

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANDRÉ PEREIRA SILVA

**COMPARATIVO DE MODELAGEM DE VIGAS DE AÇO  
REFORÇADAS COM PRFC EMPREGANDO ELEMENTOS FINITOS  
DE CASCA E ELEMENTO FINITOS SÓLIDOS TIPO CASCA**

CAMPO MOURÃO

2021

ANDRÉ PEREIRA SILVA

**COMPARATIVO DE MODELAGEM DE VIGAS DE AÇO  
REFORÇADAS COM PRFC EMPREGANDO ELEMENTOS FINITOS  
DE CASCA E ELEMENTO FINITOS SÓLIDOS TIPO CASCA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, para obtenção do título de bacharel em engenharia civil.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Rigobello

CAMPO MOURÃO

2021



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Câmpus Campo Mourão  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Departamento Acadêmico de Construção Civil  
Coordenação de Engenharia Civil



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

**COMPARATIVO DE MODELAGEM DE VIGAS DE AÇO REFORÇADAS COM PRFC  
EMPREGANDO ELEMENTOS FINITOS DE CASCA E ELEMENTO FINITOS SÓLIDOS  
TIPO CASCA**

por

**André Pereira Silva**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 09h00min do dia 05 de Maio de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof. Dr. Marcelo Rodrigo Carreira**  
( UTFPR )

**Prof. Dr. Douglas Fukunaga Surco**  
( UTFPR )

**Prof. Dr. Ronaldo Rogibello**  
(UTFPR)  
**Orientador**

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

**Prof. Dr(a). Paula Cristina de Souza**

*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso*

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço aos meus pais por sempre estarem presentes, prestando todo o suporte, meu pai Francisco, e a minha mãe Miriane agradeço pelo bons conselhos e carinho que recebi em todo esse processo acadêmico.

Agradeço a minha querida Universidade Tecnológica Federal do Paraná por fornecer suporte institucional, a toda a estrutura da universidade aos professores que compartilharam seu conhecimento sempre de forma profissional e adequada. Principalmente ao orientador Ronaldo que se dispôs a fornecer suporte nessa caminhada.

Agradeço ao Prof. Carlos Humberto Martins da UEM pela disponibilização e suporte com as simulações no ANSYS.

Agradeço também aos colegas de curso que se dispuseram a estar presentes e ajudar com o que foi preciso, e também aos colegas fora do curso que também prestaram seu suporte.

## RESUMO

Este trabalho busca, em modelagem computacional com o software ANSYS, apresentar a possibilidade de substituição do elemento de casca SHELL181 pelo elemento sólido tipo casca SOLSH190 em simulações numéricas em vigas de aço de seção I com reforço de polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC).

No mundo real, todas as geometrias são 3D. O uso de elementos sólidos tipo casca facilita o processo de geração de malhas para análise de estruturas de paredes finas a partir de modelos 3D de softwares CAD com pouca necessidade de pré-processamento. Elementos de casca, por sua vez, necessitam que geometrias 3D sejam convertidas em planos, usualmente na superfície média da seção transversal, com necessidade de considerável pré-processamento antes da geração do modelo de elementos finitos.

Por meio de simulações realizadas de vigas de aço reforçadas com PRFC e comparação com resultados presentes na literatura, ficou evidente a possibilidade da substituição dos elementos de casca pelos elementos sólidos tipo casca, com precisão adequada e, principalmente, com a vantagem de geração mais simples da geometria do modelo e malha de elementos finitos.

**Palavras-chave:** Elemento sólido tipo casca, PRFC, Viga de Aço, Reforço

## **ABSTRACT**

This work seeks, using modeling with the software ANSYS, show the possibility of replace the shell element SHELL181 with the solid-shell element SOLSH190 through numeric simulations in section I steel beams reenforced with Carbon Fiber Reinforced polymer (CFRP).

In real world, all geometries are in three dimensions. The use of solid shell elements makes the process of mesh generation easier to analyze thin walls from 3D models of CAD softwares, with little pre-processing. Although, shell elements need to convert 3D geometries into planes, usually at the transversal section, and is very relevant the pre-processing before the infinite element model creation.

Though the simulations un steel beams reenforced with CFRP and comparing to the results in literature, is very clear the possibility of replacement of shell elements with solid-shell elements, with a satisfactory accuracy, and, mainly because of the advantage of easier way to generate model's mesh.

**Key-words:** Solid-shell element, CFRP, Steel beam, Reinforcement

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 - Esquema de um compósito a) Partículas b) Fibras .....</b>	<b>8</b>
<b>Figura 2 - Fase contínua e Fase dispersa .....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 3 - Curva Tensão x Deformação Fibras de Carbonono .....</b>	<b>11</b>
<b>Figura 4 - Diagrama Tensão x Deformação Fibras .....</b>	<b>11</b>
<b>Figura 5 - Gráfico Tensão x Deformação Adesivos.....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 6 - Modos de falha da viga de aço reforçada com PRFC .....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 7 - Geometria do elemento SHELL181 .....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 8 - Geometria do elemento SOLSH190 .....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 9 - Esquema da viga de aço ensaiada .....</b>	<b>20</b>
<b>Tabela 8 - Propriedades geométricas e materiais do laminado de PRFC .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 10 - Esquema da viga de aço ensaiada, valores em mm .....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 11 - Viga sem reforço - Visão superior .....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 12 - Viga com reforço B120 - Visão superior .....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 13 - Viga com reforço B120 - Visão inferior .....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 14 - Viga de controle Carregamento x Deslocamento.....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 15 - B65 Carregamento x Deslocamento .....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 16 - B120 Carregamento x Deslocamento .....</b>	<b>27</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores típicos das propriedades do PRFC em forma de laminados e forma de placas .....	13
Tabela 2 - Valores típicos das propriedades de adesivos sob tração .....	14
Tabela 3 - Propriedades materiais do aço.....	20
Tabela 4 - Propriedades geométricas da viga de aço .....	20
Tabela 5 - Propriedades geométricas e materiais do laminado de PRFC.....	20
Tabela 6 - Propriedades materiais do PRFC .....	21



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>5</b>
<b>2.3 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>6</b>
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>7</b>
<b>3.1 Método convencional de reforço de estruturas de aço .....</b>	<b>7</b>
<b>3.2 Compósitos.....</b>	<b>8</b>
<b>3.3 Polímeros reforçados com Fibra (PRF) .....</b>	<b>9</b>
<b>3.4 Conhecimento atual do uso do PRF em estruturas de aço .....</b>	<b>9</b>
<b>3.5 Fibra de Carbono.....</b>	<b>10</b>
<b>3.6 Matriz Polimérica .....</b>	<b>12</b>
<b>3.7 Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC) .....</b>	<b>12</b>
<b>3.8 Adesivo para reforço de estruturas de aço com PRFC.....</b>	<b>13</b>
<b>3.9 Processo de colagem.....</b>	<b>14</b>
<b>3.10 Reforço à flexão de vigas de aço com PRFC .....</b>	<b>15</b>
<b>3.11 Definição Elemento Finito .....</b>	<b>16</b>
<b>3.12 SHELL181.....</b>	<b>16</b>
<b>3.13 SOLSH190 .....</b>	<b>17</b>
<b>4 METODOLOGIA DE PESQUISA.....</b>	<b>19</b>
<b>4.1 Simulação Numérica .....</b>	<b>19</b>
<b>4.2 Estudo de Canais (2018) .....</b>	<b>19</b>
<b>5 MODELAGEM NUMÉRICA .....</b>	<b>21</b>
<b>5.1. Considerações Importantes .....</b>	<b>21</b>

<b>5.2. Viga De Controle (CB)</b> .....	<b>21</b>
<b>5.3 Modelos Reforçado Com PRFC</b> .....	<b>23</b>
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>25</b>
<b>6.1. Viga De Referência</b> .....	<b>25</b>
<b>6.2 Modelos Reforçado Com PRFC</b> .....	<b>26</b>
<b>6.2.1 Modelo Reforçado B65</b> .....	<b>26</b>
<b>6.2.2 Modelo Reforçado B120</b> .....	<b>27</b>
<b>7 CONCLUSÃO</b> .....	<b>28</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>29</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Dentro do campo das simulações numéricas com o método dos elementos finitos, é necessária a escolha do elemento finito a ser utilizado. No presente trabalho emprega-se o software ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 18.1 (ANSYS Inc., 2017) que disponibiliza por padrão uma série de elementos para o uso.

Para a análise de vigas de aço, ocorre uma predileção entre os elementos de casca em relação aos elementos de sólidos. Em síntese os elementos de casca partem de uma geometria bidimensional, enquanto os sólidos, de uma geometria tridimensional.

Em geral, quem busca realizar simulações dessa natureza tende a escolher os elementos de casca, graças ao seu menor custo computacional. Em contrapartida, a modelagem da geometria partindo desse elemento é mais complexa e trabalhosa em relação aos elementos sólidos.

Quando se trabalha com elementos de casca, que são bidimensionais, existe a necessidade de representar uma geometria tridimensional por meio de um conjunto de planos bidimensionais. Esse pré-processamento além de tornar o estudo mais trabalhoso, aumenta a possibilidade de erros.

Em relação aos elementos sólidos, que já são tridimensionais, a modelagem da geometria passa ser bastante simplificada, sendo a desvantagem o tempo de processamento.

Recentemente, estudos de reforços em estruturas metálicas com a utilização de Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) têm atraído o interesse do meio técnico, especificamente os que usam Fibras de Carbono (PRFC), aplicados em forma de laminados. O PRFC apresenta alta resistência, é leve e tem grande resistência contra a corrosão. As aplicações podem ser diversas, como pontes de ferro, pontes de aço, elementos de treliça, vigas de aço em edifícios, entre outros.

Um dos métodos mais utilizados para se estudar os efeitos do reforço nas estruturas é a simulação usando algum software computacional, que em geral se utilizam do método dos elementos finitos (MEF). Este trabalho busca apresentar a possibilidade de substituição do elemento de casca SHELL18 pelo elemento sólido tipo casca SOLSH190, identificando as principais diferenças de modelagem e de resultados obtidos nas simulações de vigas de aço com seção I reforçadas com PRFC.

Em nível nacional, o tema não foi devidamente explorado e a literatura ainda é escassa. Com essa realidade, este trabalho busca contribuir com este campo de estudo.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Realizar um comparativo da modelagem com os elementos finitos SOLSH190 e SHELL181 na simulação de vigas de aço com seção I reforçadas com PRFC no software ANSYS.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Os seguintes objetivos específicos foram levantados para se atingir o objetivo principal anteriormente citado:

- a) Estudar o comportamento mecânico de vigas de aço reforçadas com (PRFC);
- b) Compreender os ensaios e modelos numéricos disponíveis na literatura referentes à simulação do comportamento de vigas de aço reforçadas à flexão com PRFC;
- c) Realizar a modelagem e simulação de modelos numéricos de vigas com e sem reforço com o uso dos elementos SOLSH190 comparar com os resultados da modelagem com SHELL181 apresentados em CANALES (2018).
- d) Analisar as diferenças dos métodos e dos resultados.

## 2.3 JUSTIFICATIVA

A capacidade de processamento computacional apresentou uma melhora significativa em relação a década passada, sendo que problemas de simulação que anteriormente eram limitados pelo baixo poder de processamento computacional, hoje já conseguem ser trabalhados pelos pesquisadores.

Os estudos que se buscam analisar o uso de reforço de PRFC em estruturas de aço com o uso de simulação numérica no software ANSYS, costumam utilizar os elementos de casca, principalmente o SHELL181.

Conforme anteriormente mencionado, esse elemento apresenta maior dificuldade na etapa de modelagem de geometria tridimensionais em relação a elementos sólidos como o elemento finito SOLSH190.

Para que a substituição geral entre esses elementos possa ser aplicada em estudos de estruturas de aço, é necessária a certificação de sua eficiência em estudos de caso específicos.

Considerando a necessidade de mais estudos e estratégias de modelagem em relação a vigas de aço reforçadas com PRFC, o tema em questão se justifica como objeto de estudo visando uma contribuição ao meio técnico.

## 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1 Método convencional de reforço de estruturas de aço

Visando prolongar a vida útil de uma construção, a engenharia sempre buscou modos de reforçar edificações já existentes. A necessidade do reforço pode advir de diversas fontes, desde a natural diminuição de efetividade da estrutura, ações climáticas ou possíveis erros no projeto inicial.

O reforço em si tem como objetivo aumentar a capacidade de carga de um elemento, ou reestabelecer a capacidade inicial na estrutura. Segundo Teobaldo (2004), reforço de aço pode ser por incremento da seção transversal mediante acréscimo dos novos elementos em aço soldados ou parafusados àqueles existentes, resultando em maior resistência e rigidez, ou pelo aumento de rigidez das ligações com o emprego de perfis, placas, chapas, etc, de maneira a melhorar o comportamento da estrutura.

De acordo com Zhao (2014), o método convencional para reforçar estruturas metálicas consiste em cortar e substituir ou fixar as placas ou chapas de aço ao elemento. No entanto essas placas são pesadas, volumosas e de difícil fixação, e ainda apresentam propensão a corrosão e a fadiga.

Demir (2011) diz que o método mais prático para fixar material externo a um elemento já existe se dá através da solda. Entretanto, uma série de verificações devem ser analisadas, como por exemplo a soldabilidade dos materiais em questão, o encolhimento da solda, que pode gerar fissuras futuras ao elemento ou até distorções no elemento.

Os elementos também podem ser fixados através de parafusos, que tem como vantagem ser de mais fácil execução, por outro lado é necessário um espaço maior para a realização do procedimento.

Partindo de que o método conhecido como convencional, quando trata-se de reforço em estrutura metálicas se dá pela fixação de chapas com o uso de solda ou de parafusos, Hollaway e Cadei (2002) levantaram uma série de desvantagens relacionadas a esse método:

- 1) O procedimento de instalação utilizado é trabalhoso e demorado;
- 2) O procedimento requer perfuração e posicionamento adequado das chapas, e a retenção das chapas de aço pesadas em posição até depois da montagem;

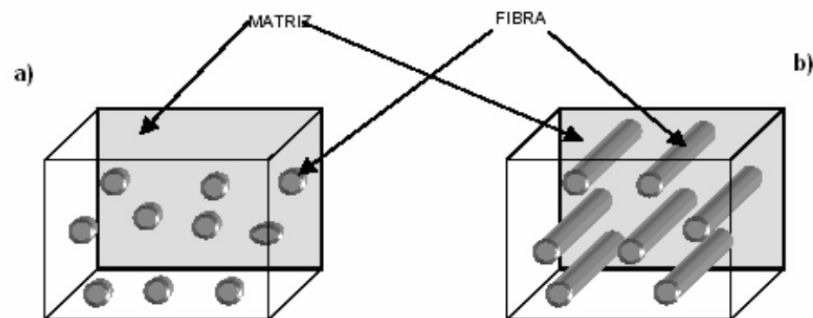
- 3) Existe potencial para fissuração por fadiga da solda nas extremidades das chapas e distorção dos elementos metálicos;
- 4) O aumento do peso dos elementos pode comprometer a capacidade de resistência e aumentar a deflexão;
- 5) A perfuração da estrutura existente provoca um enfraquecimento temporário da estrutura.

### 3.2 Compósitos

Menon (2008) define um compósito como sendo um material estrutural formado pela união de dois ou mais materiais de naturezas diferentes. Os constituintes são combinados ao nível macroscópico sendo que um deles é denominado de fase de reforço e o outro é responsável pela impregnação do reforço, conhecido como matriz (Figura 1). O material resultante possui comportamento superior àquele de seus componentes tomados separadamente.

O material responsável pelo reforço, em geral, é disposto em fibras, podendo ser contínuas ou não, de um material resistente, que são impregnadas em uma matriz com resistência mecânica inferior as fibras.

**Figura 1 - Esquema de um compósito a) Partículas b) Fibras**



**Fonte:** Menon (2008)

Os compósitos são construídos basicamente por duas fases:

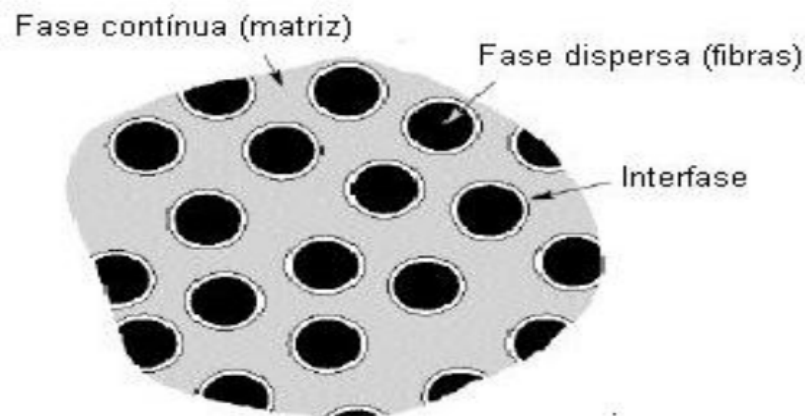
Fase Dispersa (Fibras), apresenta grande resistência, elevado módulo de elasticidade, e é disposto em forma de pequenos filamentos.

Fase contínua(Matriz), relativamente dútil, envolve por completo a fase dispersa, permitindo a boa transferência de esforços entre as fibras.



Esses compósitos apresentam características interessantes para a engenharia, Hull (1987), apresenta algumas propriedades dos compósitos, sendo elas: as elevadas resistência e rigidez, o seu baixo peso específico, a excelente resistência à agressividade ambiental, bem como a possibilidade em admitir propriedades direcionais a nível estrutural, elétrico e magnético, variáveis de acordo com a conveniência

**Figura 2 - Fase contínua e Fase dispersa**



Fonte: Menon (2008)

### 3.3 Polímeros reforçados com Fibra (PRF)

De acordo com Hollaway e Spencer (2000) Polímeros reforçados com Fibras (PRF) consistem em uma matriz de fibra feitas de materiais como carbono, vidro ou fibras de aramite anexadas em uma matriz de resina. Essas fibras podem ser dispostas em diversas direções, em geral aplica-las na direção da tensão tende a ser mais eficiente. Uma placa de PRF é flexível o suficiente para se adequar a superfícies curvas, além de resistir a corrosão e a degradação ambiental.

O elo mais fraco de PRF é o adesivo que liga a placa a estrutura, o comportamento desse adesivo depende das propriedades do metal e do adesivo.

### 3.4 Conhecimento atual do uso do PRF em estruturas de aço

Como dito previamente, o principal uso do PRFC para reforços estruturais na atualidade se dá em construções baseadas no concreto. Segundo Zhao (2014) o conhecimento atual do Polímero Reforçado com Fibra de Carbono no concreto não é

aplicável em um sistema Aço-PRFC, porque de uma distinta diferença no sistema de ligação. Enquanto a principal falha no sistema PRFC-Concreto se dá principalmente na fratura do concreto, o elo mais fraco no sistema PRFC-Aço é o adesivo.

O primeiro estudo que aborda o sistema PRFC-Aço ocorre em 1994, por Sen and Liby, o assunto se torna de maior interesse da comunidade científica depois do ano 2000.

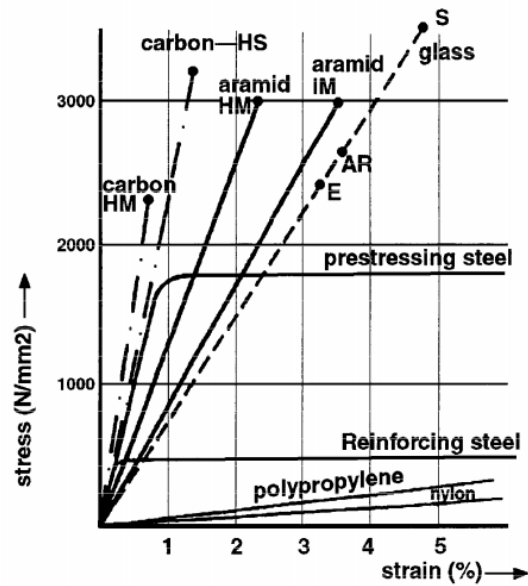
### **3.5 Fibra de Carbono**

Segundo Machado (2011), as fibras de carbono resultam do tratamento térmico (carbonização) de fibras precursoras orgânicas tais como o poliácridonitril (PAN) ou com base no alcatrão derivado do petróleo ou do carvão (PITCH) em um ambiente inerte e, também, através de fibras de rayon.

O processo de produção consiste na oxidação dessas fibras precursoras seguido do processamento a elevadas temperaturas (variando de 1.000oC a 1.500oC para as fibras de carbono a até cerca de 3.000oC para as fibras de grafite).

De acordo com o American Concrete Institute (ACI), as propriedades da fibra de carbono são controladas pela estrutura molecular e o grau de liberdade das moléculas. Onde existem dois tipos de fibras de carbono, as de Alto módulo Tipo I (HM), e alta força Tipo II (HS). A diferença de propriedade entre elas é seu módulo de elasticidade, resultado da diferença da microestrutura das fibras.

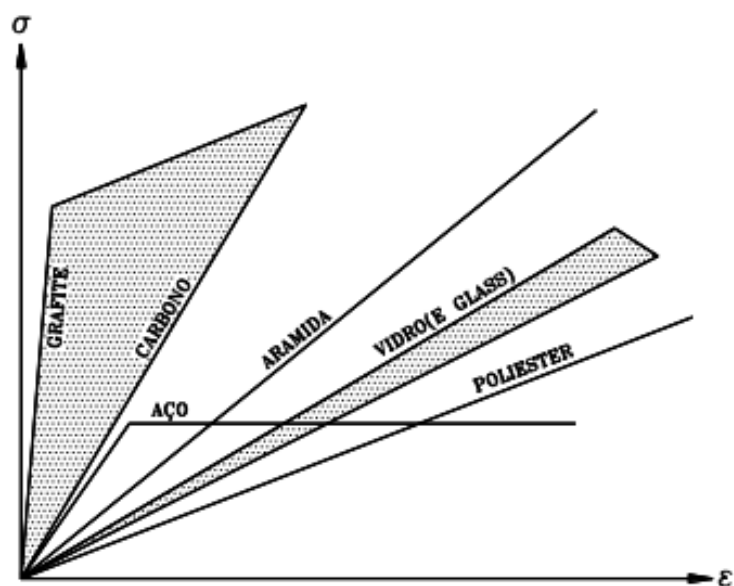
Figura 3 - Curva Tensão x Deformação Fibras de Carbono



Fonte: American Concrete Institute (2002)

Machado (2011) diz que quanto maior a temperatura em que o processo industrial se realiza maior será o módulo de elasticidade do material resultante, que varia desde 100GPa a 300GPa para as fibras de carbono até 650 GPa para as fibras de grafite.

Figura 4 - Diagrama Tensão x Deformação Fibras



Fonte: Machado (2011)

### 3.6 Matriz Polimérica

O American Concrete Institute (ACI), define polímero como uma longa cadeia molecular contendo uma ou mais unidades repetidas de átomos juntas por fortes ligações covalentes. Um material polimérico é a coleção de um grande número de moléculas poliméricas de estrutura química similar.

Menon (2008) diz que a matriz polimérica é constituída à base de uma resina, termorrígida ou termoplástica, que envolve completamente as fibras de reforço. A matriz polimérica de um PRF envolve completamente as fibras dando proteção mecânica e contra agentes agressivos e também promovendo a transferência de tensões.

### 3.7 Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC)

Zhao (2014) diz que os laminados de PRFC são uma boa solução para o reforço de estruturas metálicas graças ao seu módulo de elasticidade ser um valor similar ou superior ao do aço.

O PRFC é classificado em diferentes categorias, sendo elas, PRFC de Módulo Normal, PRFC de alto-módulo e PRFC de ultra-alto-módulo.

Por exemplo, de acordo com Schnerch et al. (2007), Fawzia et al. (2005, 2007), PRFCs com um módulo de elasticidade na extremidade inferior são frequentemente chamados de PRFCs de módulo normal, enquanto PRFCs com módulo de elasticidade na extremidade superior são frequentemente chamados de alto módulo por alguns pesquisadores. Os termos PRFC de alto módulo e PRFC de módulo ultra-alto são usados por outros, como Hollaway e Cadei (2002), Photiou et al. (2006) para descrever as duas categorias acima.

Segundo Shaat et al. (2004), Zhao e Zhang (2007), Hollaway (2010), o PRFC de Módulo Normal tem um módulo de elasticidade de até 250 GPa, enquanto o PRFC de alto módulo tem um módulo de elasticidade acima de 250 GPa

Hollaway e Spencer (2000), afirma que essas propriedades são governadas pela resistência e rigidez das partes componentes, pelo método de fabricação e pela orientação e densidade das fibras. Os valores medidos da placa PRFCs típica e da laminados de PRFC estão listados na Tabela 1.

**Tabela 1 - Valores típicos das propriedades do PRFC em forma de laminados e forma de placas**

<b>Valores típicos das propriedades do PRFC em forma de laminados e forma de placas</b>					
<b>PRFC</b>	<b>Tipos</b>	<b>Módulo de Elasticidade(Gpa)</b>	<b>Resistência à Tração(Mpa)</b>	<b>Deformação na ruptura (%)</b>	<b>Referência</b>
Laminados de PRFC	Módulo Alto	552	1175	0,2	Fawzia (2007)
	Módulo Normal	230	2675	1,2	
Placas de PRFC	Módulo Alto	479	1607	0,36	Wu et al. (2010)
	Módulo Normal	338	1186	Não reportado	Lanier et al. (2009)
		156	2691	1,72	Seracino et al. (2007)
		171	2830	1,55	Sena Cruz et al. (2006)

Fonte: Modificado de Zhao (2014)

### 3.8 Adesivo para reforço de estruturas de aço com PRFC

Segundo Menon (2008) O adesivo é o material responsável pela colagem do PRF na superfície do concreto e pela transferência de tensões, possibilitando a ação conjunta dos materiais. A transferência de tensão é feita no plano da interface concreto-adesivo-compósito, ocorrendo tensões predominantemente cisalhantes, embora tensões normais a essa interface também possam ocorrer.

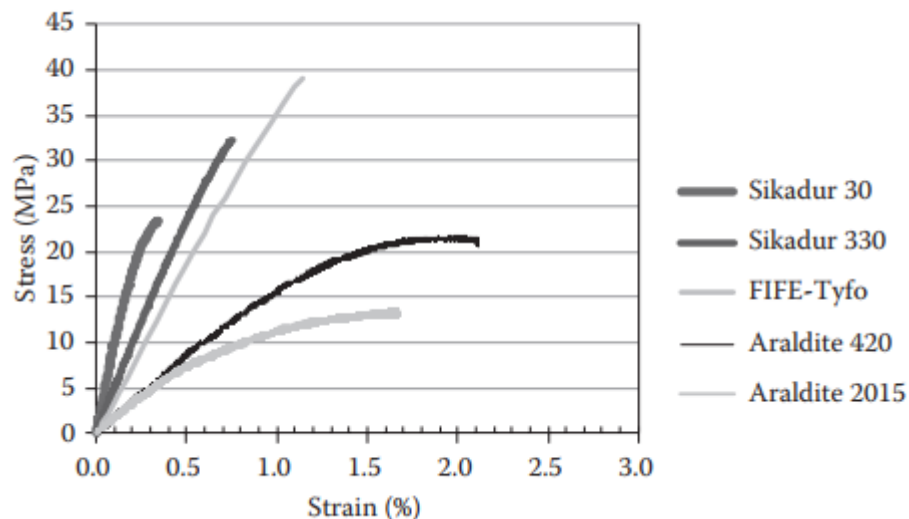
A escolha do adesivo depende do tipo de desempenho desejado, do substrato e das condições do ambiente e de aplicação do compósito na execução. Os adesivos estruturais mais usados e aceitos são as resinas epóxicas.

Hollaway and Cadei (2002) dizem que existe uma variedade de adesivos podem ser usados para ligar compósitos às estruturas metálicas. O mais usado são os adesivos epóxy. O uso de adesivos depende das condições de cura e devem ser compatíveis com os aderentes. Dado o fato que a ligação é o elo mais fraco do sistema Aço-PRFC, é importante entender as propriedades como módulo de elasticidade, resistência última a tração e qual a deformação na ruptura.

**Tabela 2 - Valores típicos das propriedades de adesivos sob tração**

Valores típicos das propriedades de adesivos sob tração				
Adesivo	Módulo de Elasticidade(Mpa)	Resistência à Tração(Mpa)	Deformação na ruptura (%)	Referência
Araldite 2015	1750	14,7	1,51	Fernando et al. 2009
Araldite 420	1828	21,5	2,89	
FIFE-Tyfo	3975	40,7	1,11	
Sikadur - 30	11250	22,3	0,3	
Sikakir 330	4829	31,3	0,75	
Araldite 420	1901	28,6	2,4	Fawzia (2007)
Sikadur 30	9282	24,0	0,3	

Fonte: Modificado de Zhao (2014)

**Figura 5 - Gráfico Tensão x Deformação Adesivos**

Fonte: Zhao (2014)

### 3.9 Processo de colagem

Segundo Zhao (2014), para o processo de colagem da placa de PRFC no elemento metálico, deve-se primeiro, com o uso de uma esmerilhadeira, remover o revestimento galvanizado e entre outras impurezas que o material pode conter. Com o uso de acetona, o elemento deve ser limpo, para que se possa aplicar o adesivo.

Para o adesivo, pode ser usado por exemplo Adesivo Cola Epóxi tipo Araldite A e Araldite B, que devem ser misturados de acordo com o peso recomendado dado

pelo fornecedor. A aplicação se dá por uma fina camada de revestimento, que deve ser aplicada de maneira uniforme ao longo do comprimento necessário para a colagem.

O PRFC então deve ser colocado lentamente sobre o adesivo, e para remover possíveis bolhas, ele deve ser esfregado em forma circular. Após isso é preciso manter a amostra em temperatura ambiente por volta de 1 semana, e então realizar uma pós-cura com temperatura de no mínimo 50°C para garantir a polimerização completa.

De acordo com Narmarshiri e Jumaat (2009), o adesivo precisa ser forte o suficiente para aguentar a alta tensão gerada pelo carregamento, o que graças a evolução da tecnologia neste campo, é possível.

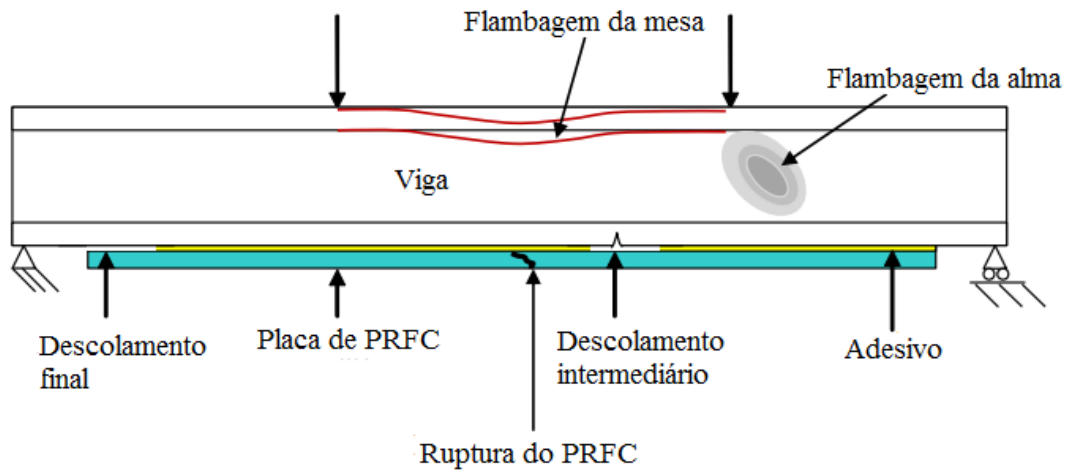
### **3.10 Reforço à flexão de vigas de aço com PRFC**

Estudos vem sendo realizados com foco nos comportamentos das vigas de aço reforçadas com laminados de PRFC, que são colados com a ajuda de adesivos na mesa que será tracionada. Este tipo de reforço eleva a resistência a tração da viga em valores consideráveis.

Segundo Canales (2018), não apenas melhora a capacidade de flexão máxima, como também retarda o escoamento da viga, melhorando a rigidez à flexão e reduzindo a deformação produzida no aço quando submetido ao mesmo carregamento. Sendo possível também verificar o aumento da carga última ou da resistência, fato que ocorre devido ao aço constituinte da viga necessitar de um maior carregamento para escoar.

Vigas submetidas a flexão apresentam sua capacidade de resistência relacionada diretamente ao seu modo de ruína. Os principais modos de ruína das vigas de aço reforçadas com PRFC são: falha de flexão no plano (ruptura à tração do PRFC), descolamento final ou descolamento intermediário do reforço de PRFC, flambagem lateral e flambagem local (compressão da mesa ou da alma). Esses modos de ruína estão ilustrados na figura 6.

**Figura 6 - Modos de falha da viga de aço reforçada com PRFC**



**Fonte:** CANALES (2018)

Para uma descrição detalhada de cada um dos modos de falha mencionados, o leitor deve consultar Canales (2018).

### 3.11 Definição dos elementos

Dentro do Método dos Elementos Finitos, você divide seu modelo em pequenas partes. Esses são chamados de Elementos Finitos (FE). Esses elementos conectam todos os pontos característicos (chamados de nós) que estão em sua circunferência. Essa “conexão” é um conjunto de equações chamadas funções de forma.

Cada Elemento tem seu próprio conjunto de funções de forma, que conectam todos os nós desse elemento). Elementos adjacentes compartilham nós comuns (aqueles na borda compartilhada). Isso significa que as funções de forma de todos os elementos no modelo são “amarradas” graças a esses nós comuns.

Esses elementos podem ter uma, duas ou três dimensões (1D, 2D e 3D), onde elementos 1D são de viga, 2D de casca e 3D são sólidos.

Os elementos de interesse para compreender as análises do presente trabalho são o elemento de casca SHELL181, o elemento sólido tipo casca SOLSH190 (comportamento misto de casca e sólido), que são elementos presentes no software Ansys.



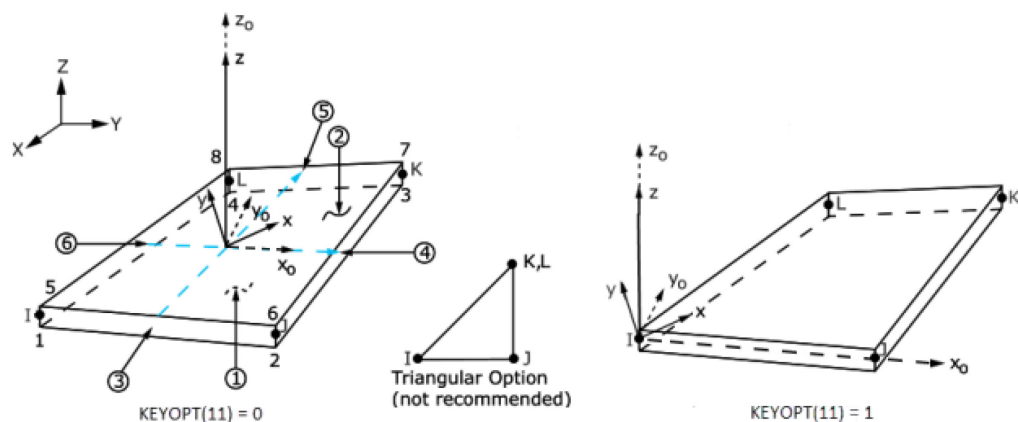
### 3.12 SHELL181

O SHELL181 é um elemento do software Ansys, de uso recorrente em estruturas de finas de moderadamente finas, uma estrutura de parede uma é assim chamada quando em uma de suas dimensões é muito menor que as outras duas.

Este elemento apresenta quatro nós e seis graus de liberdade em cada nó, sendo a translação nos eixos x,y e z e rotação nos eixos x, y e z. Existe ainda a possibilidade de se utilizar apenas 3 nós, em casos de específicos, mas não é recomendado seu uso.

O uso deste elemento é amplamente utilizado quando se existe a necessidade de aplicação em camadas.

Figura 7 Geometria do elemento SHELL181



$x_0$  = Element x axis if element orientation ([ESYS](#)) is not specified.

$x$  = Element x axis if element orientation is specified.

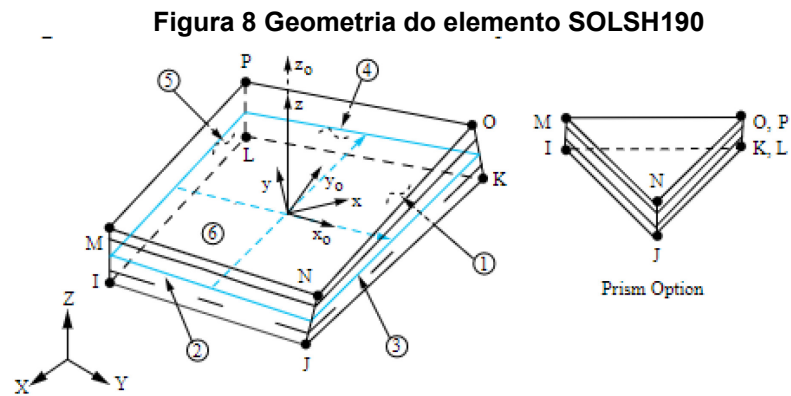
Fonte: BME, Department of Applied Mechanics

### 3.13 SOLSH190

O elemento SOLSH190 é um elemento para paredes espessas e moderadamente espessas. É um elemento de topologia sólida contínua, que

apresenta oito nós para conexão, onde cada nó apresenta três graus de liberdade, translação nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

Sua topologia contínua permite a conexão com outros elementos contínuos sem requerer esforços extras. Podendo ser aplicado na modelagem de aplicações com camadas.



$x_0$  = Element x-axis if ESYS is not supplied.

$x$  = Element x-axis if ESYS is supplied.

**Fonte:** BME, Department of Applied Mechanics

## **4 METODOLOGIA DE PESQUISA**

Segundo Namarshiri e Jummat (2009), um dos métodos mais apropriados para estudar os efeitos do reforço em estruturas é a utilização de um software computacional de simulação. Na maioria das simulações de estruturas o Método dos Elementos Finitos é utilizado, sendo que a simulação pode ser realizada em ambiente 2D ou 3D.

### **4.1 Simulação numérica**

A simulação numérica busca validar estudos, onde todo o modelo é simulado dentro de um software de simulação, no caso será utilizado o software ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 18.1 (ANSYS Inc., 2017), que será descrito no trabalho apenas como ANSYS.

As seções I de aço, os reforços, e os laminados de PRFC serão simuladas usando os elementos SOLSH190. O estudo de Narmashiri, Sulong E Jumaat (2012) e o trabalho de canales (2018) serão usados de referência para os resultados.

O comportamento da viga será analisado através do método estático não linear, baseado em um método de tentativa e erro, nesse caso, o carregamento é aplicado passo a passo. Quando o elemento atinge um comportamento plástico, o aumento de carregamento é interrompido.

### **4.2 Estudo de Canales (2018)**

O estudo de Canales (2018) apresenta resultados de modelos de vigas ensaiadas experimentalmente por Lenwari, Thepchatrri e Albrecht (2005) e simuladas numericamente por Seleem, Sharaky e Sallam (2010), que serão utilizados como referência no presente trabalho.

O primeiro modelo foi elaborado como a viga transversal de aço sem aplicação do reforço de PRFC. O Elemento SHELL181 foi utilizado para o desenvolvimento do modelo. As propriedades do aço são demonstradas na tabela 3 e a geometria na tabela 6.

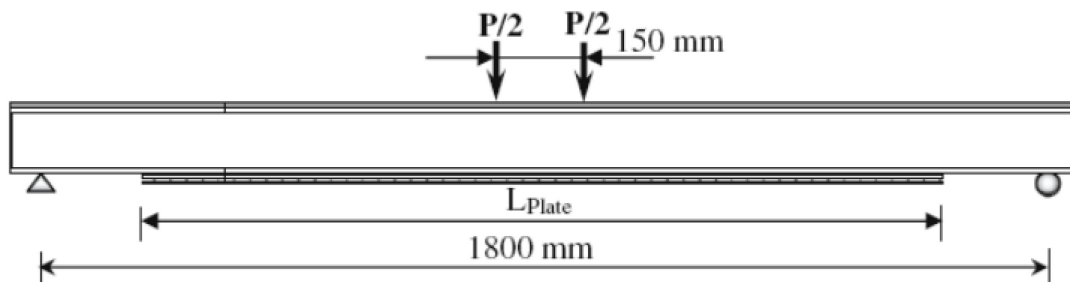
**Tabela 3 - Propriedades materiais do aço**

Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão de Escoamento (Mpa)	Coefficiente de Poisson	Peso Específico (kN/cm <sup>3</sup> )
200	300	0,3	$7,7 \times 10^{-5}$

Fonte: Canales (2018)

O segundo modelo inseriu os reforços com o uso ainda do elemento SHELL181, se utilizando da possibilidade de várias camadas com propriedades diferentes ainda no mesmo elemento.

O terceiro modelo também parte do modelo 1, mas agora os reforços são aplicados com o uso do elemento SOLSH190, e o adesivo se utiliza do elemento de ligação de superfícies o INTER205.

**Figura 9 - Esquema da viga de aço ensaiada**

Fonte: Adaptado de Lenwari, Thepchatri e Albrecht (2005)

**Tabela 4 - Propriedades geométricas da viga de aço**

Dimensões (mm)				E (MPa)	Tensão (MPa)
Largura	Altura	Espessura		Valor Médio	Escoamento $f_y$
		Mesa	Alma		
100	100	8	6	200000	300

Fonte: Canales (2018)

**Tabela 5 - Propriedades geométricas e materiais do laminado de PRFC**

Amostra	Largura x Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Resistência à Tração (MPa)
B65	50x1,4	650	300	1400	1800
B120	50x1,4	1200	300	1400	1800

Fonte: Canales (2018)

**Tabela 6 - Propriedades mecânicas do PRFC**

Tipos de PRFC	Módulo de Elasticidade(GPa)	Tensão de Ruptura(MPa)	Deformação Última(%)
Alto Módulo	160	2800	1,7

**Fonte:** Canales (2018)

Os resultados obtidos por CANALES (2018) foram comparados ao presente trabalho.

## 5 MODELAGEM NUMÉRICA

Foram desenvolvidas as simulações numéricas no presente trabalho de três vigas de seção I, a primeira, uma Viga de Controle (Control Beam), chamada apenas de CB, sem aplicação de PRFC e a segunda e terceira sendo vigas com aplicação do reforço, que chamamos de B65 e B120 respectivamente. Os modelos foram validados com base nos dados do trabalho de Canales (2018).

### 5.1. Considerações importantes

Devido a simetria das vigas desenvolvidas em relação as cargas aplicadas e aos pontos de apoio, é possível realizar a simulação em apenas metade da viga, poupando assim processamento da máquina e diminuição no tempo de cálculo, para isso será necessário fazer uso da restrição dos graus de liberdade para a simulação da continuidade.

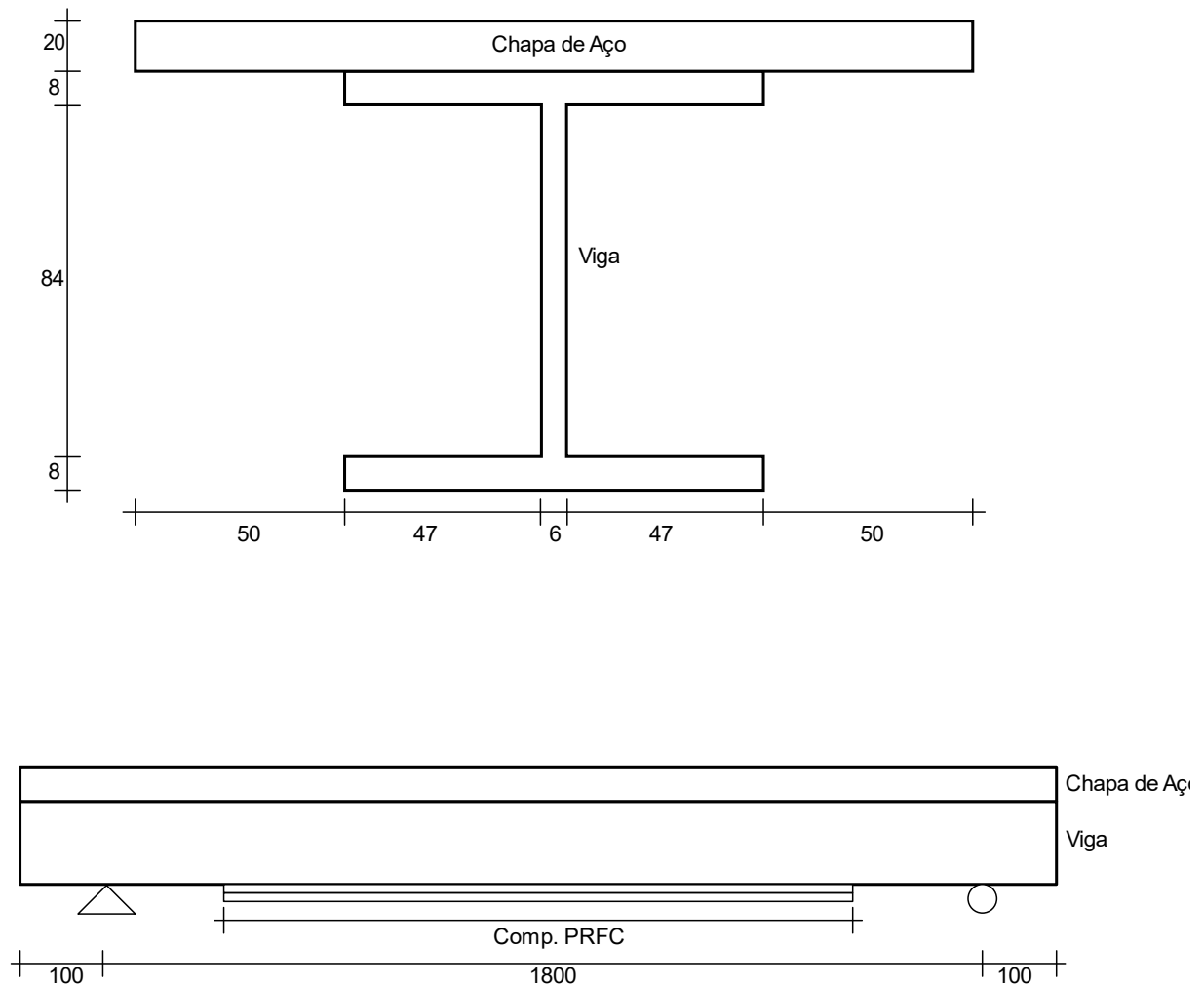
Para o presente trabalho foi realizada uma análise estática não linear, com a carga total sendo aplicada por pequenos incrementos de carga, com o auxílio do método de Newton-Raphson, um dos mecanismos utilizados pelo software ANSYS.

### 5.2. Viga de controle (CB)

A viga de controle diz respeito ao modelo que não recebe o reforço em PRFC e servirá de guia para o estudo. A viga apresenta um perfil de seção I reforçado com

uma placa de aço em sua face superior. Suas dimensões estão dadas nas Tabelas 4 e 5 e na Figura 10 com a visão frontal e lateral.

**Figura 10 - Esquema da viga de aço ensaiada, valores em mm**



**Fonte:** Do próprio autor

Será utilizado o elemento SOLSH190 para a modelagem da geometria da viga, onde primeiro foi inserido os parâmetros de entrada, sendo eles, as propriedades do material aço da tabela 5 e as propriedades geométricas baseados na Tabela 6.

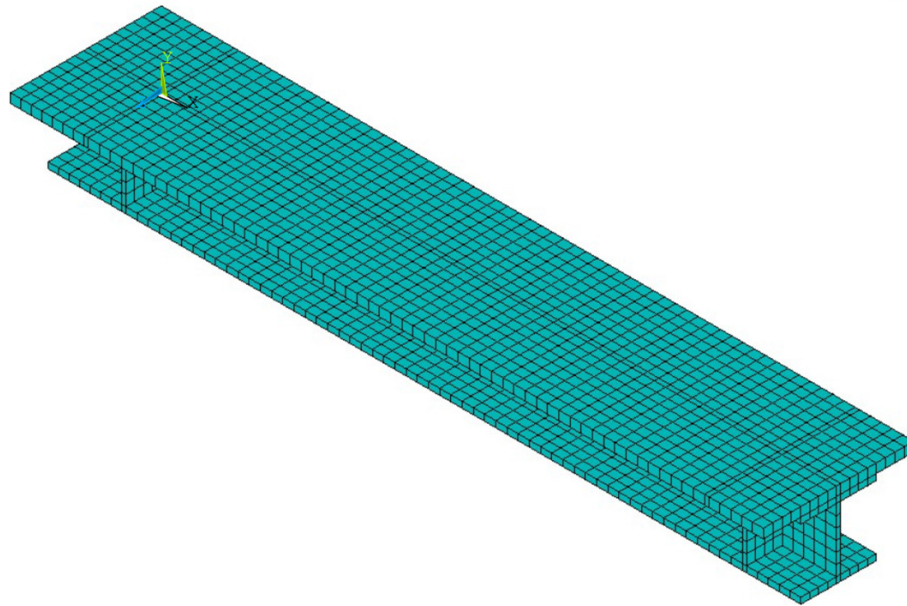
Para o carregamento a carga total aplicada foi de 200 kN.

Para a geração da malha, cada volume deve ser dividido em relação ao tamanho longitudinal do elemento finito. O trabalho de Canales (2018) realizou testes se utilizando de três tamanhos, sendo eles, 2,5 cm 5 cm e 10 cm. O tamanho de elemento

finito de que apresentou os melhores resultados foi o de 2,5cm, logo, foi o utilizado nesta viga.

A Figura 11 demonstra a viga CB dentro do software Ansys.

**Figura 11 - Viga sem reforço - Visão superior**



**Fonte:** Do próprio autor

### **5.3 Modelos reforçado com PRFC**

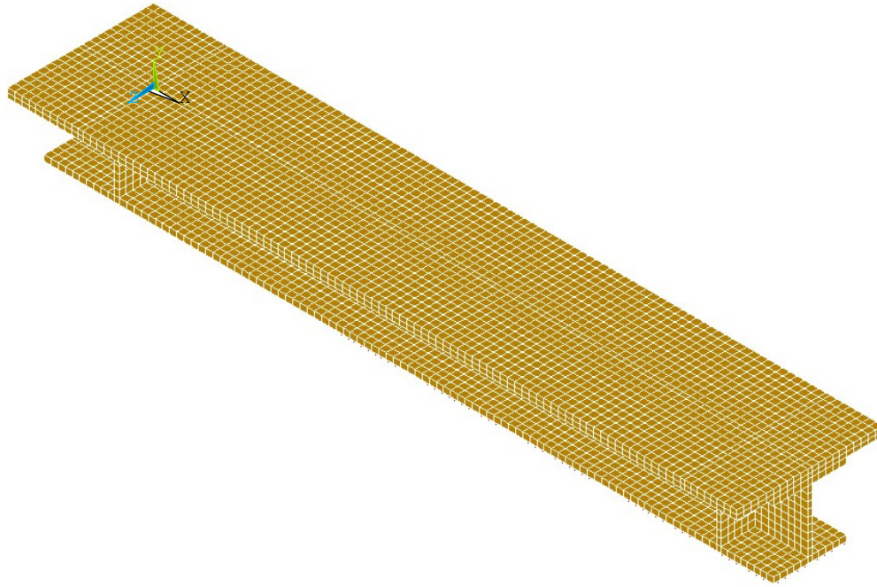
O modelo reforçado com PRFC parte com os mesmos parâmetros de entrada do modelo anterior com algumas adições e alterações em sua geometria, no entanto o procedimento se mantém o mesmo.

As propriedades do material aço são as mesmas da Tabela 5, e as propriedades geométricas do aço são as mesmas da Tabela 6. As propriedades do material PRFC estão na Tabela 7 e as propriedades geométricas do reforço de PRFC se encontram na Tabela 8.

Para a geração da malha o bloco deve ser dividido em relação ao tamanho do elemento finito. No presente trabalho foi realizada a simulação com elementos finitos de comprimento igual a 1 cm.

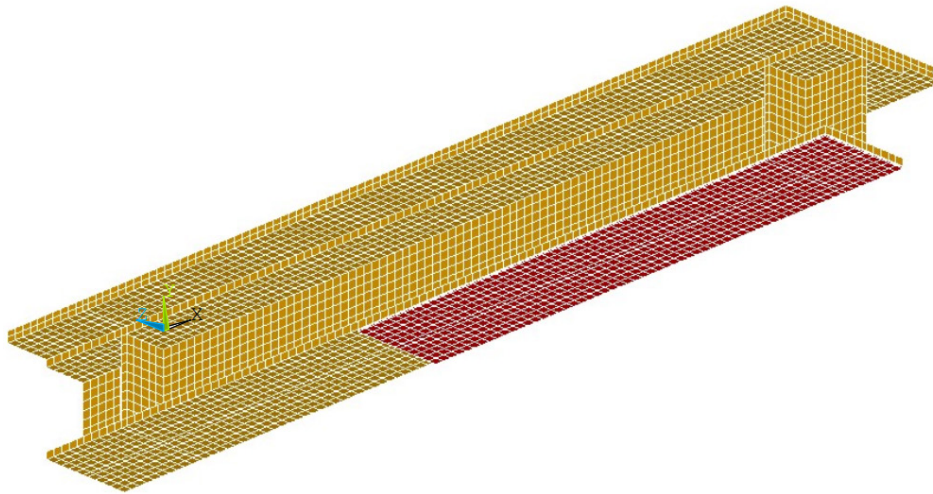
As Figuras 12 e 13 demonstram a viga B120 dentro do software Ansys.

**Figura 12 - Viga com reforço B120 - Visão superior**



**Fonte:** Do próprio autor

**Figura 13 - Viga com reforço B120 - Visão inferior**



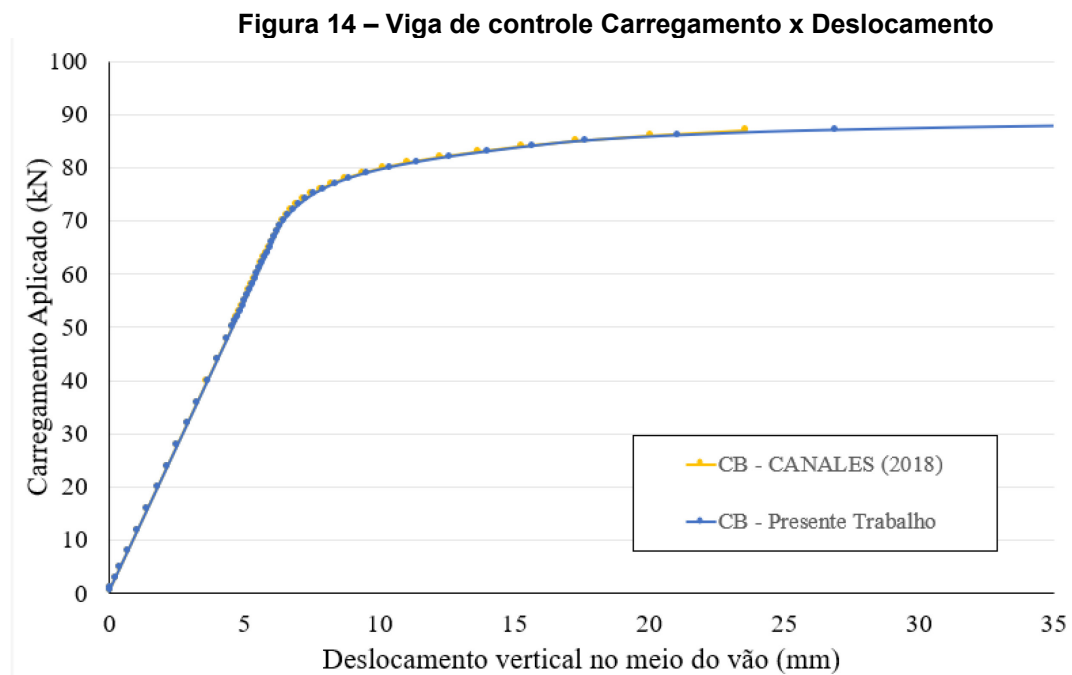
**Fonte:** Do próprio autor



## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1. Viga de controle (CB)

Os resultados obtidos para os deslocamentos da viga no ponto central do vão em função do carregamento aplicado podem ser vistos na Figura 18, onde também são apresentados os resultados da referência utilizada.



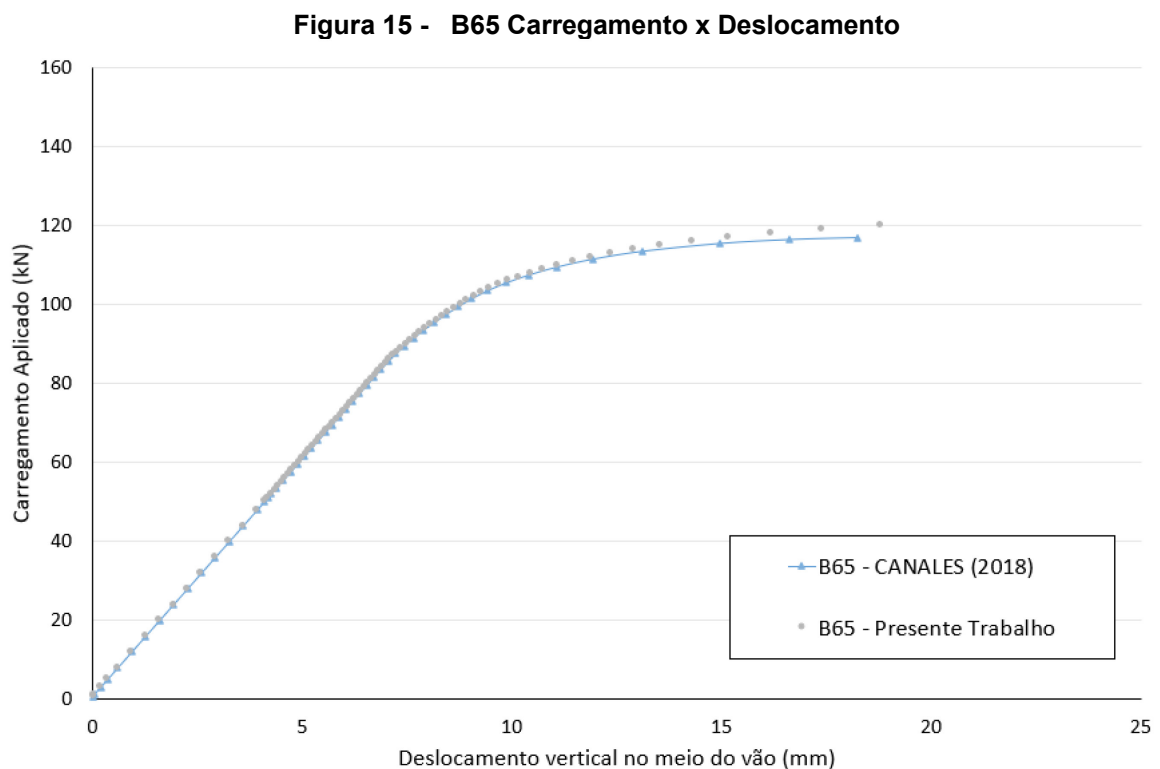
Fonte: Do próprio autor

Na análise qualitativa dos gráficos sobrepostos, foi averiguada uma concordância bastante elevada em relação aos modelos, os resultados foram similares aos solucionados com o elemento SHELL181.

## 6.2 Modelos reforçado com PRFC

### 6.2.1 Modelo reforçado B65

Os resultados obtidos para o modelo reforçado B65 deslocamentos da viga no ponto central do vão em função do carregamento aplicado podem ser vistos na Figura 19, onde também são apresentados os resultados da referência utilizada.

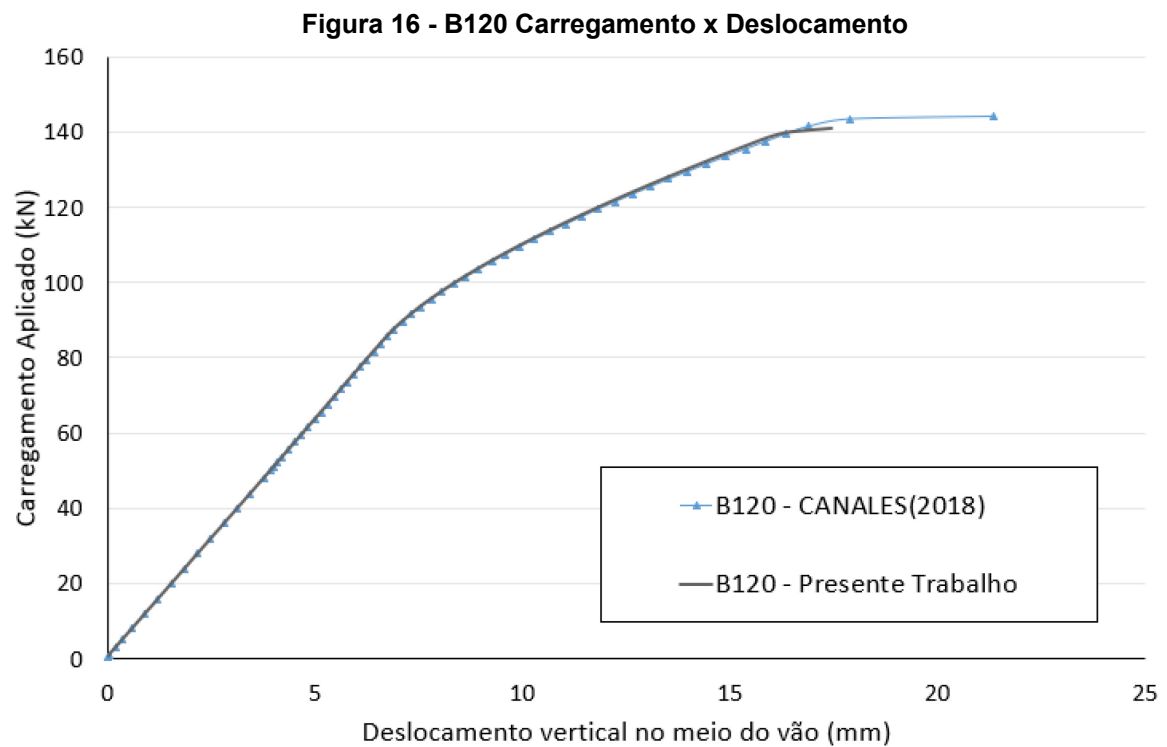


**Fonte:** Do próprio autor

Os resultados obtidos com a viga B65 no presente trabalho apresentaram um nível elevado de concordância em relação ao trabalho de CANALES (2018). Sendo averiguado através da visualização do gráfico que as duas curvas se apresentam de maneira muito similar.

### 6.2.2 Modelo reforçado B120

Os resultados obtidos para o modelo reforçado B120, referente aos deslocamentos da viga no ponto central do vão em função do carregamento aplicado podem ser vistos na Figura 20, onde também são apresentados os resultados da referência utilizada.



**Fonte:** Do próprio autor

## 7 CONCLUSÃO

Os resultados apresentados permitem concluir que o emprego do elemento SOLSH190 se mostrou eficiente ao simular o comportamento das vigas de aço sem e com o reforço de PRFC. O comportamento das curvas força x deslocamento foi bastante próximo daquele obtido empregando elemento finito SHELL181 para o perfil de aço em Canales (2018). Da mesma forma, o valor do carregamento de colapso para os casos analisados também foi bastante similar.

Portanto, tendo em vista situações em que envolvam o reforço de vigas de aço, a utilização do elemento sólido tipo casca nos modelos, além de fornecer resultados similares quando se usa de elementos tipo casca no perfil de aço, apresenta como vantagem o fato de a modelagem da geometria ser bem mais simples. Em contrapartida, o tempo de processamento tende a ser maior. Assim, se o tempo de processamento não for fator limitante, principalmente no caso de modelagem de elementos isolados de estruturas, sugere-se a utilização do elemento de sólido tipo casca.

Em relação aos efeitos do reforço de PRFC, vale mencionar que os resultados permitem verificar que com o comprimento de reforço utilizada nos modelos em questão, a viga com reforço de 65cm apresentou um acréscimo de aproximadamente 36% na sua capacidade carga quando comparada a viga de controle, e a viga com reforço de 120cm de comprimento apresentou um acréscimo de 59% em sua capacidade de carga.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – **State-of-The Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures**, (ACI 440R), 2002.

ANSYS, Inc. ANSYS® **Academic Research Mechanical, Release 18.1**. Help System, Mechanical APDL Documentation, 2017.

BME, **Department of Applied Mechanics**, 2021. Disponível em: [https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans\\_help\\_v182/ans\\_cmd/](https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_cmd/). Acesso em: 10 abr. 2021

DEMIR H. **Strengthening and repair of steel bridges**. Techniques and managemet. Master of Science. Göteborg, Suécia, 2011.

FAWZIA, S., ZHAO, X.L., AI-MAHAIDI, R., e RIZKALLA, S. **Bond characteristics between CFRP and steel plates in double strap joints**. Advances in Steel Construction—An International Journal, Brisbane, Australia , 2005.

FERNANDO, D., YU, T., TENG, J.G., e ZHAO, X.L. **CFRP strengthening of rectangular steel tubes subjected to end bearing loads: Effect of adhesive properties and finite element modelling**. Thin-Walled Structures, Hong Kong, China, 2009

HAEDIR, J., BAMBACH, M.R., ZHAO, X.L., e GRZEBIETA, R.H, **Strength of circular hollow sections (CHS) tubular beams externally reinforced by carbon FRP sheets in pure bending**. Thin-Walled Structures, Melbourne, Australia, 2009.

HOLLAWAY, L.C., e CADEI, J. **Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites**. Progress in Structural Engineering and Materials, Surrey, UK, 2002

HOLLAWAY, L.C., e SPENCER, H. **Modern developments. In Manual of bridge engineering**, ed. Ryall, M.J., Parks, G.A.R., and Harding, J.E. London: Thomas Telford, 2000.

HULL, D. **An introduction to composite materials**. Cambridge University Press, Great Britain. 1987.

MACHADO, A. P. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibra de carbono**. 2011.

MENON, N.V. **Estudo experimental de sistemas de reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado utilizando-se Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (PRFC)**, Florianópolis, 2008.

MILLER, T.C., CHAJES, M.J., MERTZ, D.R., e HASTINGS, J.N **Strengthening of a steelbridge girder using CFRP plates**, Journal of Bridge Engineering, 2001.

NARMASHIRI, K. e JUMAAT, M. Z. **Reinforced steel I-beams: A comparison between 2D and 3D simulation**, Elsevier, Kuala Lumpur, Malasya, 2010.

PHOTIOU, N.K., HOLLAWAY, L.C., and CHRYSSANTHOPOULOS, M.C. **Selection of CFRP systems for structural upgrading**. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006.

SCHNERCH, D., DAWOOD, M., RIZKALLA, S., e SUMNER, E.. **Proposed design guidelines for strengthening steel bridges with FRP materials**. Construction and Building Materials, 2007.

SCHOLARPEDIA, **Finite element method**, 2021. Disponível em: [http://www.scholarpedia.org/article/Finite\\_element\\_method](http://www.scholarpedia.org/article/Finite_element_method). Acesso em: 10 abr. 2021

SHAAT, A., e FAM, A.. **Axial loading tests on CFRP-retrofitted short and long HSS steel columns**. Canadian Journal of Civil Engineering, 2006.

TEOBALDO, I. **Estudo do Aço como Objeto de Reforço Estrutural em Edificações Antigas**. Belo Horizonte, 2004.

ZHAO, X. **FRP-Strengthened Metallic Structures**. CRC Press, Monash University, Australia, 2013.

ZHAO, X.L., e HANCOCK, G.J. **Square and rectangular hollow sections under transverse end bearing force**. Journal of Structural Engineering, 1995.

ZHAO, X.L., FERNANDO, D., e AL-MAHAIDI, R. **CFRP strengthened RHS subjected to transverse end bearing force**. Engineering Structures, Clayton, Australia, 2006.

ZHAO, X.L.. **Tests on CFRP strengthened open sections subjected to end bearing forces**. Second Asia-Pacific Conference on FRP in Structures, Clayton, Australia, 2009