load resistance of 2.3tf. With this result, it was possible to reduce the equivalent manufacturing cost of the beam and obtain a structural performance compared to a traditional beam. One can see a great potential for the application of carbon fiber as a tensile element in reinforced concrete composite, replacing steel bars.

RESUMO

Os objetivos deste estudo foram desenvolver uma solução de ancoragem das fibras de carbono para uma viga com otimização topológica e analisar seu desempenho estrutural e sua viabilidade técnica e econômica quando comparados com os de uma viga tradicional de concreto armado com barras de aço. A geometria da viga com otimização topológica foi obtida com o auxílio do software *Ansys*. Com a finalidade de aprimorar o projeto inicial da viga, sua geometria foi

alterada, permitindo uma redução final de 64% no volume de concreto em relação à viga tradicional. O resultado obtido no ensaio de flexão estática da viga apresentou uma resistência ao carregamento total de 2,3 tf. Com esse resultado, foi possível reduzir o custo de fabricação da viga e obter um desempenho estrutural equivalente ao de uma viga tradicional. Pode-se vislumbrar um grande potencial de aplicação da fibra de carbono como elemento resistência a tração em compósito de concreto armado, em substituição à barras de aço.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o ramo da engenharia civil passou por uma grande evolução na concepção das estruturas, tanto na sua constituição quanto na sua forma. A inovação na construção civil vem buscando otimizar essas estruturas, de forma a atender as especificações técnicas e proporcionar métodos construtivos que viabilizem a redução de consumo de materiais, redução de custos e de tempo de produção, visando também reduzir o impacto ambiental do setor construtivo.

Dentro desse contexto, tem-se buscado alternativas para aprimorar o método de construção baseado em concreto armado, que é considerado uma tecnologia madura, datado do século 19. Alinhado com essa tendência, o concreto armado com otimização topológica e com substituição do aço pela fibra de carbono como constituinte resistente à tração, é o foco do tema a ser abordado neste artigo.

Em projetos novos, a substituição das barras de aço, em estruturas de concreto armado, por elementos de compósitos de fibra de carbono (FRP) é restrita a situações muito específicas, sendo mesmo uma técnica quase exclusiva das estruturas para ambientes em que ocorram fenômenos como a ressonância magnética, como casos em que o emprego do aço não é admissível (RIPPER e SOUZA,1998). Além disso, a fibra de carbono é utilizada apenas como

reforço estrutural em casos de estruturas que perderam sua plena funcionalidade. Porém, estão sendo desenvolvidos estudos laboratoriais para avaliar esse potencial e sua aplicação em edificações comuns. Em Leal (2020), foi desenvolvido um estudo com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica e econômica de uma solução tecnológica baseada na produção de vigas pré-fabricadas de concreto com fibra de carbono, submetidas à otimização topológica. Os resultados obtidos por Leal (2020) apresentaram resultados satisfatórios do ponto de vista econômico, pois a substituição do aço pela fibra de carbono, combinada com a otimização topológica, reduziu o custo de fabricação das vigas.

Do ponto de vista de desempenho estrutural, os resultados não foram satisfatórios, pois a viga ensaiada resistiu a um carregamento inferior ao que foi projetado. Segundo o autor, essa resistência mais baixa foi devida a uma falha na etapa de concepção do projeto relacionada ao sistema de ancoragem definido para as fibras. Mais especificamente, o sistema de ancoragem não foi capaz de realizar a distribuição das tensões na região nodal de maneira efetiva (LEAL, 2020). Entretanto, considerando o grande potencial dessa tecnologia, seria importante encontrar soluções para as deficiências apresentadas naquela pesquisa pioneira.

Este artigo relata a pesquisa, que teve como objetivo principal desenvolver uma solução para a ancoragem das fibras de carbono nos nós de estruturas com otimização topológica. Os objetivos secundários foram: 1) analisar o comportamento de estruturas com otimização topológica, com foco especificamente nos nós e na questão de ancoragem das fibras nesses nós; 2) testar a solução desenvolvida por meio da construção de um protótipo da viga, empregando-se sistemas aprimorados de ancoragem das fibras de carbono.

O protótipo foi testado para verificação de seu comportamento sob carga, com a finalidade de avaliar a eficiência da nova técnica de ancoragem desenvolvida.

MÉTODO

O método utilizado para desenvolver uma solução eficiente de ancoragem das fibras de carbono nos nós de vigas topologicamente otimizadas é constituído por dez etapas, descritas a seguir:

1. Revisão bibliográfica;
2. Definição dos materiais;
3. Definição da geometria básica da viga com otimização topológica;
4. Concepção do sistema de ancoragem;
5. Projeto final da viga;
6. Construção de protótipo da viga;
7. Ensaio de rompimento da viga para obtenção da capacidade de carga;
8. Análise dos resultados obtidos no ensaio de ruptura;
9. Comparativo com o custo e desempenho estrutural de viga de seção plena;
10. Conclusão.

DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS

O trabalho teve início com a definição dos materiais que seriam necessários para a execução do projeto da viga com otimização topológica, definindo o traço do concreto, a fibra utilizada como reforço estrutural e os materiais para a confecção da forma para a concretagem.

Concreto

Nesta pesquisa, foi estabelecido que o concreto a ser empregado para a concretagem da viga deveria atingir uma resistência à compressão de 28 dias maior que 60 MPa. Desse modo, foi definida, de forma empírica, a dosagem do traço do concreto na proporção em peso de cimento, areia e brita de 1:1,25:1,56, com uma relação água/cimento de 0,40. Os materiais

utilizados para a composição desse concreto foram o cimento CP V- ARI, agregado graúdo com dimensão máxima de 4,8 mm (brita 00) e areia média. Além disso, com o a intenção de obter um concreto fluído, diminuir a segregação dos agregados e melhorar a trabalhabilidade, foi adicionado o aditivo superplastificante *Glenium 51* a uma concentração de 0,4% do peso do cimento.

A confirmação da resistência foi fundamentada na moldagem de corpos de prova e na realização do ensaio de ruptura dos corpos de prova à compressão, seguindo, respectivamente, as especificações impostas pela NBR 5738 (ABNT, 2015) e a NBR 5739 (ABNT, 2018). Para tal, foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura e que, após o desmolde, foram armazenados em uma câmara úmida por 28 dias, afim de que a cura do concreto fosse controlada. Após a cura, os corpos de prova foram rompidos na prensa de compressão elétrica com uma taxa de aplicação de carga constante, obtendo os resultados descritos na Tabela 1. A resistência média à compressão foi obtida pelo valor médio dos quatro maiores valores obtidos no ensaio de ruptura, visto que os dois menores valores ficaram muito discrepantes (da ordem de 16% menores) em relação a média, motivo pelo qual foram descartados.

TABELA 1. Resultados do ensaio de ruptura à compressão

Corpos de prova	Resistência (MPa)	Força Máxima (kN)
CP 1	57,80	454
CP 2	65,68	515,8
CP 3	69,71	547,5
CP 1	58,99	463,3
CP 2	72,00	565,5
CP 3	68,99	541,9
Resistência Média	69,00	MPa

Considerando que foi moldada uma quantidade pequena de corpos de prova, não será calculado o valor da resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), sendo utilizado o valor médio de resistência à compressão de 69 MPa.

Fibra de Carbono

Fibras podem ser definidas como um material filamentar, cuja razão entre comprimento e diâmetro seja no mínimo igual a 100. Suas propriedades mais importantes são o seu módulo de elasticidade e sua resistência à tração. As principais fibras utilizadas comercialmente em aplicações da engenharia civil são as de vidro, carbono e aramida (BEBER, 2003).

A fibra de carbono é caracterizada por uma combinação de baixo peso, grande resistência à tração e alto módulo de elasticidade, motivo pelo qual o seu uso vem sendo ampliado na construção civil, principalmente como um promissor elemento estrutural capaz de substituir o aço e o alumínio, tradicionais materiais estruturais. Atualmente, ela é utilizada especialmente na recuperação de estruturas de concreto armado (BEBER, 2003; MACHADO, 2016; MONTANARI e GONÇALVES, 2017).

A densidade da fibra de carbono é de 1,8 g/cm³, que é aproximadamente 23% da densidade do ferro e 67% da densidade do alumínio. A fibra de carbono utilizada na pesquisa apresenta resistência à tração de 4.900 MPa e módulo de elasticidade de 240 GPa.

A fibra de carbono tem várias outras características, como não apresentar falhas devido à fadiga, não enferrujar e ser química e termicamente estável. É um material altamente confiável cujas características permanecem inalteradas por muito tempo, mesmo em condições severas (AWBK, 2022).

A matéria-prima (precursor) mais utilizada para obtenção da fibra de carbono de alta resistência é a fibra de poliacrilonitrila (PAN) (MONTANARI e GONÇALVES, 2017). Os filamentos de PAN são quimicamente tratados, aquecidos, esticados e, em seguida,

carbonizados a 3.000°C. Esses filamentos são então agrupados para formar fios que são identificados pelo número de filamentos de carbono que contêm. As classificações mais comuns para os fios são 3k, 6k, 12k e 15k, onde "k" se refere a mil. Portanto, um fio de 3k é feito de 3.000 filamentos e tem normalmente 3,13 milímetros de largura (AWBK, 2022). Na Fig. 1 pode-se visualizar a diferença da composição dos filamentos entre uma fibra 3k e 12k. O projeto em questão foi dimensionado com o uso de fibra de carbono 12K, que foi a mesma utilizada por Leal (2020), reduzindo o número de fios por tirante na viga.



Fig. 1. Comparativo dos fios 3k e 12k de fibra de carbono. (AWBK, 2022).

Pinos de ancoragem

Para a ancoragem foram utilizadas cantoneiras de aço carbono de 20 mm x 20 mm x 3 mm de espessura, com 15 cm de altura. A Figura 2a traz um desenho em perspectiva e corte dessa cantoneira. A Fig. 2b mostra a cantoneira com a fixação de pinos de barra rosqueada de ϕ 6 mm na parte central com cola epóxi, com altura de 11 cm, de forma a garantir que a ancoragem permanecesse firme na forma de compensado.

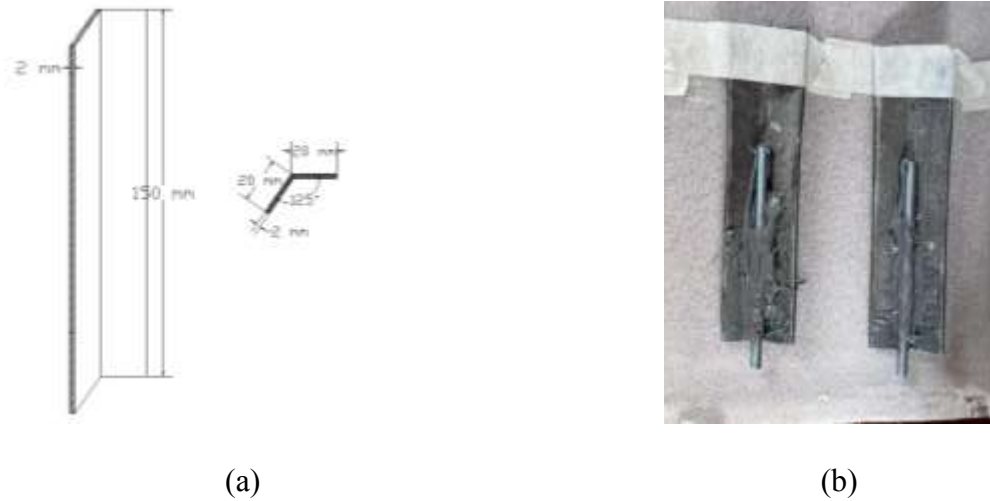


Fig. 2. (a) Vista lateral e superior do perfil e (b) Pinos de ancoragem.

Resina

Para garantir que a fibra permanecesse rígida na matriz de concreto, sem sofrer dano no contato com o concreto, foi utilizada a resina de poliéster pré-acelerada, conforme a Fig. 3.



Fig. 3. Resina pré-acelerada.

Poliestireno da forma

A escolha do material para realizar as seções vazias da viga otimizada foi o poliestireno. Essa decisão foi adotada por ser um material leve, de fácil manuseio, disponível no mercado e de baixo custo. Para garantir que o poliestireno resistisse ao corte, optou-se por utilizar um tipo de poliestireno (isopor) classe F1, com densidade de 13 a 16 kg/m³.

Para realizar um corte preciso do material e proporcionar o melhor acabamento das seções, foi utilizada uma máquina de corte do tipo *Router* CNC (Comando Numérico Computadorizado). O processo inclui o uso do software da máquina que lê o projeto das seções e transmite para máquina onde o corte é realizado por meio uma broca fina. Na Fig. 4a, pode-se visualizar o processo de corte e o resultado final na Fig. 4b.

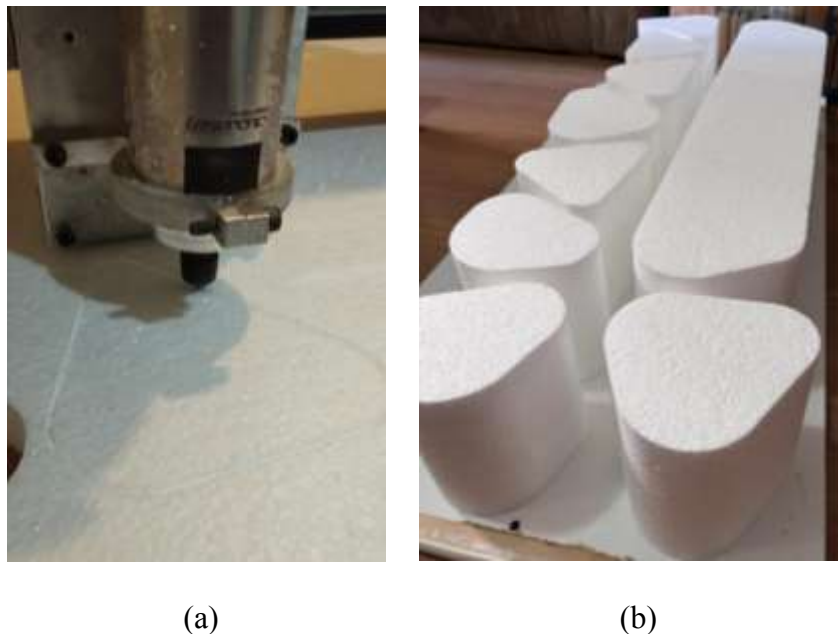


Fig. 4. (a) Corte do poliestireno e (b) seções vazias da viga finalizadas.

Formas de Compensado

Para a confecção das formas da viga, foram empregadas chapas de compensado plastificado de espessura de 14 mm (Fig. 5), devido à facilidade no processo de desmoldagem da viga concretada.



Fig. 5. Chapas de compensado plastificado. (MADESUL, 2022).

DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA BÁSICA DA VIGA COM OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

A geometria básica da viga foi obtida por meio da otimização topológica previamente definida por Leal (2020), com o auxílio do software de análise estrutural da Ansys, que permite resolver problemas complexos de engenharia estrutural empregando-se o método de elementos finitos (OBS, 2022). A partir desse projeto inicial, foram definidas novas premissas para aprimorar a geometria da viga e melhorar o seu desempenho estrutural, com especial atenção à ancoragem das fibras.

Otimização Topológica

A otimização de um problema estrutural consiste na busca por uma solução ótima dentro de várias configurações possíveis, podendo ser dividida em três classes de problemas (OLINQUEVICZ, 2015):

- Otimização Paramétrica: neste tipo de problema as variáveis de projeto a serem otimizadas descrevem características geométricas da estrutura, tais como espessura ou a área da seção transversal das barras de uma treliça. A forma original da estrutura é mantida;
- Otimização de Forma: consiste na parametrização das curvas do contorno do domínio da estrutura, para que seja encontrada a forma ótima, mantendo a conectividade original;

- Otimização Topológica: este método busca encontrar a melhor distribuição de material dentro de um domínio, pela inserção de vazios em certas regiões do meio contínuo, com a vantagem de não ser necessário mudar a malha de elementos finitos durante o processo de otimização. A topologia consiste na localização, quantidade, forma e conectividade dos vazios internos em um domínio de um sólido.

Na Fig. 6 são apresentados os resultados dos diferentes tipos de problemas de otimização estrutural em uma viga bidimensional biapoada, para a qual se deseja minimizar o volume total com uma restrição de rigidez.

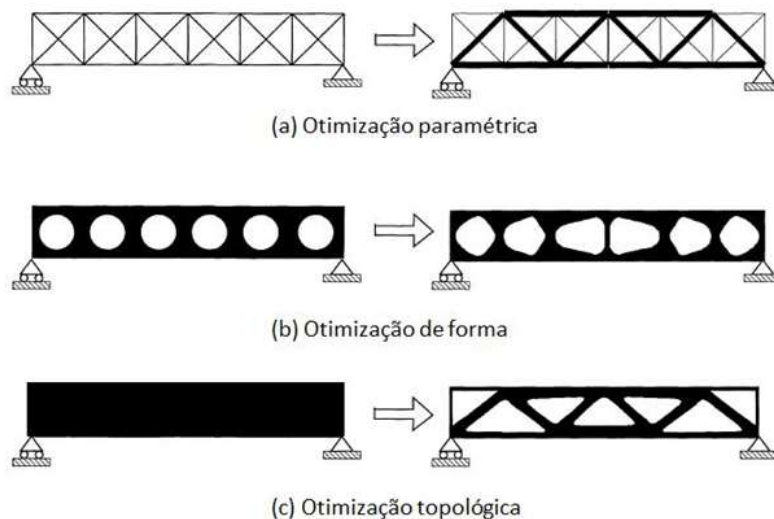


Fig. 6. Tipos de otimização estrutural, com a estrutura não otimizada mostrada à esquerda e a estrutura otimizada mostrada à direita. (BENDSØE e SIGMUND, 2003).

Pode-se citar, como um bom exemplo da aplicação de métodos de otimização estrutural, a solução de problemas que envolvem o projeto de estruturas complexas, como é o caso das estruturas em casca. Essas estruturas são superfícies curvas e com uma espessura relativamente pequena quando comparada com as outras dimensões, e são caracterizadas pela elevada rigidez, leveza, capacidade de manipulação geométrica e elevado desempenho estrutural. Entretanto, apresentam dificuldades na construção (em muitos casos têm geometrias muito complexas) e com

elevado custo. Devido às suas características, têm uma ampla gama de aplicações em várias áreas da engenharia, desde a engenharia civil, engenharia de energia e química, engenharia estrutural, engenharia naval, engenharia aeronáutica, etc. Exemplos de aplicações são: túneis, fuselagem de aviões e submarinos, silos metálicos e reservatórios, barragens de arco, coberturas, etc. A geometria destas estruturas influencia diretamente na sua eficácia global, tornando-se assim uma ótima solução o uso da otimização de forma e topologia para maximização da performance estrutural (SANCHES, 2017).

O método de otimização topológica para o projeto de estruturas foi introduzido como ferramenta computacional em Bendsøe e Kikuchi (1988) com o método da homogeneização aplicado na solução de problemas de minimização do *compliance*. Programas comerciais estão disponíveis e o método de otimização topológica é uma tecnologia padrão em muitas aplicações de problemas estruturais e não estruturais (BENDSØE e SIGMUND, 2003).

Atualmente, a otimização da topologia de estruturas, principalmente na indústria aeroespacial, aeronáutica e automotiva, tem se mostrado efetiva na redução da quantidade de material utilizado, com um grande potencial de impacto em seu custo e peso, ambos extremamente importantes para a construção civil. Entretanto, segundo Leal (2020), sua aplicação na indústria da construção civil, como uma solução alternativa ao projeto realizado nas estruturas de concreto armado convencionais, ainda é um processo inovador e que apresenta diversas dificuldades, principalmente em mercados emergentes como o brasileiro.

Inicialmente, esta pesquisa manteria a geometria da viga idêntica à do trabalho realizado por Leal (2020), sendo apenas implementado o processo aprimorado da ancoragem das fibras de carbono. Porém, com o intuito de otimizar a estrutura, a redução de volume de concreto, que era de 41% na pesquisa de Leal (2020), passou para 64%, quando comparado com a viga convencional.

Para chegar a tal resultado o processo baseou-se nas condicionantes de projeto estabelecidas por Leal (2020), dentre as quais uma era a carga de projeto, que deveria ser igual à carga de ruptura da viga convencional, com os mesmos apoios e mesmo modo de carregamento. A viga convencional de concreto armado, que serviu como referência em seu estudo, resistiu a 9,8 tf. Levando em consideração essa premissa, optou-se por realizar o dimensionamento das novas seções da viga otimizada baseando-se na ideia de que a mesma deveria resistir também a um carregamento total de 9,8 tf, para que se pudesse comparar os custos das duas vigas com o mesmo desempenho. Também foi definido que o concreto a ser utilizado na viga deveria ter um f_{ck} acima de 60 MPa. Foi adotada, para os cálculos de dimensionamento de seções, a resistência do concreto igual de 69 MPa.

O processo iniciou-se com o desenho de uma treliça plana, reproduzindo esquematicamente a geometria da viga topologicamente otimizada por Leal (2020), conforme a Fig. 7 abaixo. Essa etapa teve por finalidade calcular as tensões de tração e compressão, utilizando-se o software *Ftool (Two-dimensional Frame Analysis Tool)*, que é um programa gráfico-interativo para a análise estrutural de pórticos planos (MARTHA, 2018).



Fig. 7. Treliça plana utilizada para o cálculo dos esforços na viga com otimização topológica.

A viga foi considerada biapoiada nas extremidades, sendo o apoio da esquerda de 2º gênero e o da direita de 1º gênero, com aplicação da carga vertical de 9,8 tf, equivalente a 96 kN, distribuídos em dois pontos, a um terço e dois terços da viga, sendo cada ponto de carga de 48 kN.

Para o cálculo das tensões, o programa exige o módulo de elasticidade do material, que foi calculado com base na resistência do concreto de 69 MPa, conforme os resultados obtidos nos testes com os corpos de prova. Foi utilizada a Eq. 1 abaixo, conforme a NBR 8522 (ABNT, 2017), para cálculo do módulo de elasticidade do concreto:

$$E_{ci} = 5,60 \times \sqrt{f_{ck}} = 5,60 \times \sqrt{69} = 46,52 \text{ GPa} . \quad (1)$$

O software *Ftool* gerou o resultado dos esforços nos membros da treliça conforme a Fig. 8 abaixo.

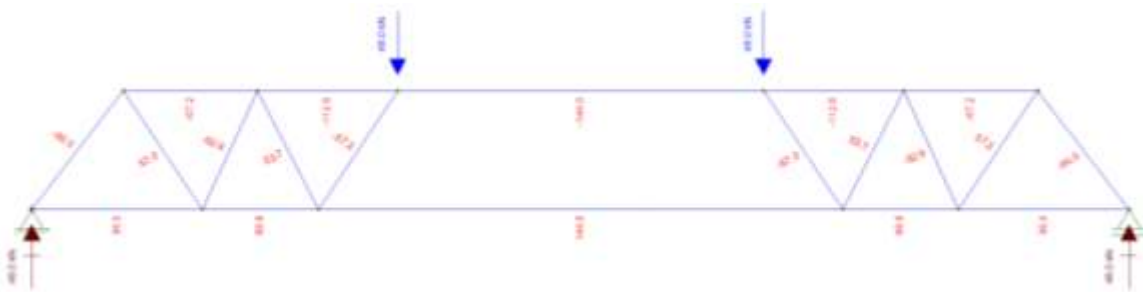


Fig. 8. Tensões da treliça final extraída da viga otimizada.

Em seguida, foram redesenhadas as seções interna da viga original de Leal (2020), garantindo a simetria dos dois lados e mantendo as seções das bielas constantes. Nessa solução, foi adotada a espessura de 2 cm para as bielas (compressão) e 1 cm para os tirantes (tração), apenas o suficiente para o recobrimento da fibra de carbono. Na Fig. 9 abaixo são representados o modelo planificado da treliça (em rosa) e a geometria da nova viga otimizada (em preto), onde a numeração indica os nós de ancoragem das fibras de carbono.



Fig. 9. Geometria da nova viga otimizada (em rosa) com a sobreposição do traçado da treliça plana (em preto).

Foram calculadas as tensões de compressão e tração para a nova geometria da viga. Observou-se que o banzo superior central apresentava o maior valor de esforço de compressão (144 kN) e a maior distância entre apoios. Em função dessa condição, foi calculada a altura necessária dessa seção da viga para que não ocorresse flambagem, utilizando-se o método de Euler (PALIGA, 2019), conforme apresentado na Eq. 2 abaixo, apesar da flambagem não ser usualmente considerada para o concreto sem armadura:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_{ci} I}{(L)^2} = \frac{\pi^2 E_{ci} (b_w h_{min}^3 / 12)}{(L)^2}. \quad (2)$$

Com base na Eq. 2 acima e nos valores da carga crítica (P_{cr}), do módulo de elasticidade do concreto (E_{ci}), do comprimento da coluna considerando a distância de nó a nó que forma a parte central do banzo superior (L) e da largura da seção da viga (b_w), foi realizado o cálculo da altura mínima (h_{min}) da seção da viga utilizando-se a Eq. 3 abaixo:

$$h_{min} = \sqrt[3]{\frac{12 P_{cr} L^2}{\pi^2 E_{ci} b_w}} = \sqrt[3]{\frac{12 \times 144 \times 0,6^2}{\pi^2 \times 46517094 \times 0,15}} = 2,08 \text{ cm}. \quad (3)$$

Com base nesses dados, foi calculada a altura mínima (h_{min}) necessária para que o segmento central do banzo superior não sofresse flambagem, resultando no valor de 2,08 cm. Portanto, o valor inicial de 2 cm não atendeu esse critério e necessitou ser alterado. Por segurança, foi adotada a altura de 3 cm.

SISTEMA DE ANCORAGEM

Tendo como base o projeto inicial da viga otimizada, foi elaborada a proposta de aprimoramento da ancoragem proposta inicialmente por Leal (2020), que consistia na fixação de parafusos nos nós da viga onde iria passar a fibra de carbono. De acordo com os resultados

obtidos em Leal (2020), os nós tracionados da viga foram o ponto crítico da estrutura, sendo a causa do rompimento na região da ancoragem, conforme apresentado na Fig. 11. A falha na ancoragem foi devido ao fato que, a forma de fixação dos parafusos não garantiu que a região de concreto abaixo da ancoragem dos nós tracionados tivesse uma área suficiente para distribuição das tensões, conforme descrito em Leal (2020). Isso ocorreu, pois essa região de concreto era insuficiente para resistir ao esforço de cisalhamento, sofrendo arrancamento no ensaio de flexão estática, levando a viga ao rompimento.

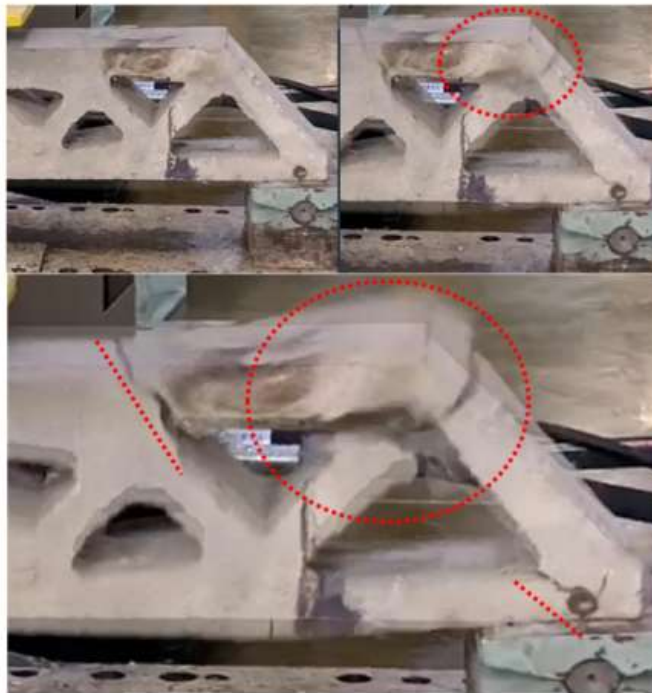


Fig. 11. Rompimento da viga otimizada topologicamente elaborada por Leal (2020).

Diante dessa falha, foi elaborado um novo sistema de ancoragem, utilizando os pinos de cantoneira descritos anteriormente (Fig. 2). Esse novo sistema foi baseado na ideia de utilizar pinos de ancoragem com área superficial maior que os parafusos adotados por Leal (2020), de forma que, ao serem tracionados pela fibra de carbono, a área de concreto abaixo dos pinos seria suficiente para suportar e distribuir as tensões nas regiões nodais. Com a finalidade de garantir a

distribuição homogênea das tensões, os pinos foram posicionados na parte mais extrema possível dos nós tracionados, e foram alinhados com o eixo central das bielas tracionadas. Quanto ao ângulo de abertura interno dos perfis, procurou-se a maior amplitude possível, de forma, também, a abranger a maior área de concreto, onde o ângulo limite foi definido pelo perfil que estaria na extremidade superior da viga, para ser mantido o mesmo padrão e facilidade de execução dos perfis metálicos. Além disso, para que as fibras permanecem alinhadas, concentradas e no mesmo sentido do eixo das bielas tracionadas foram fixadas abraçadeiras de nylon. Conforme apresentado na Fig. 12, pode-se identificar os pinos de ancoragem em vermelho e as abraçadeiras em verde.

Esse aprimoramento no sistema de ancoragem visa melhorar o desempenho da viga ao ser submetida à carga no ensaio de flexão, de forma que o aumento da região da área de concreto nas regiões nodais tracionadas proporciona melhor distribuição de tensões, garantindo que a viga apresente maior resistência ao cisalhamento.



Fig. 12. Geometria final da viga com otimização topológica e sistema de ancoragem aprimorado.

PROJETO FINAL DA VIGA

Finalmente, com a definição do sistema de ancoragem, foi dada sequência no desenvolvimento do projeto final da viga, realizando-se os cálculos para verificação do limite de área de concreto necessária para resistir ao cisalhamento causado pela tração dos perfis de ancoragem da fibra. As soluções são simétricas para os dois lados da viga.

Primeiramente, foram retirados do software *Ftool* os valores das solicitações em cada uma das bielas tracionadas e, com esses valores, foi calculado a tensão de cisalhamento de cada uma

das seções, que é metade do valor da tração. Posteriormente, levando em consideração: a) que apenas existem ensaios de cisalhamento para concreto com a presença de armadura e o concreto em questão é elaborado com fibra de carbono e; b) como não existe uma correlação direta entre resistência à tração e ao cisalhamento, foi adotado que a resistência ao cisalhamento do concreto seria igual à resistência à tração ($f_{ct,m}$), conforme a Eq. 4. Portanto, considerando a resistência do concreto igual a 69 MPa e a largura da seção da viga de 15 cm, foi obtido o valor de resistência do concreto ao cisalhamento, utilizando a base de cálculo da NBR 6118 (ABNT, 2014) para concretos de resistência entre 55 MPa até 90 MPa, resultando que a tração do concreto é equivalente a 7% da resistência à compressão, obtendo o valor de resistência ao cortante igual a 4,83 MPa.

$$f_{ct,m} = 2,12 \times \ln(1 + 0,11f_{ck}) \quad (4)$$

A área necessária para que a viga não rompesse por cisalhamento foi obtida dividindo-se o valor da tensão de cisalhamento em cada um dos nós pela resistência ao cisalhamento do concreto por unidade de área. Esse valor da área foi dividido pela largura da seção da viga (15 cm), obtendo-se o raio que delimitaria as seções necessárias. Os resultados obtidos estão descritos na Tabela 2.

TABELA 2. Cálculo do raio de delimitação de seção de concreto nos nós da viga

Nós	Tração (kN)	Cortante (kN)	Área (cm ²)	Raio (cm)
1 = 10	36,00	18	37,25	2,48
2 = 9	57,20	28,60	59,19	3,95
3 = 8	57,20	28,60	59,19	3,95
4 = 7	53,70	26,85	55,57	3,70
5 = 6	53,70	26,85	55,57	3,70

Usando como base os valores dos raios obtidos nos cálculos acima, foram desenhados, na viga, círculos com os valores dos raios nos nós correspondentes, fixando o centro na extremidade

de cada uma das abas dos perfis metálicos. Dessa forma, foi delimitado o contorno das seções vazadas junto aos nós. Na Fig. 13, pode-se visualizar esse processo em um dos lados da viga e espelhado para o lado oposto.

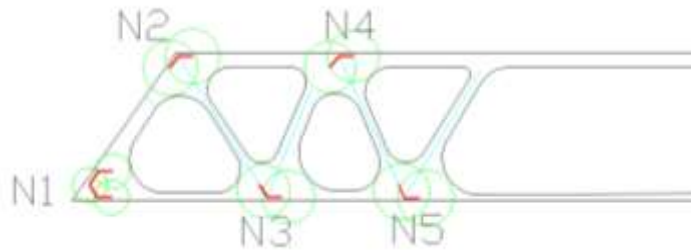


Fig. 13. Delimitação das áreas de concreto.

Definiu-se, por segurança, que o banzo central (com a maior sollicitação de compressão) teria 4 cm de espessura e que as bielas de compressão teriam 2 cm de espessura. Durante a execução da viga, verificou-se que as bielas tracionadas ficaram muito delgadas e não iriam ser suficientes para acomodar as fibras de carbono juntamente com o concreto. Portanto, foi realizada a última mudança nas seções da viga com otimização topológica, em que as bielas tracionadas passariam de 0,5 cm para 3 cm. Com a finalização do projeto da geometria e do sistema de ancoragem aprimorado, foi realizado o dimensionamento de cada um dos feixes de fibra de carbono da viga. Para tal, primeiramente foi calculada a área da seção da fibra de carbono, baseada nos valores fornecidos pelo fornecedor da fibra, a empresa Texiglass (TEXIGLASS, 2022). A fibra utilizada apresenta densidade do fio de $1,76 \text{ g/cm}^3$ e o peso de $0,008 \text{ g/cm}$. Com esses dados, obteve-se o resultado de $0,00455 \text{ cm}^2$ de seção.

Posteriormente, foram definidas três grupos de tirantes de fibra de carbono (Fig. 14), onde a linha 1 em azul é composta pelos tirantes T1 e T9; a linha 2 em rosa é composta pelos tirantes T2 e T8; a linha 3 em amarelo composta pelos tirantes T4 e T6. O grupo de tirantes T3 é composto pelos tirantes de T1 e T2; o grupo de tirantes T7 é composto pelos tirantes de T9 e T8; o grupo de tirantes T5 é composto pelos tirantes dos grupos de tirantes T3, T4, T7 e T6.



Fig. 14. Identificações dos tirantes.

Com essas definições estabelecidas, foi realizado o dimensionamento das fibras com o cálculo da seção de fibra em cada um dos tirantes, utilizando o valor de resistência à tração da fibra (f_{yd}) igual a 490 kN/cm², fornecida na ficha técnica do material, juntamente com o valor dos esforços de tração, já calculados. Por fim, com o valor da área da seção de cada linha, obteve-se o número de fios de fibra de carbono, conforme a Tabela 3.

TABELA 3. Cálculo do número de fios de fibra por linha de tirantes

Valores Obtidos no Projeto					
Elemento	Força [kN]	f_{yd} [KN/cm ²]	$A_{f,nec}$ [cm ²]	Área da Seção [cm ²]	Nº de fios de fibra
T1	36,00	490,00	0,07	0,00455	17
T2	57,20	490,00	0,12	0,00455	26
T3	88,80	490,00	0,18	0,00455	40
T4	53,70	490,00	0,11	0,00455	25
T5	144,00	490,00	0,29	0,00455	65
T6	53,70	490,00	0,11	0,00455	25
T7	88,80	490,00	0,18	0,00455	40
T8	57,20	490,00	0,12	0,00455	26
T9	36,00	490,00	0,07	0,00455	17

Finalizando o dimensionamento, foi realizada a contagem do número de fios de fibra nos tirantes compostos pelos tirantes de outras linhas, para verificar se esse número era igual ou superior ao número de fios necessários para atender o esforço naquele tirante (Tabela 4). Verificou-se que todos os tirantes estavam com o número correto de fibras.

TABELA 4. Verificação do número de fios de fibra nos tirantes compostos

Quantitativo de Fibras					
Tirantes que compõem	Tirantes	Mínimo	Verificação	Reforço	Condição
T1, T2, T8 e T9	T3 e T7	40	17+26	-	OK
T3, T4, T6 e T7	T5	65	17+26+25	-	OK

Finalizando, obteve-se o número de voltas necessárias em cada uma das composições das linhas de tirantes, conforme a Tabela 5, concluindo o projeto da viga com otimização topológica com fibra de carbono.

TABELA 5. Quantitativo de voltas das fibras por linha

Comprimento de Fibra			
Linha	Número de fios de fibras	Número de voltas necessário	Número de voltas adotado
Linha 1	17	8,5	9
Linha 2	26	13,0	13
Linha 3	25	12,5	13

CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPO DA VIGA

Inicialmente, foi impressa a planta da viga em escala real e fixada no fundo da forma de compensado, com o intuito de proporcionar o posicionamento correto dos blocos de isopor, dos perfis de ferro e da área de passagem das fibras de carbono. Após a colagem da planta, foram realizados os furos pelos quais os perfis metálicos seriam fixados. Dessa forma, o perfil foi rosqueado em cada uma das posições, conforme a Fig. 15, e para garantir a rigidez, foi aplicada cola epóxi na base do perfil de ancoragem.



Fig. 15. Vista superior dos perfis metálicos fixados.

Com o posicionamento dos perfis metálicos, foi iniciado o processo de transpasse das linhas de fibra de carbono, conforme o dimensionamento realizado anteriormente. O processo teve início pela linha 3, sendo a mais interna na viga. Inicialmente, foi dado um nó na fibra em volta do perfil metálico e foi realizado o transpasse, entre cada um dos perfis. Posteriormente,

realizou-se o transpasse da linha 2 e, por fim, da linha 3, seguindo o mesmo processo em cada uma delas. Concluindo o processo de execução do transpasse das linhas de fibra de carbono, conforme apresentado na Fig. 16, posicionou-se as abraçadeiras de nylon nos perfis superiores da viga, que representam os nós N2, N4, N9 e N1, fazendo com que as mesmas ficassem unidas e na mesma direção do vão previamente marcado no projeto, conforme apresentado na Fig. 17. Concluído esse processo, foi aplicada uma camada de resina (Fig. 3) em toda a fibra de carbono, garantindo que a fibra ficasse rígida dentro da estrutura de concreto.



Fig. 16. Vista superior da fibra de carbono transpassada.



Fig. 17. Fixação das abraçadeiras de nylon.

A segunda parte do processo de execução foi realizada 24 horas após a aplicação da resina, para garantir a cura completa do material, sendo iniciada com o revestimento das formas de poliestireno (Fig. 4b) com filme plástico, para que no processo de concretagem o poliestireno não aderisse ao concreto, facilitando o processo de desmoldagem da viga. Finalizando essa etapa, foi realizada a fixação do poliestireno com parafusos por baixo da forma para garantir sua

fixação. E por fim, foram fixadas a partes laterais da forma com parafuso, concluindo o processo de montagem da viga, conforme apresentado na Fig. 18.



Fig. 18. Forma da viga concluída.

Concluindo o processo, foi realizada a concretagem da viga, o qual foi realizado utilizando-se como base o traço do concreto pré-estabelecido e determinado anteriormente neste trabalho.

ENSAIO DE ROMPIMENTO DA VIGA PARA OBTENÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA

A viga passou por um processo de cura de 24 dias. Após esse período, a viga foi submetida ao ensaio de flexão estática em um prensa de aplicação de carga por bomba hidráulica de pistão manual, para a verificação do comportamento da viga quando submetida aos esforços solicitantes. A taxa de aplicação de carga foi de 26,59 kN/minuto.

Na Fig. 19a, pode-se visualizar o posicionamento da viga na prensa, apoiada sobre dois roletes nas extremidades. Para a aplicação de carga utilizou-se um perfil em “I” sobre dois roletes, posicionados a um terço e dois terços do comprimento da viga, conforme previsto no projeto. Após o início da aplicação de carga, no instante de 51 segundos, a viga colapsou com uma carga de 2.303 kgf (22.592 N), rompendo as fibras do tirante T7, conforme pode ser visualizado na Fig. 19 b.



(a)



(b)

Fig. 19. (a) Posicionamento da viga na prensa e (b) rompimento da viga.

ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE RUPTURA

O resultado obtido no ensaio de flexão estática mostrou que a viga entrou em colapso devido ao esforço solicitante de tração no tirante T7, conforme a Fig. 19b. Em uma análise inicial, verificou-se que os fios de fibra desse tirante não resistiram ao esforço de tração, rompendo sob um esforço significativamente menor que a sua capacidade teórica de carga. Duas hipóteses podem ser formuladas para explicar a baixa capacidade de carga do tirante T7: a) a capacidade real de carga da fibra é muito inferior à capacidade informada pelo fornecedor; b) as fibras foram danificadas durante o ensaio por atrito com a matriz de concreto.

Novos ensaios deverão ser realizados para elucidar essa questão. Porém, pode-se verificar que o sistema aprimorado de ancoragem foi eficiente e demonstrou potencial de uso, cumprindo a sua função de garantir que a área de seção de concreto não sofresse colapso por arrancamento, devido ao cisalhamento. Isso ficou evidente, pois o colapso foi diretamente na fibra, conforme exibido na Fig. 20.



Fig. 20. Fibra rompida na estrutura da viga.

Ainda, observando os resultados do ensaio, evidencia-se que a estrutura da viga nas demais regiões permaneceu intacta e o concreto não apresentou fissuras nas áreas de compressão, comprovando que o concreto resistiu plenamente aos esforços solicitantes. Dessa forma, comprovou-se que o colapso da viga foi estritamente pelo rompimento da fibra de carbono.

COMPARATIVO COM O CUSTO E DESEMPENHO ESTRUTURAL DE VIGA DE SEÇÃO PLENA

Finalmente, com os quantitativos e valores de mão-de-obra e de materiais, foi possível elaborar o comparativo de custos extraídos dos valores reais de compra dos materiais entre a viga tradicional de concreto armado e ao protótipo da viga com otimização topológica com fibra de carbono. Conforme apresentado nas Tabelas 6 e 7, verifica-se que a viga de fibra de carbono, tem um custo de 20% inferior ao da de concreto armado, o que é uma redução de custos considerável. Outro ponto relevante de redução de custos é referente ao sistema responsável pela resistência à tração: na viga de concreto armado é o aço, responsável por 39% do custo final da viga, e na outra viga é a fibra, que é 12% do custo total. Além disso, como não é necessário serralheiro para realizar a dobra do aço na viga com fibra de carbono, isso também diminui o custo de execução.

TABELA 6. Custo da viga de concreto armado

VIGA CONCRETO ARMADO			
Discriminação	Und.	Qtd.	MO + MATERIAL (R\$)
Formas de madeira	m ²	1,31	224,14
Armaduras - CA50 Ø6.3mm	kg	2,50	50,09
Armaduras - CA50 Ø10.0mm	kg	8,15	101,75
Concreto C30	m ³	0,054	16,48
Total			392,45

TABELA 7. Custo da viga de fibra de carbono

VIGA CONCRETO COM FIBRA DE CARBONO			
Discriminação	Und.	Qtd.	MO + MATERIAL (R\$)
Formas de madeira	m ²	0,994	177,39
Fibra de carbono C8000 - 12K	kg	0,086	38,86
Concreto C60	m ³	0,020	15,18
Ancoragem	m	1,800	22,50
Formas de Poliestireno	m ²	1,00	73,00
Total			326,93

Quanto ao comparativo de desempenho estrutural, a viga de fibra de carbono resistiu apenas a 22,56 kN, enquanto que a viga de concreto, elaborada e ensaiada por Leal (2020), resistiu à 96,14 kN. Apesar desse resultado de resistência ao carregamento da viga de fibra de carbono não ter sido satisfatório, pode-se fazer algumas análises positivas e otimistas do uso dessa nova tecnologia no mercado. No ensaio de flexão, pode-se constatar que a viga de fibra de carbono com otimização topológica respondeu bem aos esforços de compressão, visto que o concreto não sofreu fissuração e não sofreu rompimento por compressão.

CONCLUSÃO

O concreto armado, apesar de ser muito eficiente e seguro, é uma tecnologia do século XIX, portanto é preciso inovar e incorporar novas técnicas na construção civil, que atendam o mesmo desempenho estrutural, porém visando melhor viabilidade econômica e inovação tecnológica.

A pesquisa realizada nesse trabalho mostrou que a tecnologia de elementos de concreto com otimização topológica e uso de fibra de carbono ainda precisa de aprimoramentos. Dentre esses, cabe destacar o melhor conhecimento do comportamento dos fios de fibra na matriz de concreto quando submetidos à carga, e o projeto do sistema de ancoragem para garantir que esse sistema cumpra sua função.

Porém, ao mesmo tempo em que o ensaio da viga otimizada com fibra de carbono não forneceu resultados satisfatórios em relação à resistência ao carregamento, consegue-se extrair dados positivos, como: 1) o adequado desempenho das seções topologicamente otimizadas, que resistiram de forma satisfatória aos esforços de compressão quando em carga, com uma redução de concreto de 64%, em comparação com a viga tradicional de concreto armado, embora limitados pela carga reduzida no ensaio; 2) a viabilidade da execução de vigas topologicamente otimizadas, utilizando fibras de carbono.

Finalmente, pode-se concluir que o sistema exige mais estudos para aprimorar a técnica da substituição do aço pela fibra de carbono, para que possa começar a ser utilizada na construção civil, visando à redução de custos e implementação dessa nova tecnologia.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a minha mãe Aída Farina Correia e ao meu pai Antonio Henrique Correia por todo o apoio envolvido, desde o início dos meus estudos no

colégio, até a minha graduação na universidade, e graças a vocês eu estou conquistando o meu diploma, obrigada por tudo que vocês fizeram e continuam fazendo por mim.

Queria agradecer ao meu orientador professor José Alberto Azambuja, por todo o suporte, paciência e dedicação na orientação da pesquisa do tema do meu Trabalho de Conclusão de Curso.

Agradeço, também, o suporte do laboratório Lamtac da UFRGS para a realização de moldagem de corpos de prova e ao laboratório da UniRitter para o ensaio de flexão da viga, que foram essenciais para a pesquisa e elaboração do meu projeto de conclusão do curso.

E, por fim, agradeço a todos os meus amigos e familiares que estiveram presente comigo nessa batalha e vivência na faculdade, e por todo suporte e apoio na conclusão da minha graduação.

REFERÊNCIAS

ABNT (2014). “Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.” *NBR 6118*, ABNT, Brasil.

ABNT (2015). “Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – Procedimento.” *NBR 5738*, ABNT, Brasil.

ABNT (2017). “Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão - Concreto.” *NBR 8522*, ABNT, Brasil.

ABNT (2018). “Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio.” *NBR 5739*, ABNT, Brasil.

AWBK (2022). “Fibra de Carbono.” *Produtos*, <<http://www.awbk.com.br/carbono.html>> (Mai. 5, 2022).

- Beber, A. J. (2003). “Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibras de carbono.” Tese de Doutorado, Universidade do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- Bendsøe, M. P., Kikuchi, N. (1988). “Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method.” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 71(2), 197–224.
- Bendsøe, M. P., Sigmund, O. (2003). *Topology optimization: theory, methods, and applications*. Springer-Verlag, ISBN 3-540-42992-i. Berlin.
- Leal, T. L. Q. V. (2020). “Desenvolvimento de tecnologia de produção de vigas pré-fabricadas com otimização topológica.” Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- Machado, A. (2007). *Reforço de estruturas de concreto com fibras de carbono*. Editora Pini, <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/125/artigo285695-7.aspx>> (Mai. 5, 2022).
- MADESUL (2022). “Compensado Plastificado.” *Nossos Produtos*, <<https://www.madesulrs.com.br/pageb/?item=55>> (Mai. 5, 2022).
- Martha, L. F. (2018). “Ftool—Um programa gráfico-interativo para ensino de comportamento de estruturas.” *Ftool – Ver. 4.00.04*, <https://www.tecgraf.puc-rio.br/ftool/index_pt.html> (Mai. 5, 2022).
- Montanari, N., Gonçalves, E. P. (2017). “Fibras de carbono na construção civil.” *Revista Univap*, 22(40), 515.
- OBS (2022). “Ansys Structural Analysis Software.” *Structural Analysis Software*, <<https://osbsoftware.com.br/produto/structural-analysis-software>> (Mai. 5, 2022).

Olinquevicz, D. F. (2015). “Otimização Topológica de estruturas contínuas de polipropileno com restrições de tensão baseadas em critérios de escoamento.” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

Paliga, A. R. (2019). “Flambagem.”, *Resistência dos Materiais II*
<<https://wp.ufpel.edu.br/alinepaliga/files/2014/08/Flambagem.pdf>> (Mai. 5, 2022).

Sanches, R. E. M. (2017). “Otimização simultânea de forma e topologia de estruturas casca.” Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Leiria.

Souza, V. C. M. e Ripper, T. (1998). Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto. Editora Pini.

TEXIGLASS (2022). “Fios Roving/Torcidos.”, *Produtos*
<http://texiglass.com.br/site/produtos/fios_roving.php> (Mai. 5, 2022).