

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANA FLÁVIA CANALES

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE AÇO COM SEÇÃO I  
REFORÇADAS À FLEXÃO COM LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO  
(PRFC)**

MARINGÁ

2018

ANA FLÁVIA CANALES

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE AÇO COM SEÇÃO I  
REFORÇADAS À FLEXÃO COM LAMINADOS DE FIBRAS DE CARBONO  
(PRFC)**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Rigobello

MARINGÁ

2018

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)**

C212e Canales, Ana Flávia  
Estudo do comportamento de vigas de aço com seção I reforçadas à flexão com laminados de fibra de carbono (PRFC) / Ana Flávia Canales. -- Maringá, 2018.  
100 f. : il. (algumas color.)

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Rigobello.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.

1. Vigas de aço. 2. Flexão (Engenharia civil).  
3. Polímeros reforçados com fibras de carbono.  
4. Método dos elementos finitos. I. Rigobello, Ronaldo, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

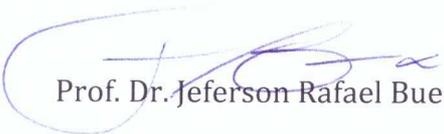
CDD 23.ed. 624.1821

# ANA FLÁVIA CANALES

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE AÇO COM SEÇÃO I REFORÇADAS À FLEXÃO COM LAMINADOS COM FIBRAS DE CARBONO (PRFC)

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de concentração Estruturas para obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 27 agosto de 2018.



Prof. Dr. Jeferson Rafael Bueno

**Membro UTFPR/CM-PR.**



Prof. Dr. Luiz Antonio Farani de Souza

**Membro PCV/UEM.**



Prof. Dr. Ronaldo Rigobello

**Orientador - PCV/UEM**

*À Deus.*

*Porque dEle, por meio dEle e para Ele  
são todas as coisas. A Ele a glória  
por toda eternidade. Amém. – Rm 11:36*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, com tudo o que tenho e sou.

À Nossa Senhora, pelo amor e cuidado de mãe.

À minha família, em especial aos meus pais, Cácia e Mauricio, pelo apoio e incentivo em todos os momentos.

Ao professor Ronaldo Rigobello, agradeço por toda paciência, atenção e orientação no desenvolvimento deste trabalho. Sua ajuda foi de extrema importância, sou grata.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, pela oportunidade e aprendizado.

À todos os professores e funcionários da Universidade Estadual de Maringá que contribuíram direta ou indiretamente na realização do curso.

Aos meus amigos de Campo Mourão que, em grande parte desta caminhada, me acolheram como família. Em especial a Marci e Carol, sou grata por tudo e, principalmente, por tanto em todos os momentos.

Aos meus companheiros de mestrado, pelos momentos compartilhados, sejam eles de estudos ou de descontração.

De todo coração, a todo amigo ou familiar que em algum momento me incluiu em suas orações, me ofereceu um abraço amigo ou uma palavra de incentivo, sou muito grata!

“Eu guardei muitas coisas em minhas mãos,  
e perdi todas. Mas todas que coloquei nas  
mãos de Deus, essas eu ainda possuo.”

Martin Luther King

## RESUMO

CANALES, A. F. **Estudo do comportamento de vigas de aço com seção I reforçadas à flexão com laminados de fibra de carbono (PRFC)**. 100 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018.

O uso de materiais compósitos de Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC) em estruturas de aço têm sido tema de diversas pesquisas, visando mostrar a potencialidade da utilização desse material no reforço desses elementos, levando a evolução da técnica e conseqüentemente ao crescimento da sua utilização na construção civil. Métodos analíticos para o cálculo da resistência de vigas de aço reforçadas com PRFC quanto à flexão podem ser encontrados em literatura estrangeira. Porém, a aplicação de tais métodos apresentam limitações, que podem vir a ser contornadas por meio de estudos numéricos. O presente trabalho teve como objetivo principal contribuir com o estudo do comportamento à flexão de vigas de aço com seção I reforçadas com laminados de PRFC, utilizando o Método dos Elementos Finitos para o desenvolvimento de estratégias numéricas, capazes de simular de forma eficaz o comportamento destas quanto a sua capacidade de carga. A estratégia de modelagem desenvolvida teve seus resultados validados junto aos resultados numéricos e experimentais presentes na literatura. As simulações realizadas permitiram avaliar a variação de comprimentos e espessuras dos laminados de PRFC e mostraram a influência desses parâmetros no modo de falha e capacidade de carga das vigas reforçadas. A estratégia utilizada se mostrou adequada e eficaz para simular o comportamento das vigas, apresentando resultados coerentes de rigidez, capacidade de carga e de deslocamentos.

**Palavras-chave:** Vigas de aço. Reforço estrutural. PRFC. Análise numérica.

## ABSTRACT

CANALES, A. F. **Flexural behavior analysis of steel beams strengthened with CFRP**. 100 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018.

The use of carbon fibre reinforced polymers (CFRP) in steel structures has been the subject of several researches, aiming to show the potential of this material in the strengthening these structural elements, providing technical developments and consequently the increase of its use in steel constructions. Analytical methods for strengthening design of steel beams with CFRP for flexure can be found in the literature. However, the application of such methods present limitations, which can be overcome by numerical studies. This research had the objective to contribute to the study of the flexural behavior of steel I-beams strengthened with CFRP laminates, with the development of numerical strategies using the Finite Element Method, for accurately simulating and predicting the flexural strength capacity. The modeling strategy had its results validated with numerical and experimental results from literature. The numerical simulations considered length and thickness variation of CFRP laminates and showed the influence of these variables in the failure mode and strength of the beams. The used strategy was adequate to simulate the behavior of the beams, presenting coherent results when predicting rigidity, load capacity and structural element displacements.

**Keywords:** Steel beams. Structural strengthening. CFRP. Numerical analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Reforço da mesa inferior.....	17
Figura 2.2 - Reforço da mesa superior .....	17
Figura 2.3 - Exemplos de seções transversais aumentadas de treliças metálicas .....	18
Figura 2.4 - Compósitos reforçados com a) partículas e com b) fibras.....	20
Figura 2.5 – Típica curva tensão-deformação para PRFC .....	22
Figura 2.6 - Possíveis falhas que levam a descolamento do PRF.....	29
Figura 2.7 – Descolamento da extremidade do laminado de PRFC.....	30
Figura 2.8 – Descolamento intermediário do laminado de PRFC.....	31
Figura 2.9 – Curvas tensão de aderência-deslizamento.....	33
Figura 2.10 - Alguns dos modos de falha da viga de aço reforçada com PRFC.....	35
Figura 2.11– Flambagem Lateral com Torção (FLT).....	36
Figura 2.12 – Momento resistente em função da esbeltez.....	37
Figura 2.13 – Flambagem lateral de viga de aço com seção I.....	38
Figura 2.14 – Flambagem local de mesa viga de aço com seção I.....	39
Figura 2.15 – Curva de resistência para FLM e FLA .....	40
Figura 2.16 – Viga modelo de análise .....	42
Figura 2.17 – Viga modelada com o software ABAQUS .....	43
Figura 2.18 – Posição do reforço.....	44
Figura 2.19 – Localização do trajeto utilizado .....	45
Figura 2.20 - Esquema da amostra da viga reforçada típica: (a) seção transversal, e (b) elevação frontal. ....	47
Figura 2.21 – Esquema do modelo 3D da amostra.....	49
Figura 3.1 - Esquema da viga de aço ensaiada.....	51
Figura 3.2 – Modelo de elementos finitos da viga com o software ABAQUS .....	52
Figura 3.3 – Disposição do ensaio e dimensões dos elementos .....	53
Figura 3.4 – Dimensões das vigas de aço e posicionamento dos strain gauges e LVDT. ....	54
Figura 4.1 – Exemplo de discretização em elementos finitos da viga de aço considerando a simetria do modelo e as restrições empregadas .....	56
Figura 4.2 - Elemento SHELL181.....	57
Figura 4.3 - Elemento SOLSH190 .....	58

Figura 4.4 - Elemento INTER205 .....	59
Figura 4.5 - Comportamento material da seção de aço .....	61
Figura 4.6 – Posição dos nós dos elementos finitos no plano médio da espessura .....	62
Figura 4.7 - Resultados Modelo 1 .....	63
Figura 4.8 – Posição dos planos dos nós dos elementos de casca e aplicação do elemento MPC 184 para conexão entre mesas e alma .....	64
Figura 4.9 - Resultados Modelo 1 com MPC184 .....	65
Figura 4.10 - Perfil de aço com malhas de (a) 25 mm (b) 50 mm.....	66
Figura 4.11 - Resultados Modelo 1 para o teste de malha.....	67
Figura 4.12 - Perfil da viga de aço com o reforço de PRFC.....	68
Figura 4.13 - Resultados Modelo 2 com PRFC de 65 cm .....	69
Figura 4.14 - Perfil viga de aço com o reforço de PRFC e refinamento da malha.....	70
Figura 4.15 - Resultados Modelo 2 com PRFC de 65 cm e refinamento da malha .....	71
Figura 4.16 - Resultados Modelo 2 com PRFC de 120 cm .....	72
Figura 4.17 - Resultados Modelo 3 com PRFC de 65 cm .....	74
Figura 4.18 - Resultados Modelo 3 com PRFC de 120 cm .....	75
Figura 4.19 - Resultados viga controle F1 .....	78
Figura 4.20 - Resultados da viga F4 .....	79
Figura 4.21 - Resultados da viga F5 .....	79
Figura 4.22 - Resultados da viga F6 .....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades do PRFC segundo o fabricante (Sika <sup>®</sup> ) .....	22
Tabela 2.2 – Propriedades típicas de adesivos solicitados à tração.....	26
Tabela 3.1 - Propriedades geométricas e materiais do perfil de aço .....	51
Tabela 3.2 – Propriedades geométricas e materiais do laminado de PRFC .....	51
Tabela 4.1 – Propriedades geométricas da viga de aço .....	60
Tabela 4.2 - Propriedades materiais do aço .....	61
Tabela 4.3 - Dados de entrada para o modelo de coesão.....	74
Tabela 4.4 - Propriedades geométricas do PRFC .....	77
Tabela 4.5 - Propriedades materiais do PRFC.....	77
Tabela 4.6 - Especificações e capacidade de resistência das vigas analisadas.....	81
Tabela 4.7 - Especificações e aumento na capacidade de resistência das vigas reforçadas com PRFC .....	82

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
1.1	OBJETIVOS .....	14
1.1.1	Objetivo Geral .....	14
1.1.2	Objetivos Específicos .....	14
1.2	JUSTIFICATIVA.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
2.1	MÉTODO CONVENCIONAL DE REFORÇO DE ESTRUTURAS DE AÇO .....	16
2.2	COMPÓSITO DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO .....	19
2.2.1	Fibras de Carbono .....	20
2.2.2	Matriz polimérica .....	23
2.3	FORMAS DE UTILIZAÇÃO DO PRFC .....	23
2.3.1	Sistemas pré-fabricados .....	24
2.3.2	Sistema curado <i>in situ</i> .....	24
2.4	ADESIVOS PARA REFORÇO DE ESTRUTURAS DE AÇO COM PRFC .....	25
2.5	COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO ENTRE O PRFC E O AÇO .....	27
2.5.1	Falha por descolamento da extremidade .....	29
2.5.2	Falha por descolamento intermediário .....	31
2.5.3	Modelos para a ligação dos compósitos ao aço .....	32
2.6	REFORÇO DE ESTRUTURAS DE AÇO COM PRFC .....	33
2.6.1	Reforço à flexão de vigas de aço com PRFC .....	34
2.6.1.1	Falha por flexão no plano – Ruptura do PRFC .....	35
2.6.1.2	Flambagem lateral com torção .....	35
2.6.1.3	Flambagem local .....	39
2.7	PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS PARA DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE AÇO REFORÇADAS COM PRFC.....	41
2.8	UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF) NA MODELAGEM DE VIGAS DE AÇO REFORÇADAS COM PRFC .....	41
2.8.1	Modelagem de Seleem, Sharaky e Sallam (2010) .....	42
2.8.2	Modelagem de Linghoff e Al-Emrani (2010) .....	43
2.8.3	Modelagem de Yu, Chiew e Lee – Parte 2 (2011).....	46

2.8.4	Modelagem de Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012).....	48
3	METODOLOGIAS NUMÉRICAS DE ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE AÇO REFORÇADAS COM LAMINADO DE PRFC .....	50
3.1	ESTUDO EXPERIMENTAL DE LENWARI, THEPCHATRI E ALBRECHT (2005) .....	50
3.2	ESTUDO NUMÉRICO DE SELEEM, SHARAKY E SALLAM (2010).....	52
3.3	ESTUDO DE NARMASHIRI, SULONG E JUMAAT (2012).....	53
4	MODELOS DESENVOLVIDOS E RESULTADOS OBTIDOS .....	55
4.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	55
4.2	Definição dos elementos finitos utilizados .....	56
4.2.1	Elemento SHELL181 .....	57
4.2.2	Elemento SOLSH190.....	58
4.2.3	Elemento INTER205.....	59
4.3	VIGAS DE LENWARI, THEPCHATRI E ALBRECHT (2005) E SELEEM, SHARAKY E SALLAM (2010).....	60
4.3.1	Modelo 1 – Viga de Referência .....	60
4.3.2	Modelo 2 – Viga de aço com reforço de PRFC – modelo com interação total entre a viga de aço e o reforço .....	67
4.3.3	Modelo 3 - Viga de aço com reforço de PRFC – modelo com elementos de interface.....	73
4.4	VIGAS DE NARMASHIRI, SULONG E JUMAAT (2012) .....	76
5	CONCLUSÕES .....	83
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS E CONCLUSÕES .....	83
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	84
	REFERÊNCIAS .....	85
	ANEXO A .....	88

## 1 INTRODUÇÃO

O aço é utilizado na construção civil como elemento estrutural desde o século XVII, sendo amplamente empregado em estruturas de pontes ferroviárias e rodoviárias, galpões, coberturas de grandes vãos, edifícios industriais e comerciais, plataformas, entre outras.

O sistema construtivo em aço apresenta como fatores chaves para o sucesso do empreendimento a redução do tempo de construção, racionalização no uso de materiais e mão de obra e aumento da produtividade.

Diferentes são os fatores que podem influenciar no bom desempenho do sistema construtivo em aço, como ações climáticas, mudança na utilização final, degradação dos elementos destinados à resistência dos esforços, ou até mesmo devido a erros de execução ou de concepção de projeto. Levando assim, à necessidade de reforço, com a finalidade de reestabelecer as condições de uso e prolongar a vida útil dessas construções.

Segundo Zhao (2014), convencionalmente o reforço ou reparo de uma estrutura metálica é realizado com o corte e substituição ou fixação de placas ou chapas de aço externas aos elementos, por meio de solda ou parafusos. Afirma ainda que, estas placas e chapas, além de serem pesadas e volumosas, levando à adição de novas cargas ao elemento, estão propensas à corrosão e fadiga.

O mercado da construção civil é um consumidor de aço em potencial, tornando importante o desenvolvimento de novas técnicas, com o intuito de melhorar o seu aproveitamento. Dentre elas, encontra-se a aplicação de polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) para melhorias de capacidade estrutural dos elementos.

O uso do PRFC como material de reforço de estruturas metálicas vem sendo estudado ao longo das últimas duas décadas, por meio de projetos de pesquisa quanto à melhoria no desempenho das estruturas submetidas às solicitações de compressão, flexão, em elementos de ligações sob carga estática, fadiga e elementos compostos.

Com relação as vigas de aço com seção I submetidas à flexão, é conhecido que a sua capacidade de resistência está ligada ao seu modo de ruína, e podem apresentar falhas como a plastificação total da seção, a flambagem lateral com torção e a flambagem local dos elementos (mesa e alma). Quando relacionado com o reforço à flexão com o PRFC, novas possibilidades de falhas são adicionadas ao elemento, direcionando os estudos a essa questão.

Dentre os estudos já realizados sobre o exposto acima, encontram-se publicações como as de Hollaway e Cadei (2002), Zhao e Zhang (2007) e Teng, Yu e Fernando (2012).

Em Hollaway e Cadei (2002), foram estudadas questões bases para o uso do PRFC, como a preparação da superfície de aço e durabilidade do reforço no ambiente civil, a transferência de tensões entre os diferentes materiais, as limitações relacionadas ao aderente de ligação dos mesmos, e ainda aplicações de campo, como por exemplo, a ponte Tickford localizada no Reino Unido.

Zhao e Zang (2007) desenvolveram seus estudos com foco na ligação entre o aço e o reforço de PRFC, o comportamento de elementos de seções tubulares reforçadas, e também a propagação de fissuras devido à fadiga no sistema de reforço aço/PRFC.

Em Teng, Yu e Fernando (2012) foram abordados os tópicos de preparação da superfície do aço para receber o adesivo, qual o adesivo mais adequado para o sistema, o comportamento da ligação entre o aço e o PRFC, e o reforço à flexão de vigas de aço e seções tubulares de aço preenchidas com concreto por meio do confinamento externo com o PRFC.

Por se tratar de uma técnica ainda pouco difundida, quando comparado aos métodos tradicionais, não há no Brasil procedimentos normativos que possam guiar o profissional na elaboração do projeto de reforço. Com isso, o estudo constante do comportamento de vigas de aço reforçadas com PRFC possibilita aprimorar teorias já existentes e traz conhecimento para a elaboração de procedimentos normativos definitivos, contribuindo positivamente no crescimento do uso de estruturas de aço.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver estratégias numéricas eficazes para a simulação do comportamento quanto à capacidade de carga à flexão de vigas de aço com seção I reforçadas com laminados de fibras de carbono (PRFC), via Método dos Elementos Finitos (MEF).

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Estudar o comportamento mecânico de vigas de aço reforçadas com PRFC;
- b) Apresentar modelos numéricos encontrados na literatura quanto à simulação do comportamento à flexão de vigas de aço com seção I reforçadas com PRFC;

- c) Desenvolver modelos numéricos com base no Método dos Elementos Finitos empregando elementos do tipo casca para o perfil de aço;
- d) Validar os modelos numéricos perante resultados presentes na literatura.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A utilização de PRF (polímeros reforçados com fibra) é uma solução de interesse para o reforço de elementos metálicos estruturais, em substituição aos métodos tradicionais, tendo em vista que o compósito apresenta alta resistência e rigidez, massa específica reduzida, além de rapidez e facilidade de instalação.

Diversos estudos têm sido realizados sobre o reforço de estruturas metálicas com PRF, especialmente de carbono (PRFC). Dentre os elementos em estudo encontram-se as vigas, que são elementos submetidos ao esforço de flexão.

Quando elementos estruturais são submetidos a esse esforço, são desenvolvidas tensões de tração e de compressão, pois nas vigas quando a mesa superior é comprimida, a inferior é tracionada e vice-versa. Com isso, pode haver a ocorrência de instabilidade local (flambagem local da mesa ou da alma) ou de instabilidade global (flambagem lateral com torção), dependendo, respectivamente, da esbeltez local ou global do elemento.

A presença de reforço com PRFC (polímeros reforçados com fibra de carbono) pode eliminar ou reduzir a instabilidade ou colapso, e conduzir a um aumento significativo da resistência do elemento.

Métodos para o cálculo da resistência de vigas reforçadas com PRFC quanto à flexão podem ser encontrados em literatura estrangeira. Porém, as limitações das aplicações desses métodos podem ser contornadas por meio de estudos numéricos.

Portanto, tendo em vista à escassez de trabalhos relacionados ao tema no Brasil, o presente trabalho se apresenta pioneiro e tem contribuição significativa para a área de estruturas de aço no país, e propiciará subsídios para novos estudos e pesquisas relacionados ao tema reforço de estruturas de aço com PRFC.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MÉTODO CONVENCIONAL DE REFORÇO DE ESTRUTURAS DE AÇO

Em algum momento da vida útil das estruturas de aço, podem ser identificadas construções como pontes, edifícios, plataformas, viadutos, galpões, entre outras, que necessitam ser reforçadas, com a finalidade de reestabelecer as condições de uso e prolongar a vida útil dessas construções. A necessidade de tais reforços pode ser por conta de ações climáticas, mudança na utilização final, degradação dos elementos destinados à resistência dos esforços, ou até mesmo devido a erros de execução ou de concepção de projeto.

As estruturas podem necessitar tanto de reparos quanto de reforço. Os reparos podem ser um tipo de correção localizada de um elemento que apresente deterioração, danos ou defeitos, não contribuindo com a resistência estrutural. Enquanto que o reforço é utilizado com a finalidade de aumentar ou reestabelecer a capacidade de resistência do elemento quanto ao que é determinado em projeto.

Os reparos em elementos danificados podem ser por meio de costura para os elementos que apresentam fissuras ou rachaduras, remoção e substituição de componentes atingidos por corrosão e também remodelação de conexões rebitadas danificadas.

O reforço de estruturas de aço se faz necessário, em geral, como objetivo de aumentar a capacidade de carga de elementos da estrutura a ser reforçada. De acordo com Tawfik e Karunasena (2010), as estruturas de aço desempenham um papel importante no setor da construção civil, por isso é necessária maior atenção quanto às técnicas utilizadas para reparo e reabilitação das mesmas, visto que, por vezes, estas apresentam menor custo do que a substituição da peça.

De acordo com Teobaldo (2004), quando se trata de edificações com estrutura formada por materiais ainda em uso, o 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.

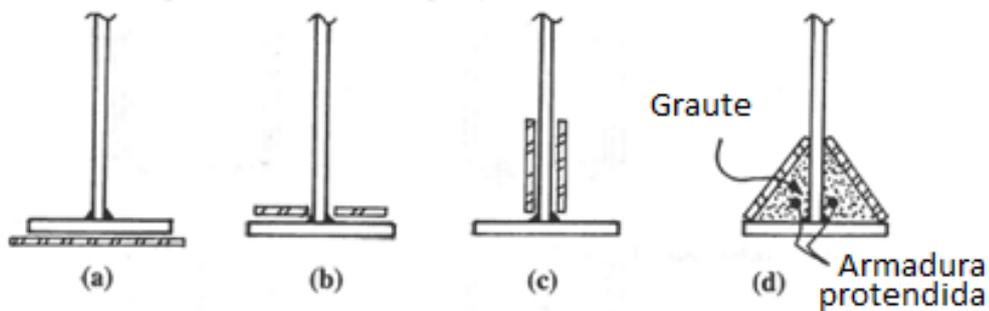
Segundo Zhao (2014), o método convencional de reparo ou reforço de estruturas metálicas consiste em cortar e substituir ou fixar placas de aço ou chapas externas aos elementos, por meio de solda ou parafusos. Porém, estas placas e chapas além de serem

pesadas e volumosas, levando à adição de novas cargas ao elemento, estão propensas à corrosão e fadiga.

A adição de chapas metálicas, realizada por meio de soldas, parafusos ou mesmo rebites pode até ser de rápida execução, porém apresenta dificuldades quanto ao transporte do material em função do peso, precisa de proteção à corrosão e ao fogo quando necessário.

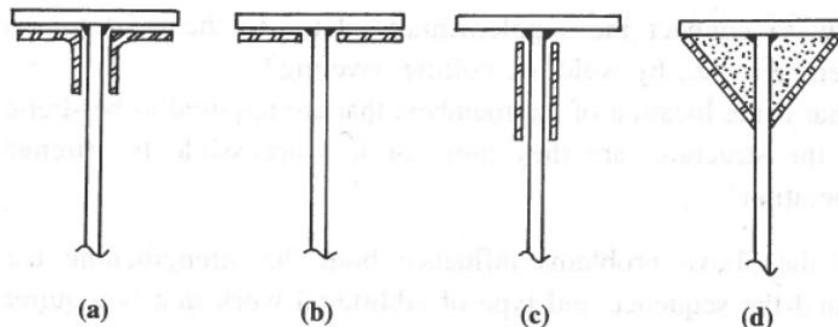
Na Figura 2.1 são apresentados exemplos de adição externa para o reforço da mesa inferior com chapas horizontais, verticais e diagonais. Na Figura 2.2 apresentam-se exemplos de reforço da mesa superior. Em ambos os casos o objetivo é aumentar a capacidade do elemento de suportar cargas.

**Figura 2.1 - Reforço da mesa inferior**



**Fonte:** Adaptado de Radomski (2002)

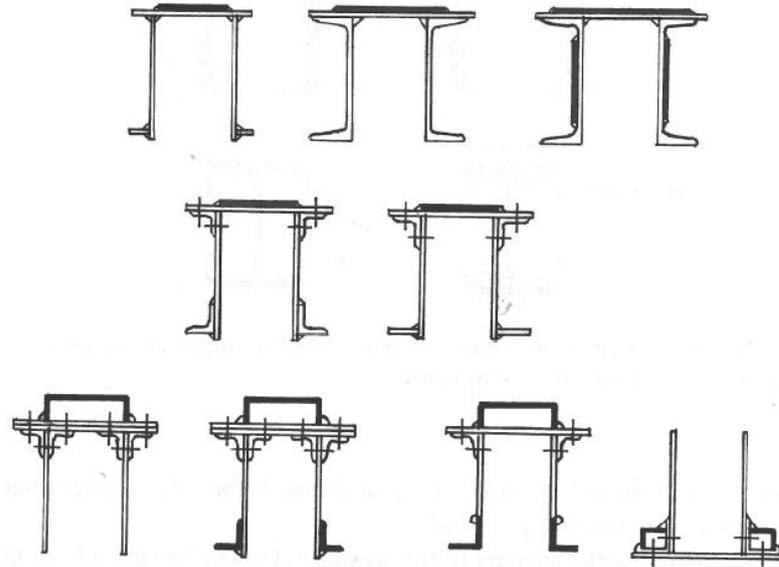
**Figura 2.2 - Reforço da mesa superior**



**Fonte:** Radomski (2002)

Exemplos de aumento de seção transversal de uma treliça de ponte são apresentados na Figura 2.3. É importante ressaltar que com o reforço de elementos estruturais é preciso uma maior atenção para a redistribuição dos esforços internos, podendo ser necessário a adição de novos elementos ou o reforço de elementos já existentes.

**Figura 2.3 - Exemplos de seções transversais aumentadas de treliças metálicas**



**Fonte:** Radomski (2002)

Com o reforço da seção transversal do elemento é possível reduzir a tensão no elemento, aumentando resistência à fadiga do mesmo. Entretanto, o aumento da seção transversal resulta em carga permanente adicional na estrutura.

De acordo com Demir (2011), o método mais comum e prático para a junção do material externo a um elemento já existente é a solda. Para este efeito, em primeiro lugar, deve ser devidamente verificada a soldabilidade do elemento a ser reforçado e a concepção da solda deve ser cuidadosamente realizada, considerando na fase de projeto a influência do aumento de temperatura no elemento. Outra questão a ser considerada é o encolhimento da solda, para que não resulte em fissuras, distorção na estrutura e possível laminação da base.

Outro método para fixação do reforço é por meio de parafusos. Tal método exige mais espaço para realização quando comparado a soldas, porém o trabalho para preparação do reforço é mais simples. Quanto ao tipo existem os parafusos comuns e os parafusos de alta resistência.

Para a instalação dos parafusos de alta resistência, é necessário considerar o torque específico para mobilização do atrito entre as partes conectadas, evitando o deslizamento entre elas, o que requer cuidados especiais com relação às arruelas e ao acabamento das superfícies em contato. Esse tipo de parafuso proporciona maior rigidez à ligação e impede a movimentação das partes conectadas.

Em Hollaway e Cadei (2002) são apresentadas algumas desvantagens associadas ao método tradicional de reforço de estruturas de aço com chapas fixadas por meio de parafusos ou soldagem:

- O procedimento de instalação utilizado é trabalhoso e demorado;
- O procedimento requer perfuração e posicionamento adequado das chapas, e a retenção das chapas de aço pesadas em posição até depois da montagem;
- Existe potencial para fissuração por fadiga da solda nas extremidades das chapas e distorção dos elementos metálicos;
- O aumento do peso dos elementos pode comprometer a capacidade de resistência e aumentar a deflexão; e
- A perfuração da estrutura existente provoca um enfraquecimento temporário da estrutura.

Com base nos aspectos apresentados até aqui, percebe-se o interesse por procedimentos e materiais alternativos àqueles disponíveis no método convencional de reparo e reforço de estruturas.

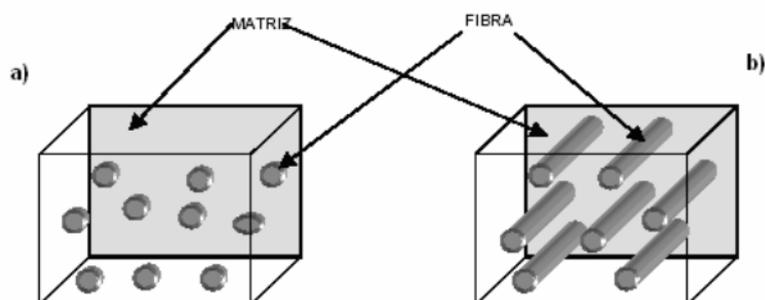
## 2.2 COMPÓSITO DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO

O uso do PRFC na construção civil é recente, por não haver amplo conhecimento técnico, não existirem procedimentos normativos específicos que proporcionem o embasamento necessário, e também devido ao elevado custo do material. Porém, pesquisas têm mostrado a potencialidade da utilização desse material no reforço de estruturas, levando a evolução da técnica e conseqüentemente ao crescimento da utilização na construção civil.

Menon (2008) explica que um compósito é um material estrutural obtido a partir da união de dois ou mais materiais de naturezas diferentes. Tais materiais são combinados ao nível macroscópico, em que um deles é denominado de fase de reforço, e o outro é conhecido como fase matriz que é responsável pela impregnação do reforço.

A Figura 2.4 mostra a representação do compósito reforçado com partículas e com fibras.

**Figura 2.4 - Compósitos reforçados com a) partículas e com b) fibras**



**Fonte:** Menon (2008)

A formação do compósito resulta em um comportamento superior àquele de seus componentes tomados separadamente.

Os Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC) são definidos como um material compósito constituído por uma matriz polimérica, termorrígida ou termoplástica, reforçado com algum tipo de fibra, contínuas ou não, de modo a incrementar resistência ou rigidez em uma ou mais direções (unidirecional, bidirecional e multidirecional).

### **2.2.1 Fibras de Carbono**

No compósito, as fibras são responsáveis por combaterem os esforços solicitantes, proporcionando principalmente resistência estrutural e rigidez, além de contribuir com o aumento da resistência ao calor, corrosão e condutividade.

As fibras da matriz compósita devem ser posicionadas de modo que apresentem maior eficiência quanto às distribuições de tensões da estrutura. É em sua direção principal que se encontra o maior valor de resistência, e conforme se afasta dessa direção, tais valores vão diminuindo.

As fibras podem ser orientadas em qualquer direção com o objetivo de melhorar a resistência e a rigidez. Os resultados desejados dependem praticamente do tipo e da quantidade de fibras utilizadas na direção medida. O alinhamento das fibras pode ser unidirecional, bidirecional ou dispostas em várias direções em um mesmo plano.

Arquez (2010) explica que as fibras unidirecionais podem ser utilizadas em estruturas lineares, sendo estas as barras, os fios, os cabos e os laminados. Enquanto que as fibras bidirecionais são utilizadas para atuarem segundo duas direções no mesmo plano, tendo como

exemplo os reforços com mantas ou grelhas de barras de PRFC para lajes e tabuleiros de pontes.

O comprimento das fibras também pode variar. De acordo com Beber, Filho e Campagnolo (2001), as fibras longas apresentam maior facilidade ao processamento e orientação no interior do compósito, resultando em um material com menor retração e maior resistência mecânica. Já, no caso das fibras curtas, a orientação no interior de um compósito é mais complexa, acarretando em problemas no momento de se determinar uma direção preferencial de resistência.

As fibras podem ser de diferentes materiais e formatos. Existem fibras de vidro, aramida e carbono, que podem ser encontradas em forma de manta, placas, laminado ou tiras. Dentre os tipos de fibras citados, o que apresenta maior resistência e rigidez para o reforço é a fibra de carbono.

De acordo com Souza e Ripper (1998), a fibra de carbono se destaca principalmente pela rigidez e leveza, por apresentar ótimo comportamento relativo à fadiga e à atuação de cargas cíclicas, estabilidade térmica e resistência aos vários tipos de ataques químicos.

Segundo Machado (2011), as fibras de carbono resultam da queima de fibras orgânicas (poliacrilonitril – PAN), de fibras de rayon ou com base no alcatrão derivado do petróleo ou do carvão, em temperatura entre 1000 °C e 1500 °C. Após esta carbonização, o autor afirma que “os átomos de carbono se apresentam totalmente alinhados ao longo da fibra precursora, conferindo extraordinária resistência mecânica ao produto final”.

Na Tabela 2.1 são apresentadas as principais propriedades mecânicas de lâminas de PRFC produzidas e comercializadas pela Sika® (2009). Os dados são fornecidos pelo próprio fabricante, e os valores para deformação na ruptura são referentes à direção longitudinal das fibras.

Tabela 2.1 – Propriedades do PRFC segundo o fabricante (Sika®)

Sika CarboDur				
Valores em MPa		S	M	H
Módulo de Elasticidade	Valor médio	165.000	210.000	300.000
	Valor mínimo	> 160.000	> 200.000	290.000
	5% Valor de ruptura	162.000	210.000	-
	95% Valor de ruptura	180.000	230.000	-
Resistência à Tração	Valor médio	3.100	3.200	1.500
	Valor mínimo	> 2.800	> 2.900	>1.350
	5% Valor de ruptura	3.000	3.000	-
	95% Valor de ruptura	3.600	3.900	-
Deformação na ruptura (mín)		>1,7%	> 1,35%	> 0,45%

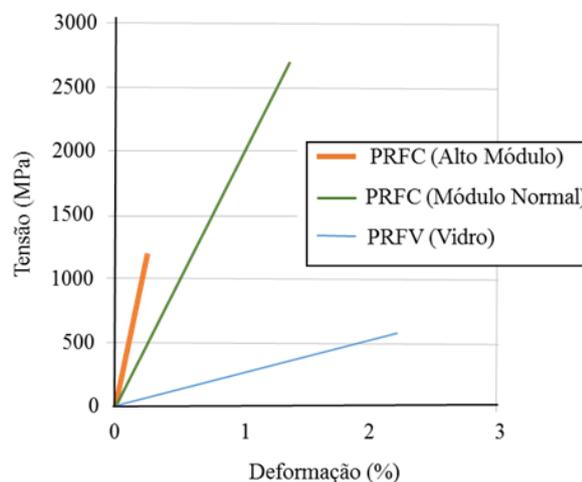
Fonte: Catálogo do fabricante em meio eletrônico - Sika® (2009)

S – PRFC de alta resistência;  
M – PRFC de médio módulo;  
H – PRFC de alto módulo.

De acordo com Zhao (2014), os laminados de PRFC são adequados para o reforço de estruturas de aço devido ao seu módulo de elasticidade ser aproximadamente o mesmo ou superior ao do aço. Explica ainda, que os PRFC são classificados e denominados de acordo com o seu módulo de elasticidade.

A Figura 2.5 mostra uma típica curva de tensão-deformação para o PRFC de alto módulo, PRFC de módulo normal e para um polímero reforçado com fibra de vidro.

Figura 2.5 – Típica curva tensão-deformação para PRFC



Fonte: Adaptado de Zhao (2014)

### 2.2.2 Matriz polimérica

O componente responsável pelo funcionamento em conjunto das fibras é a matriz. A matriz é responsável por transmitir os esforços entre elas, assim como protegê-las de danos devido à agressividade ambiental ou até mesmo de danos mecânicos. Tem como características a durabilidade e apresenta comportamento dúctil.

As matrizes podem ser resinosas, poliéster, epóxi, minerais (carbono) e metálicas (ligas de alumínio). Classificando-se em termoplástica e termorrígida, sendo a primeira com características de tenacidade e ductilidade, podendo ser moldada após a fabricação, por meio do acréscimo de temperatura, e a segunda caracterizada pela resistência, rigidez e fragilidade. Diferente das termoplásticas, as matrizes termorrígidas impregnam-se facilmente às fibras sem necessidade de condições especiais, como altas temperaturas.

Segundo Menon (2008), as resinas mais utilizadas nos PRFC são as termorrígidas da classe dos poliésteres insaturados, do vinil ésteres e do epóxi. Sendo as resinas epóxi bastante usadas nos compósitos de alto desempenho pela extensa quantidade de propriedades físicas e mecânicas, excelente resistência a tração, boa resistência química e a solventes, é a mais compatível com as fibras de carbono pela forte adesão com as fibras apresentando cura sem retração.

A matriz também é composta por *fillers* e aditivos, que servem para controlar a retração, melhorar a capacidade da transferência de tensões, aumentar a rigidez e facilitar a fabricação do compósito. De acordo com Menon (2008), os aditivos mais comuns são os inibidores da ação de raios ultravioleta, os antioxidantes, os catalisadores e os desmoldantes.

### 2.3 FORMAS DE UTILIZAÇÃO DO PRFC

Os polímeros reforçados com fibras de carbono podem ser encontrados em diferentes formas, sendo estas divididas em barras para protensão externa, grelhas, laminados, mantas (aglomerados de fibras) e tecidos (tecelagem de fios).

Zhao (2014) explica que os PRF's podem ser encontrados em forma de placas (laminados) com espessura da ordem de 1,5 mm, sendo melhor aproveitados em superfícies retas. Já as mantas ou tecidos são ligados a superfície metálica por meio de resina à base epóxi, permitindo seu uso em superfícies curvas.

Os sistemas de aplicação do PRFC podem ser divididos em pré-fabricados e curados *in situ*.

### **2.3.1 Sistemas pré-fabricados**

Os sistemas pré-fabricados são industrializados e basta a colagem do laminado na superfície a ser reforçada. Esse sistema é produzido pelo método da pultrusão, em que um conjunto de feixes de fibras de carbono é impregnado de uma camada de resina termoendurecível, consolidando um reforço com espessura e largura definidas. Visto a orientação unidirecional das camadas de fibras, o composto se torna mais resistente e rígido em tal direção (JUVANDES, 1999).

De acordo com Azevedo (2008), a espessura do laminado para utilização na engenharia civil é de 1 mm a 2 mm, sendo armazenados em rolos com mais de 50 m. As propriedades mecânicas do compósito são baseadas na área bruta da seção transversal da lâmina. No compósito, o volume de fibras é da ordem de 65% a 75% do volume total do laminado.

As propriedades do laminado, como a espessura, a largura, o módulo de elasticidade, a tensão e deformação última, devem ser fornecidas pelo fabricante por meio da ficha técnica do produto.

### **2.3.2 Sistema curado *in situ***

O sistema curado *in situ* é formado pelos fios, mantas ou tecidos, e podem ser encontrados em estado seco ou pré-impregnado, sendo a manta mais utilizada na engenharia civil, com espessura de 0,1 a 0,2 mm.

O conjunto de fibras é aplicado sobre uma camada de resina de saturação já distribuída na superfície de reforço. O adesivo, ao impregnar as fibras, transforma o conjunto em um PRFC e faz a ligação deste com o substrato.

A espessura de um compósito curado *in situ* é difícil de ser determinada de forma precisa antes de sua aplicação. Suas características mecânicas são fundamentadas na área da seção transversal das fibras.

Ao contrário do sistema pré-fabricado a ficha técnica do sistema é referente apenas à fibra.

Para a execução do sistema curado *in situ*, devem ser seguidas corretamente as especificações de preparação da superfície, para garantir a qualidade e eficiência do reforço. Inicia-se com o primer, seguido de uma camada regularizadora para receber a resina, responsável por aderir e saturar o tecido de fibras de carbono, garantindo sua colagem no elemento, finalizando com um acabamento estético. Esse processo de aplicação controla a quantidade de fibras, porém não controla a quantidade de resina utilizada.

#### 2.4 ADESIVOS PARA REFORÇO DE ESTRUTURAS DE AÇO COM PRFC

O adesivo é o item responsável por unir o PRFC com a superfície do elemento a ser reforçado, transferindo assim as tensões entre os materiais, e garantindo o trabalho em conjunto do sistema.

Por se tratar de um componente de extrema influência no funcionamento adequado do reforço, é necessário que o adesivo seja escolhido de forma a garantir a eficiência do sistema. Para tal, deve ser definido qual o desempenho que se deseja alcançar com o reforço, o tipo de substrato ao qual será aplicado, quais as condições do ambiente e de aplicação do PRFC.

Segundo Maheri e Adams (2002), antes de um adesivo poder ser especificado para uma aplicação, testes de seleção devem ser realizados para comparar e avaliar os vários parâmetros de adesão. Especialmente para os adesivos estruturais, em que as falhas durante o uso real podem ter consequências devastadoras.

Ainda de acordo com Maheri e Adams (2002), as propriedades dos adesivos podem variar muito e a escolha adequada é essencial para um projeto adequado da junção. Assim, para determinar as tensões e deformações nas juntas adesivas em uma variedade de configurações, é necessário caracterizar o comportamento do adesivo para conhecer suas propriedades mecânicas, particularmente a curva tensão-deformação e o seu módulo.

Banea e Silva (2009) explicam que para a obtenção das propriedades adesivas, uma variedade de testes é aplicada em amostras. Os parâmetros medidos são a carga e a tensão, que são necessários para criar falhas. A geometria do teste deve fornecer um estado de tensão puro, distribuído uniformemente através da superfície de contato e da linha de ligação, livre de concentrações de tensões, e o tratamento de superfície deve ser suficiente para garantir uma falha coesiva em toda a camada adesiva.

De acordo com Hollaway et al. (2006) o adesivo é composto por duas partes, a resina e o agente de polimerização. Diferentes tipos de adesivos podem ser encontrados, dentre eles o

epóxi, poliuretanos, acrílicos e cianoacrilato. Sendo o mais utilizado para reforço de estruturas de aço o adesivo epóxi.

Na Tabela 2.2 são apresentadas as propriedades típicas de alguns tipos de adesivos quando solicitados ao esforço de tração.

**Tabela 2.2 – Propriedades típicas de adesivos solicitados à tração**

<b>Adesivo</b>	<b>Módulo de Elasticidade (MPa)</b>	<b>Tensão de Ruptura (MPa)</b>	<b>Deformação Última (%)</b>	<b>Referência</b>
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	0,30	
Sikadur 330	4820	31,3	0,75	
Araldite 420	1901	28,6	2,40	Fawzia (2007)
Sikadur 30	9282	24,0	0,30	

**Fonte:** Adaptado de Zhao (2014)

Banea e Silva (2009) explicam que, devido ao uso de matrizes com resinas de alta temperatura para os materiais compósitos, foi necessário o desenvolvimento de sistemas adesivos compatíveis e igualmente estáveis pelo calor. Os adesivos epóxis que são muito utilizados para as matrizes compostas são comumente usados para ligar compósitos baseados em matriz epóxi devido à compatibilidade entre resina e adesivo.

Segundo Hollaway e Cadei (2002) há uma série de epóxis no mercado, mas o selecionado deve ser compatível com as condições de cura. Aqueles com as propriedades mais desejáveis normalmente precisam de cura a temperaturas elevadas. Porém, existem sistemas disponíveis que possibilitam que a cura seja realizada à temperatura ambiente, e estes se tornam os mais adequados para aplicações de engenharia civil.

Uma boa adesão resulta principalmente da ligação mecânica e química entre o adesivo e o aderente, o que depende do tratamento adequado para preparação da superfície a ser reforçada. A maioria dos métodos de tratamento de superfície envolve a limpeza, seguida da remoção de camadas danificadas e depois de uma nova limpeza para garantir a remoção de todos os resíduos.

O uso de tratamentos mecânicos para produzir superfícies ásperas antes da ligação, combinado com uma superfície adesiva limpa, melhora a resistência da interface adesivo e aderente.

O comportamento de adesão pode ser influenciado devido a mudanças na rigidez da resina ou do material adesivo, ocasionado pela exposição do material ao efeito de umidade ou calor, combinado ao alto valor de tensão aplicado. A influência da temperatura e umidade se estende as propriedades mecânicas do material da matriz compósita, podendo ocorrer o enfraquecimento da interface entre fibras e matriz na presença da umidade.

De acordo com Banea e Silva (2009) a exposição prolongada ou mesmo a exposição por curto prazo a temperaturas elevadas, muitas vezes, produzem alterações químicas e físicas irreversíveis dentro de adesivos. À medida que a temperatura aumenta, a força de ligação diminui. Quanto à umidade, a sua absorção em um material polimérico pode levar a uma ampla gama de efeitos, reversíveis e irreversíveis, incluindo diferentes graus de plastificação, perda de força, inchaço, degradação e aumento da ductilidade de alguns adesivos epóxis.

A ligação do reforço é o componente mais fraco de um sistema de reforço do aço com PRFC. Sendo assim, é importante compreender propriedades como módulo de elasticidade, resistência à tração e deformação de tração final.

Em grande parte, a vida útil do sistema de reforço é dependente, da aplicação apropriada de compósitos, da eficiente transferência de carga entre os elementos e da durabilidade da ligação.

## 2.5 COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO ENTRE O PRFC E O AÇO

De acordo com Zhao e Zhang (2007), o elo mais fraco da ligação no sistema de reforço de estruturas de aço com PRFC é o adesivo, e é quem define o tipo de falha que ocorrerá.

Zhao e Zhang (2007) explicam ainda que as falhas na colagem podem ser ocasionadas por problemas de aderência ou falhas de execução de algum dos produtos utilizados. Podendo ser utilizado mecanismos de aderência para aumentar a eficiência na transferência das tensões e diminuir as chances de delaminação.

Hollaway e Cadei (2002) afirmam que, para a realização do reforço, é necessário compreender como ocorre a transferência da força entre o PRFC e o elemento estrutural de aço. Esse entendimento é importante porque a relação entre a transferência de força e o comprimento de desenvolvimento correspondente determinará a posição e o comprimento total do reforço a ser utilizado.

De acordo com Fernando (2010), a força de ligação nem sempre aumenta com o comprimento da ligação. Quando o comprimento da ligação atinge um valor limite, qualquer aumento deste comprimento de ligação não resulta no aumento na força da ligação.

O máximo aproveitamento da capacidade de ligação entre o aço e o reforço de PRFC é fundamental para a integridade da estrutura, sendo o adesivo o responsável por contribuir para que isso ocorra.

Zhao e Zhang (2007) apresentaram quais são possíveis modos de falha associados com o sistema de ligação de PRFC ao elemento de aço, sendo eles:

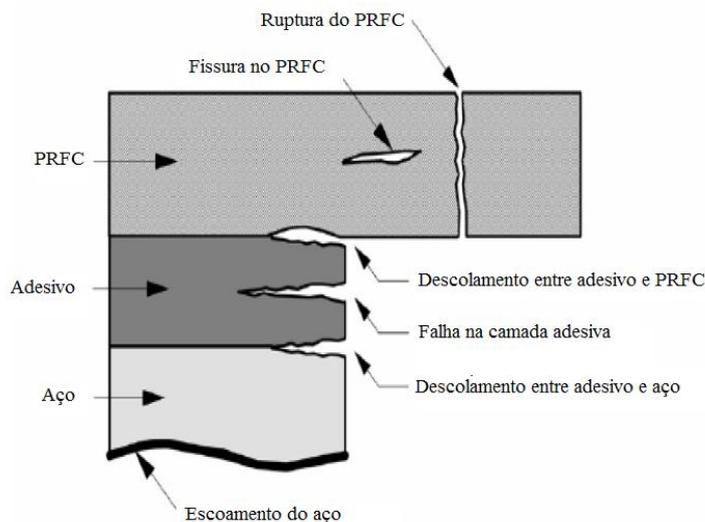
- I. Falha na interface de aço e adesivo;
- II. Falha de coesão (insuficiência da camada adesiva);
- III. Falha na interface PRFC e adesivo;
- IV. Delaminação do PRFC (separação de algumas fibras de carbono da matriz de resina);
- V. Ruptura do PRFC;
- VI. Escoamento do elemento de aço.

Os modos de falhas citados podem depender do módulo de elasticidade do PRFC, de acordo com Fawzia et al. (2005), e também do tipo de adesivo e sua espessura.

Tawfik e Karunasena (2010) explicam que o tipo de modo de falha (II) é uma falha comum, geralmente associada a uma camada adesiva fina ou de baixa qualidade. O modo de falha do tipo (IV) pode acontecer quando há uma separação de fibras de carbono da matriz de resina de PRFC, o que significa baixo módulo de elasticidade do compósito, enquanto o tipo de modo de falha (VI) raramente acontece porque geralmente há uma espessura suficiente do elemento de aço.

Na Figura 2.6 é apresentado de forma esquemática os possíveis modos de falha associados com o sistema de ligação de PRFC.

**Figura 2.6 - Possíveis falhas que levam a descolamento do PRF**



**Fonte:** Adaptado de Zhao e Zhang (2007)

De acordo com Teng, Yu e Fernando (2012), a capacidade de ligação pode ser controlada pela força de adesão das interfaces físicas entre o adesivo e os aderentes ou a força de coesão do adesivo. Ou seja, a falha de descolamento da interface aço/PRFC pode ocorrer em um dos seguintes modos: (1) falha de coesão dentro do adesivo; (2) falha de adesão nas interfaces físicas entre o adesivo e os aderentes; e (3) uma combinação destes dois modos.

Esta abordagem da força de adesão é explicada por Zhao e Zhang (2007) como a compatibilização do equilíbrio e da deformação no sistema reforçado. Sendo aplicada em elementos em que a descontinuidade da tensão pode ser causada por um defeito no adesivo (adesivo não contínuo), uma rachadura no substrato de aço (substrato não contínuo) ou a extremidade de um pedaço de reforço de PRFC (PRFC não contínuo).

Como já citado, entre os tipos de falhas que podem ocorrer em vigas de aço reforçadas com PRFC, existe o descolamento do laminado, tanto na interface aço/adesivo quanto na PRFC/adesivo. Essa falha por descolamento ainda pode ser classificada em dois tipos: falha por descolamento da extremidade e falha por descolamento intermediário.

### **2.5.1 Falha por descolamento da extremidade**

Segundo Zhao (2014) a descolagem da extremidade ocorre devido ao alto cisalhamento interfacial localizado e tensões de cisalhamento perto da extremidade laminada,

iniciando numa extremidade do laminado e, em seguida, propagando-se rapidamente para a região de momento mais elevado, exibindo as características de um processo frágil e instável. Esses altos valores de cisalhamento surgem devido à necessidade de transferir tensões no laminado para a viga reforçada perto da extremidade laminada.

A Figura 2.7 apresenta um exemplo de descolamento da extremidade do reforço de PRFC laminado em uma viga de aço de seção I, a partir de um estudo experimental realizado por Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012).

**Figura 2.7 – Descolamento da extremidade do laminado de PRFC**



**Fonte:** Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012)

A falha por descolamento no final do laminado leva ao não aproveitamento total da resistência do material de reforço PRFC.

Esse tipo de falha pode ser prevenido por métodos que reduzam as concentrações de tensões na extremidade da placa, de forma que seu descolamento seja retardado ou eliminado. Uma forma de prevenção é o posicionamento da extremidade do reforço em uma região de baixa solicitação de momento, ou a partir da ancoragem mecânica, como o encapsulamento da extremidade do PRFC. Fitton e Broughton (2005) sugerem o uso de um adesivo com uma grande energia de fratura (geralmente um adesivo macio) na extremidade laminada.

Deng, Lee e Moy (2004) destacaram essa característica importante da viga de aço reforçada, que é a intensidade de tensão significativa no adesivo na extremidade do PRFC, devido à descontinuidade existente pela terminação abrupta do reforço. Uma maneira de prevenção é o afunilamento da extremidade da placa e o uso de uma camada extra de adesivo na extremidade, reduzindo a concentração de tensões.

É altamente indesejável permitir que o descolamento da extremidade ocorra antes do escoamento da viga de aço, visto que, isso implica que a força do material do PRFC está longe de ser totalmente utilizada, não contribuindo com o reforço da viga à flexão.

### 2.5.2 Falha por descolamento intermediário

A falha por descolamento intermediário ocorre devido à presença de danos ou escoamento do aço, localizados na região onde existe o maior momento, sendo geralmente o local de maior solicitação do reforço de PRFC.

De acordo com Teng et al. (2003) esse tipo de falha em vigas de aço pode ser comparado ao que ocorre em vigas de concreto armado, visto que, em ambos os casos ela se inicia com defeitos e enfraquecimentos locais, ou também em locais de descontinuidade da viga.

Segundo Fernando (2010) o processo de descolamento intermediário pode ser mais dúctil quando comparado ao descolamento de extremidade que é frágil. O descolamento se inicia com as altas tensões no meio do laminado, e se propaga para as extremidades onde as tensões possuem valores mais baixos.

A Figura 2.8 apresenta um exemplo de como ocorre o descolamento intermediário do reforço de PRFC laminado em uma viga de aço de seção I.

**Figura 2.8 – Descolamento intermediário do laminado de PRFC**



Fonte: Zhao (2014)

O descolamento intermediário foi observado em testes laboratoriais em vigas de aço reforçadas com PRFC com ou sem um defeito inicial, por alguns pesquisadores, como exemplo Sallam et al. (2006).

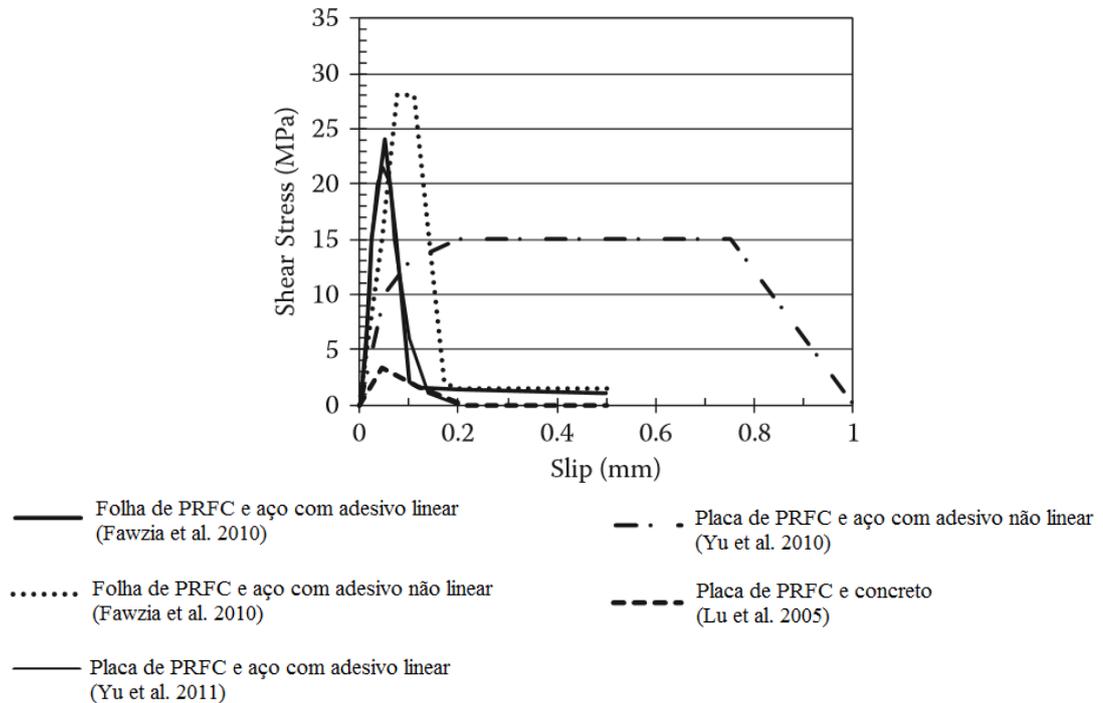
Em Sallam et al. (2006), observou-se que o descolamento intermediário ocorreu precocemente quando utilizado um reforço de maior largura, devido à tensão transversal não uniforme gerada através da largura da mesa (especialmente na área da mesa abaixo da alma). Concluiu com os resultados obtidos que o descolamento do reforço na região de momento constante diminui a eficiência do elemento reforçado.

### **2.5.3 Modelos para a ligação dos compósitos ao aço**

O mecanismo de ligação entre o concreto ou aço e camadas de reforço de compósitos é uma característica importante para os sistemas de concreto/PRFC ou de aço/PRFC. De acordo com Zhao (2014), para uma adequada compreensão e modelagem do comportamento da ligação do material de aço com os compósitos de PRFC, é de fundamental importância a utilização de modelo que relacione a tensão de aderência e deslizamento (*bond-slip model*).

Esse modelo pode ser utilizado para determinar o comprimento efetivo da ligação e a força de ligação. Essa relação comumente é determinada a partir de deformações axiais do reforço de PRFC. A relação do comportamento da ligação com base na tensão de cisalhamento interfacial e o deslizamento é representada por curvas. Na Figura 2.9 são apresentados exemplos de curvas obtidas por diferentes autores, para adesivos com comportamento linear e não linear.

**Figura 2.9 – Curvas tensão de aderência-deslizamento**



**Fonte:** Adaptado de Zhao (2014)

Fawzia, Zhao e Al-Mahaidi (2010) realizaram um estudo quanto a ligação do laminado de PRFC em juntas de vigas de aço, com o objetivo de compreender as características existentes nessa ligação e o seu comportamento.

Os autores apresentam para três diferentes adesivos os resultados para a máxima normal de tração na interface, o valor de separação normal através da interface onde a máxima tração normal é alcançada e a separação de cisalhamento em que a tração máxima de cisalhamento é atingida.

O estudo paramétrico foi realizado por modelagem numérica com as variáveis comprimento de ligação do PRFC, a máxima deformação adesiva e espessura da camada adesiva.

## 2.6 REFORÇO DE ESTRUTURAS DE AÇO COM PRFC

O sistema de reforço de estruturas com o compósito de fibra de carbono pode ser empregado com diferentes finalidades e já é comumente aplicado para reforçar estruturas de concreto. O uso desse avançado material de reforço tem se tornado uma opção atrativa para o

reforço de estruturas metálicas (HOLLAWAY; CADEI, 2002). Estruturas metálicas incluem aquelas construída com ferro fundido, aço carbono, alumínio, aço forjado e aço inoxidável.

Segundo Zhao (2014), PRFC podem ser utilizados para reforçar pontes deterioradas para suportar maiores cargas de tráfego, aumentar a capacidade de vigas para resistir a esforços de flexão e torção em edifícios com aumento de carregamento em seus pavimentos e reparar vigas de ponte com problemas de fadiga aumentando sua vida útil, dentre diversas outras situações possíveis.

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

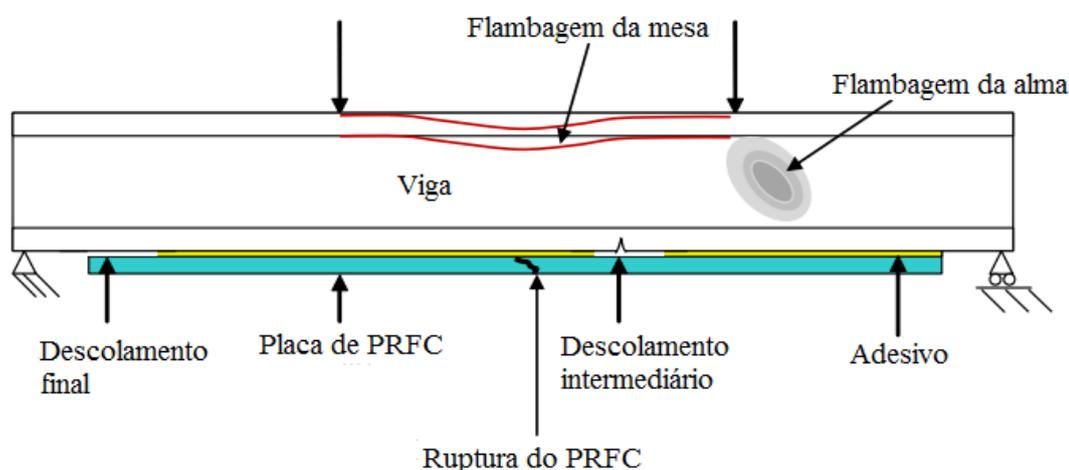
Durante as duas últimas décadas, pesquisadores estudaram o comportamento de vigas de aço reforçadas com laminados de PRFC que estão externamente ligados à mesa tracionada. Isto permite a utilização da resistência à tração relativamente elevada dos laminados de PRFC para melhorar a capacidade de flexão dessas vigas reforçadas.

O uso do PRFC para o reforço de vigas de aço 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. É 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.

As vigas submetidas ao reforço quanto à flexão possuem sua capacidade de resistência ligada 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).

A Figura 2.10 apresenta um esquema dos possíveis modos de falhas em uma viga de aço com seção I reforçada com PRFC por ligação externa na sua face tracionada.

**Figura 2.10 - Alguns dos modos de falha da viga de aço reforçada com PRFC**



**Fonte:** Adaptado de Teng, Yu e Fernando (2012)

#### 2.6.1.1 Falha por flexão no plano – Ruptura do PRFC

De acordo com Zhao (2014), certificando-se de que não ocorra falha por flambagem ou por descolamento, a resistência à flexão de uma viga com reforço de laminados de PRFC será baseado na ruptura à tração do PRFC. Este é o modo de falha mais desejável, visto que a capacidade resistente de seção reforçada em questão pode ser prevista por uma análise de seção convencional e, portanto, a suposição de seção plana ainda pode ser usada.

A falha por flexão no plano de uma viga de aço com o laminado de PRF ligado à mesa tracionada ocorre quando a deformação da extremidade tracionada ou comprimida atinge seu valor limite. No caso das vigas de aço reforçadas com PRFC, esse tipo de falha ocorre quando a deformação no extremo tracionado ligado ao laminado atinge seu valor de ruptura à tração. Com a ruptura do PRFC, uma queda repentina na carga resistida pela viga pode ser esperada no instante da falha.

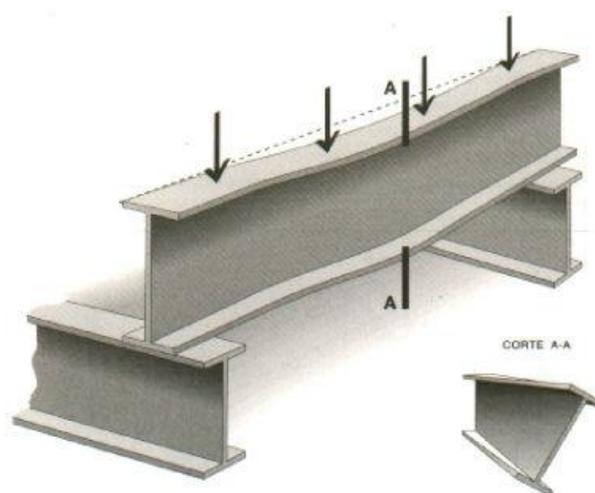
#### 2.6.1.2 Flambagem lateral com torção

Um dos modos de falha das vigas de aço com seção I é a flambagem lateral com torção. Trata-se de um estado-limite último causado pelo momento fletor atuante em relação ao eixo de maior momento de inércia da seção transversal, e caracterizado por movimentos de translação lateral associado a um movimento de torção.

Esses dois movimentos, que ocorrem simultaneamente, podem ser explicados pelo fato de que a parte comprimida da seção transversal é ligada continuamente por meio da alma à parte tracionada (a parte comprimida tende a se deslocar lateralmente, mas é parcialmente contida pela parte tracionada).

A Figura 2.11 apresenta um esquema de flambagem lateral com torção.

**Figura 2.11– Flambagem Lateral com Torção (FLT)**



Fonte: Souza (2009)

Esse fenômeno é suscetível de ocorrência para vigas de seção aberta, como vigas de seção I sem suporte lateral adequado, especialmente quando o elemento é esbelto, ocorrendo devido à baixa resistência à flexão lateral e às deformações por torção.

O comportamento da instabilidade pode ser classificado em função da distância dos suportes laterais, sendo o comprimento do trecho sem contenção conhecido como comprimento destravado.

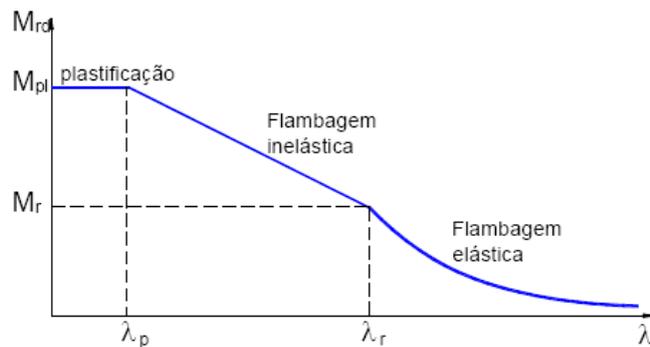
Para vigas com grandes comprimentos destravados, a flambagem pode ser classificada como elástica. Em vigas com comprimentos destravados intermediários, a instabilidade pode ser classificada como inelástica, ocorrendo após a plastificação de parte da seção transversal. Por fim, quando o comprimento destravado é suficientemente pequeno para que ocorra a plastificação total da seção antes da instabilidade, sendo este o comportamento plástico.

No caso de vigas sem contenções laterais, o momento máximo resistente corresponde ao momento crítico de flambagem lateral com torção (FLT). Que é o máximo momento que pode ser aplicado à viga, em condições ideais, para que não ocorra a FLT.

Para a norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 o momento resistente é considerado constante ao longo do trecho destravado da viga. Visto que tal condição não é exatamente real, e por existir variação do momento fletor ao longo do comprimento destravado, soluções numéricas aproximadas são necessárias para se obter o momento de flambagem, sendo utilizado um coeficiente que proporciona o momento equivalente ( $C_b$ ). O coeficiente  $C_b$  é calculado em função de valores de momento fletor em pontos pré-definidos do diagrama de momento ao longo do comprimento destravado.

A Figura 2.12 ilustra a curva de resistência, com a resistência ao momento fletor ( $M$ ) em função da esbeltez do elemento ( $\lambda$ ).

**Figura 2.12 – Momento resistente em função da esbeltez**



**Fonte:** Souza (2009)

O reforço da face tracionada com o laminado de PRFC não apresenta elevada eficiência para o combate ao modo de falha crítico de flambagem lateral com torção, quando comparado ao modo de falha de flexão no plano. É de grande importância considerar o modo de flambagem lateral de uma viga de aço reforçada com PRFC, a menos que o modo de flambagem lateral com torção seja impedido por suporte lateral adequado (ZHAO, 2014).

A Figura 2.13 apresenta um exemplo de flambagem lateral com torção em uma viga de seção I.

**Figura 2.13 – Flambagem lateral de viga de aço com seção I**



**Fonte:** Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012)

Poucas pesquisas foram realizadas quanto ao assunto, porém, é de grande importância, no projeto de um sistema de reforço de PRFC, verificar a possibilidade de a flambagem lateral se tornar o modo de falha governante de uma viga de aço reforçada com PRFC, que estaria regida por falhas de flexão no plano antes do reforço.

Um estudo foi realizado por Kabir e Seif (2010), explorando a eficácia de diferentes esquemas de reforço para aumentar a resistência a flambagem lateral. Para tal, utilizaram de uma solução analítica baseada em método de energia para encontrar um valor crítico para a análise da flambagem lateral. Com base nos resultados numéricos, o uso de uma camada fina de PRFC nas mesas de uma viga I pode significativamente desenvolver a possibilidade de flambagem lateral.

### 2.6.1.3 Flambagem local

Para vigas de aço com seção I, composta por partes esbeltas de mesa e/ou alma, também existe a possibilidade de redução da resistência do elemento por conta do fenômeno de flambagem local.

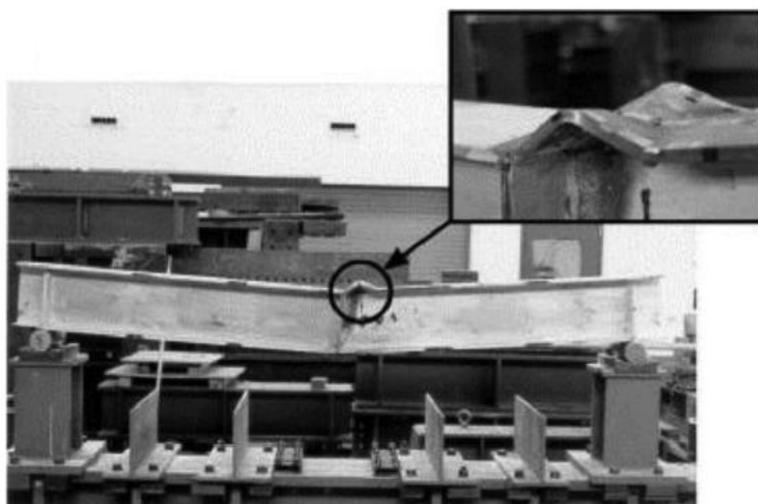
Em função das tensões normais de compressão na seção transversal de elementos de aço submetidos à flexão, é possível o surgimento do fenômeno de instabilidade denominado flambagem local.

A flambagem local é um fenômeno de desestabilização de parte do perfil (mesas ou alma) por conta de ondulações localizadas pontualmente ao longo do comprimento, mantendo o eixo do elemento indeformado, sendo a esbeltez da chapa um fator determinante do limite de resistência à flambagem local.

Tal fenômeno não representa colapso estrutural, e sim uma redução significativa da rigidez da seção, apresentando geralmente um comportamento pós-crítico estável. Existe a possibilidade da ocorrência da redistribuição das tensões nos elementos, fenômeno denominado efeito pós-crítico ou resistência pós-flambagem, ao qual confere ainda um ganho na capacidade resistente ao elemento.

Na Figura 2.14 é apresentado um exemplo de viga de seção I submetida ao efeito de flambagem local da mesa.

**Figura 2.14 – Flambagem local de mesa viga de aço com seção I**

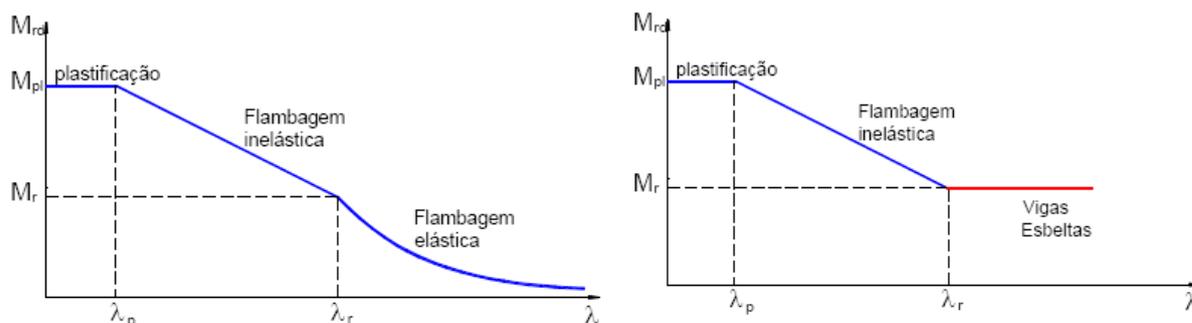


Fonte: Zhao (2014)

Para vigas com seção do tipo I, são analisadas as possibilidades de flambagem local da alma (FLA) e flambagem local da mesa (FLM). Sendo a alma um elemento apoiado nas duas extremidades (AA = Apoiado-Apoiado), com parte comprimida e parte tracionada, resultando em tensões com variação linear. Enquanto a mesa é considerada um elemento de parte apoiada e parte livre (AL = Apoiado-Livre) e suas tensões são de compressão e variam uniformemente.

Uma curva para representação do comportamento da resistência à flambagem local da mesa e da alma, respectivamente, relacionando o momento resistente e o índice de esbeltez é apresentada na Figura 2.15.

**Figura 2.15 – Curva de resistência para FLM e FLA**



Fonte: Souza (2009)

Para a resistência segundo FLM, a plastificação da seção ocorre quando o valor momento resistente de cálculo atinge o valor do momento de plastificação da seção transversal ( $M_{pl}$ ). Para valores que se encontram no intervalo entre o momento de plastificação da seção transversal ( $M_{pl}$ ) e momento correspondente ao início do escoamento ( $M_r$ ), a instabilidade é inelástica. Abaixo dos valores de  $M_r$  a flambagem é elástica. A mesma leitura pode ser feita para FLA, porém, quando o valor de momento resistente é menor que  $M_r$ , fica definido como perfil de alma esbelta.

Zhao (2014) explica que a capacidade de carga de uma viga de aço pode ser elevada com a ligação do laminado de PRFC na mesa tracionada. No entanto, devido à adição do reforço, o eixo neutro se desloca em direção à face tracionada, conseqüentemente a alma e a mesa comprimida passam a ser submetidos a uma tensão de compressão maior. Assim, pode ocorrer a flambagem local da mesa superior ou da alma. Esse tipo de falha pode ser evitado realizando o reforço com laminado de PRFC da mesa superior e/ou alma.

O fenômeno de flambagem local pode ocorrer após o escoamento da seção, caracterizando uma flambagem local inelástica, acarretando em redução significativa na capacidade da seção da viga e constituindo um estado limite último. Sendo assim, faz-se necessário verificar a possibilidade que isso ocorra antes de outros modos de falha.

Para previsões mais precisas desse modo de falha em vigas de aço de seção I reforçadas PRFC, os projetistas são aconselhados a realizar análises não lineares com elementos finitos não lineares com base em técnicas de modelagem de elementos *shell*. Para previsões confiáveis, as imperfeições geométricas apropriadas para os elementos devem ser incluídas no modelo.

## 2.7 PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS PARA DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE AÇO REFORÇADAS COM PRFC

Na literatura podem ser encontrados procedimentos normativos para o cálculo de vigas de aço reforçadas com PRFC, propiciando maior entendimento do estado da arte quanto ao comportamento mecânico do elemento reforçado submetido ao esforço de flexão.

Segundo os modelos, todos os possíveis modos de falha devem ser considerados e analisados para a determinação da capacidade de carga de uma viga reforçada com PRFC, consistindo em verificações de Estados Limites Últimos (ELU).

De acordo com os modelos, é de interesse obter a resistência à flexão no plano do elemento reforçado, a consideração adequada da ancoragem da extremidade do reforço, e a verificação da resistência à flambagem lateral com torção e flambagem local da mesa e da alma. Por fim, também devem ser verificados os Estados Limites de serviço (ELS).

Os procedimentos de métodos analíticos para todas as verificações citadas acima estão disponíveis no Apêndice A.

## 2.8 UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF) NA MODELAGEM DE VIGAS DE AÇO REFORÇADAS COM PRFC

Neste item estão apresentados alguns estudos já realizados com a utilização do MEF para a simulação do comportamento de vigas de aço reforçadas à flexão com PRFC.

### 2.8.1 Modelagem de Seleem, Sharaky e Sallam (2010)

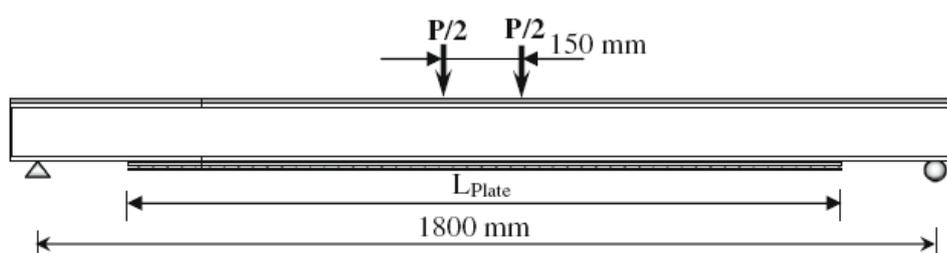
O estudo realizado por Seleem, Sharaky e Sallam (2010) teve como objetivo investigar numericamente o modo de falha e o comportamento à flexão de vigas de aço e de aço/concreto, reforçadas com diferentes comprimentos de laminados de PRFC.

Com o auxílio do *software* ABAQUS, a análise tridimensional de elementos finitos (3D FEA) foi adotada para simular o comportamento não linear dessas vigas carregadas sob configuração estática de flexão de quatro pontos. O critério de escoamento de Von Mises foi adotado na análise não linear.

O elemento sólido com oito nós (C3D8) foi utilizado para modelar a viga de aço, a laje de concreto da viga mista, a camada adesiva e o laminado de PRFC. Diferentes tamanhos de malha foram utilizados para testar a convergência e obter a precisão adequada da solução numérica conforme verificado pelos resultados experimentais.

Todas as vigas foram simplesmente apoiadas, e a carga foi aplicada em incrementos como carga estática seguindo um esquema de controle automático de carga. A Figura 2.16 apresenta os detalhes da viga testada.

**Figura 2.16 – Viga modelo de análise**

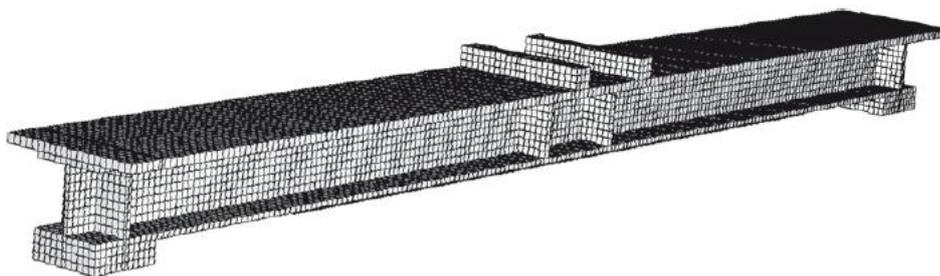


**Fonte:** Seleem, Sharaky e Sallam (2010)

A viga de aço foi modelada como um material plástico elástico clássico com encruamento por deformação. Foi utilizada uma relação tensão-deformação bilinear para seções de aço em compressão e tração, e relação tensão-deformação linear até a falha do material do PRFC.

Três vigas de aço de seção W100x17,2 reforçadas com duas tiras de PRFC com diferentes comprimentos foram simuladas numericamente para estudar o efeito do comprimento do reforço ligado sobre a carga de descolamento. A Figura 2.17 apresenta a modelagem numérica da viga.

**Figura 2.17 – Viga modelada com o software ABAQUS**



**Fonte:** Seleem, Sharaky e Sallam (2010)

A análise numérica realizada pelos autores, baseada por resultados experimentais previamente encontrados na literatura, conseguiu prever o comprimento crítico do PRFC, no qual a eficiência total da ligação adesiva é atingida.

### **2.8.2 Modelagem de Linghoff e Al-Emrani (2010)**

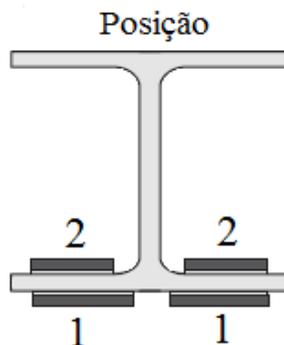
Linghoff e Al-Emrani (2010) utilizaram a modelagem numérica para analisar vigas de aço reforçadas com laminados de PRFC colados, com o objetivo de obter informações sobre as tensões interfaciais na linha de ligação entre o substrato de aço e o laminado de PRFC.

As simulações foram baseadas em uma série de testes laboratoriais e solução analítica, realizados anteriormente. Assim, as análises com elementos finitos foram conduzidas como um estudo paramétrico.

Foram modeladas cinco vigas de aço com perfil HEA180, sendo uma delas sem o reforço, para fins de comparação do incremento de resistência após a ligação do mesmo. Todos os modelos são simplesmente apoiados, com 2,0 m de comprimento total e 1,8 m de vão livre.

Para cada viga reforçada foi utilizada uma configuração exclusiva de laminado PRFC e epóxi, com diferentes propriedades materiais e geométricas. Abaixo dos pontos de aplicação da carga e acima dos apoios foram adicionados reforços junto à alma da viga. O carregamento estático foi aplicado em quatro pontos de flexão.

O laminado de PRFC foi configurado de diferentes maneiras na mesa tracionada, podendo estar na face inferior (configuração 1), na face superior (configuração 2), ou em ambas (configuração 1-2). A Figura 2.18 mostra as possíveis posições do reforço.

**Figura 2.18 – Posição do reforço**

**Fonte:** Adaptado Linghoff e Al-Emrani (2010)

A modelagem numérica foi realizada com o *software* ABAQUS versão 6.4.1, sendo todas as partes do modelo constituídas de elementos sólidos de 20 nós (C3D20R) e com mesclas nas juntas compartilhando os nós comuns nas interfaces, assumindo a interação total entre os diferentes elementos.

Diferentes refinamentos de malha foram utilizados para diferentes regiões das vigas reforçadas. As tensões interfaciais são concentradas em regiões pequenas próximas das extremidades da linha de ligação. Nessas regiões, que são de grande interesse, é necessário o uso de uma malha bastante densa, para obter convergência e uma forma aceitável para a distribuição da tensão.

Foram construídos três modelos com elementos sólidos de 20 nós (C3D20R) e apenas a densidade da malha, na proximidade do final da placa, foi alterada. A camada adesiva formada por quatro elementos na sua espessura. A malha mais grossa formada de elemento de 10 mm foi incapaz de capturar o pico no esforço de cisalhamento interfacial mais próximo do final do adesivo.

Outro modelo foi construído, em que os 20 mm mais próximos da extremidade da linha de ligação eram formados por um comprimento de elemento de 0,5 mm. Este modelo apresentou os melhores resultados para as tensões de cisalhamento interfacial no final do adesivo.

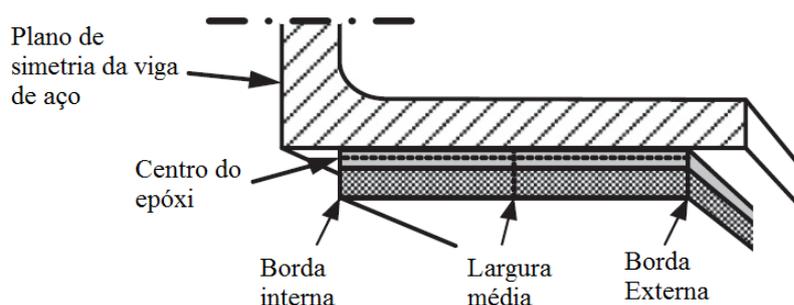
O uso de modelagem com elemento finito sólido exige grande esforço computacional para a realização das simulações. Sendo assim, a simetria da viga em dois planos diferentes foi utilizada, reduzindo para metade da largura e metade do comprimento total.

As análises foram realizadas com o comportamento material não linear do aço, e tanto os adesivos como os epóxis foram assumidos como exibindo comportamento de material

linear, e ainda não foram incluídas no modelo as imperfeições iniciais ou tensões residuais, causadas pelo processo de fabricação.

A Figura 2.19 mostra os pontos de extração dos resultados obtidos ao longo do trajeto do laminado e da linha de ligação.

**Figura 2.19 – Localização do trajeto utilizado**



**Fonte:** Adaptado de Linghoff e Al-Emrani (2010)

As vigas foram carregadas em quatro pontos de flexão e a carga foi aplicada passo a passo, sendo determinada e gerenciada para fazer leituras de deformação em vários níveis de carga pré-determinados. As respostas obtidas nas análises numéricas e nos testes laboratoriais foram comparadas ao estudar a tensão em um ponto localizado na face inferior da mesa tracionada, no intervalo médio da viga.

Os resultados globais obtidos numericamente foram em geral de acordo com os laboratoriais, com diferenças pouco significativa e justificável, como o escoamento do aço devido a não inclusão das tensões residuais no modelo.

Tanto as análises via MEF quanto as laboratoriais mostram que a área plástica na tração aumenta no início do carregamento, apenas para diminuir mais tarde, quando a área plástica no lado da compressão aumenta. Isso resulta no aumento da sollicitação no PRFC para compensar o aumento da área na compressão.

No modelo, as tensões interfaciais na linha de ligação ao longo da mesa inferior reforçada foram extraídas ao longo da borda interna do adesivo e ao longo da largura média da camada adesiva. Ambos os caminhos são retirados no meio da espessura do adesivo, devido às singularidades numéricas nas interfaces entre o adesivo de um lado e os substratos de aço e laminado do outro lado.

A distribuição dos esforços de cisalhamento e descolamento próximo ao final da linha de ligação foi obtida a partir das análises numéricas, juntamente com as tensões interfaciais

que se desenvolvem perto da faixa média da viga devido ao escoamento do aço. Essas tensões podem exceder a capacidade do adesivo e causar descolamento nesta região.

Com base nos resultados do estudo, em comparação com os resultados obtidos anteriormente, concluíram que o modelo apresentou valores maiores para o esforço de cisalhamento quando comparados à solução analítica.

O valor para o esforço máximo de cisalhamento interfacial perto do final do laminado após o escoamento excessivo previsto pelas soluções analíticas se desvia daquela calculada com o modelo via MEF, enquanto que na fase elástica, próximo ao intervalo médio da viga, a distribuição de tensão tem uma forma semelhante à solução teórica, mas, mais longe da borda interna, as mudanças de distribuição no comportamento e nos valores de pico aparecem.

As comparações com os resultados obtidos a partir de testes laboratoriais realizados em vigas de aço reforçadas com laminados PRFC ligados mostram que o comportamento das vigas reforçadas pode ser capturado usando análises de elementos finitos.

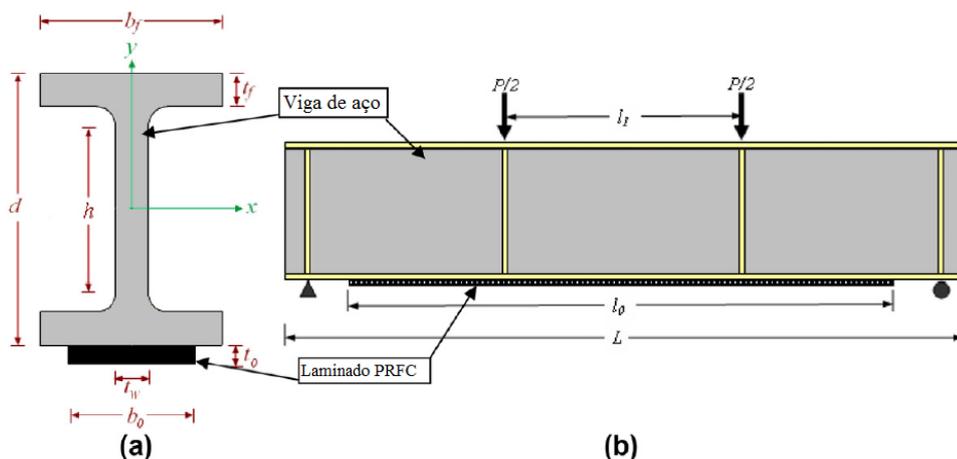
### **2.8.3 Modelagem de Yu, Chiew e Lee – Parte 2 (2011)**

O estudo realizado por Yu, Chiew e Lee (2011) teve como objetivo o comportamento da ligação de vigas de aço reforçadas com PRFC sob carga estática com quatro pontos de flexão.

Para observar a influência de diferentes parâmetros sobre a resistência da ligação, foram projetadas e testadas amostras com diferentes espessuras de laminados, comprimentos de ligação e espessuras adesivas. Foram utilizadas três espessuras adesivas diferentes nas amostras, a fim de mostrar sua influência na definição da carga de falha.

A Figura 2.20 mostra a seção transversal (a) e a vista frontal (b) de uma amostra típica utilizada no estudo.

Figura 2.20 - Esquema da amostra da viga reforçada típica: (a) seção transversal, e (b) elevação frontal.



Fonte: Adaptado Yu, Chiew e Lee (2011)

As análises de elementos finitos foram então realizadas nas vigas de aço reforçadas com PRFC utilizando o *software* ABAQUS, para avaliação das tensões e especialmente na camada adesiva. Elementos de deformação simples, isoparamétricos, de três e quatro nós foram utilizados para criar os modelos.

As vigas foram criadas com as mesmas geometrias e parâmetros de reforço utilizados na fase experimental. A não linearidade material também foi incorporada nos modelos para modelar o comportamento plástico do adesivo e da viga de aço.

Em vigas de aço com laminado de PRFC colado, as maiores concentrações de tensão ocorrem nas extremidades da linha de ligação. Para investigar a distribuição de tensão e de deformação nessas regiões, foi utilizada uma técnica de modelagem especial, a chamada técnica de submodelagem no estudo numérico. Durante o submodelamento, apenas as regiões próximas das extremidades dos laminados de PRFC foram analisadas em detalhes usando malhas graduadas altamente refinadas.

Para que a distribuição detalhada da tensão ao redor da borda da camada adesiva fosse adequadamente descoberta, os autores utilizaram elementos de interface, empregando camadas adicionais de elementos finitos com as dimensões exatas e a propriedade do material do adesivo, de modo que a variação da tensão dentro da camada adesiva pudesse ser investigada.

A validade do modelo é avaliada comparando as forças de ligação obtidas a partir de análises numéricas com os resultados experimentais. As vantagens deste modelo são comprovadas comparando seus resultados com os previstos pelo modelo de valor máximo.

Finalmente, realizou-se um estudo paramétrico para investigar os efeitos da espessura do laminado de PRFC, o módulo de tração do laminado de PRFC, a espessura do adesivo epóxi e o comprimento de ligação na resistência da ligação.

Ao incorporar um modelo de falha de ligação de densidade de energia de deformação equivalente nas análises numéricas, as cargas de falha de ligação das vigas reforçadas com PRF foram descobertas. A diminuição da capacidade de resistência do momento causada pela falha de ligação foi realizada com sucesso na modelagem numérica.

A validade do modelo de falha de ligação proposto foi verificada por comparação com os resultados experimentais. O estudo paramétrico mostrou que a força de ligação poderia ser aumentada pela redução da espessura do laminado, do módulo laminado e da espessura do adesivo ou pelo aumento do comprimento da ligação.

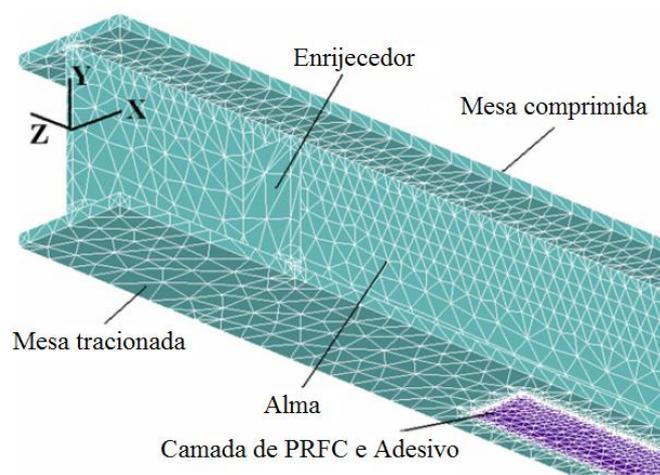
#### **2.8.4 Modelagem de Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012)**

No estudo realizado por Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012), foram investigados os modos de falha do sistema de reforço de vigas de aço com PRFC e seu comportamento estrutural, como capacidade de carga, deformações e tensões em diferentes regiões. Para o estudo foram escolhidos diferentes tipos e dimensões do PRFC, e empregados estudos de simulação numérica e testes experimentais.

Foram utilizadas doze amostras reforçadas com diferentes combinações de reforço, variando comprimento, espessura e módulo de resistência à tração do laminado. Com a finalidade de obter a capacidade de incremento de resistência com o reforço, uma amostra de viga não reforçada também foi utilizada. Dentre as amostras, todas foram simuladas e analisadas numericamente, e apenas seis delas foram testadas e analisadas experimentalmente.

As simulações e análises numéricas das amostras foram realizadas com uso do *software* ANSYS, a partir de simulações 3D completas. O elemento escolhido foi o triângulo sólido 3D com 10 nós (*ten-nodes 187*), tanto para a viga de aço quanto para o laminado de PRFC e o adesivo. A Figura 2.21 apresenta um esquema do modelo numérico em 3D.

**Figura 2.21 – Esquema do modelo 3D da amostra**



**Fonte:** Adaptado Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012)

Os resultados obtidos com as análises das simulações e testes experimentais foram utilizados para estabelecer quais os modos de falha que ocorrem quando há o reforço da viga com o laminado de PRFC.

Concluíram com o estudo que a capacidade de carga das vigas reforçadas aumentou com placas de maior comprimento e espessura, e que o uso de comprimento do PRFC maior que seu comprimento efetivo não tem influência significativa na resistência final. O uso de um reforço com módulo de elasticidade superior contribuiu para uma capacidade de carga ainda maior.

### **3 METODOLOGIAS NUMÉRICAS DE ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE AÇO REFORÇADAS COM LAMINADO DE PRFC**

O uso de modelos numéricos via Método dos Elementos Finitos (MEF) para a simulação do comportamento de elementos de aço reforçados com PRFC vem sendo ferramenta de estudos de diversos pesquisadores, com a finalidade de prever e analisar possíveis modos de falha da estrutura reforçada e incremento da sua resistência com a ligação do reforço.

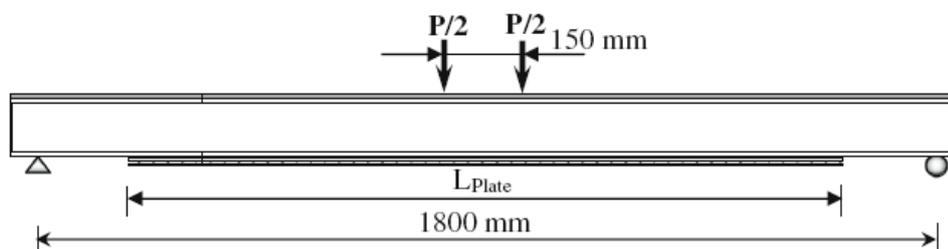
A seguir estão apresentados os estudos experimentais e numéricos utilizados no desenvolvimento do presente trabalho. É apresentado um estudo experimental realizado por Lenwari, Thepchatri e Albrecht (2005), utilizado como base para o desenvolvimento da modelagem numérica realizada por Sellem, Sharaky e Sallam (2010), e o estudo de Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012).

#### **3.1 ESTUDO EXPERIMENTAL DE LENWARI, THEPCHATRI E ALBRECHT (2005)**

O estudo experimental realizado por Lenwari, Thepchatri e Albrecht (2005) teve como objetivo apresentar o comportamento à flexão de vigas de aço reforçadas com a ligação de laminados de PRFC em sua mesa inferior. Incluindo o efeito do comprimento do PRFC nas cargas de falha e modos de falha, o desenvolvimento de tensões de tração no laminado colado, a distribuição de deformação através da seção no ponto médio da viga, e a relação carga-deflexão das vigas reforçadas.

Para a realização do estudo foram utilizadas sete amostras de vigas de aço com perfil W100x17,2 de propriedades materiais e geométricas apresentadas na Tabela 3.1. Visando evitar o escoamento por compressão da mesa superior, realizou-se a soldagem de uma placa de aço na face superior da viga, com 12,2 mm de espessura, 200 mm de largura e mesmas propriedades materiais da viga de aço. A Figura 3.1 apresenta o esquema estrutural da viga ensaiada

Figura 3.1 - Esquema da viga de aço ensaiada



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

Tabela 3.1 - Propriedades geométricas e materiais do perfil de aço

Dimensões (mm)		E (MPa)		Tensão (MPa)
Largura	Altura	Espessura		Escoamento $f_y$
		Mesa	Alma	
100	100	8,0	6,0	200000

Fonte: Da própria autora

O laminado de PRFC utilizado como reforço da mesa inferior foi o Sika CarboDur H514. Duas tiras de laminado com 50 mm de largura são ligadas à superfície inferior, em dois diferentes comprimentos. As informações como espessura, o módulo de elasticidade médio, a tensão de ruptura e a resistência à tração do mesmo são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Propriedades geométricas e materiais do laminado de PRFC

Amostra	Laminado - largura x espessura (mm)	Comprimento (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Resistência à tração (MPa)
V650	50x1,4	650	300	1400	1800
V1200	50x1,4	1200	300	1400	1800

Fonte: Da própria autora

O adesivo utilizado para a ligação das laminas na viga foi o epóxi de duas partes da marca SikaDur 30, com uma camada de 1 mm de espessura, e módulo de elasticidade de 11,2 GPa.

Os pontos de obtenção dos resultados para análise foram divididos ao longo da viga, visando o conhecimento do desenvolvimento de tensões de tração no PRFC, a distribuição de

tensões ao longo da seção transversal no meio do vão, as tensões na mesa inferior ao final do laminado e os deslocamentos no meio do vão da viga.

### 3.2 ESTUDO NUMÉRICO DE SELEEM, SHARAKY E SALLAM (2010)

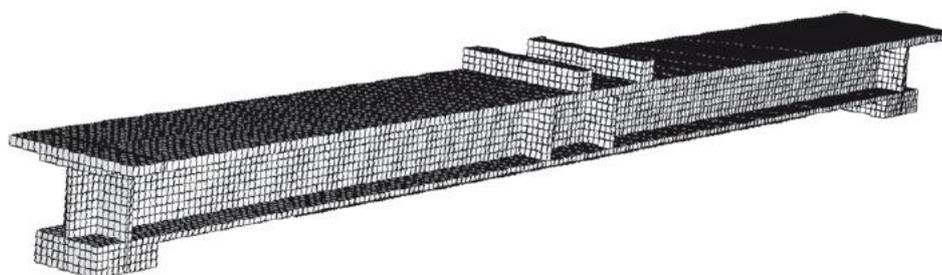
O estudo realizado por Seleem, Sharaky e Sallam (2010) teve como objetivo investigar numericamente o modo de falha e o comportamento à flexão de vigas de aço e de vigas mistas de aço e concreto, reforçadas com diferentes comprimentos de laminados de PRFC, e utilizou como base de comparação os resultados experimentais obtidos por Lenwari, Thepchatri e Albrecht (2005).

Com o auxílio do *software* ABAQUS, a análise tridimensional de elementos finitos (3D FEA) foi adotada para simular o comportamento não linear dessas vigas carregadas sob configuração de flexão de quatro pontos. O critério de escoamento de Von Mises foi adotado na análise não linear.

Informações quanto ao elemento finito utilizado, as características de tamanho de malha, comportamento dos materiais e suas relações tensão-deformação utilizados na simulação das vigas estão apresentadas na seção 2.8.1, e o esquema estrutural da viga simulada é o mesmo apresentado na Figura 3.1.

Assim como no estudo experimental, três vigas de aço de seção W100x17,2 reforçadas com duas tiras de PRFC com diferentes comprimentos foram simulados numericamente para estudar o efeito do comprimento do reforço ligado sobre a carga de descolamento. A Figura 3.2 apresenta a modelagem em elementos finitos da viga.

**Figura 3.2 – Modelo de elementos finitos da viga com o software ABAQUS**



**Fonte:** Seleem, Sharaky e Sallam (2010)

A análise numérica em questão, baseada por resultados experimentais previamente encontrados na literatura, conseguiu prever com razoável aproximação o comprimento crítico do PRFC no qual, a eficiência total da ligação adesiva é atingida.

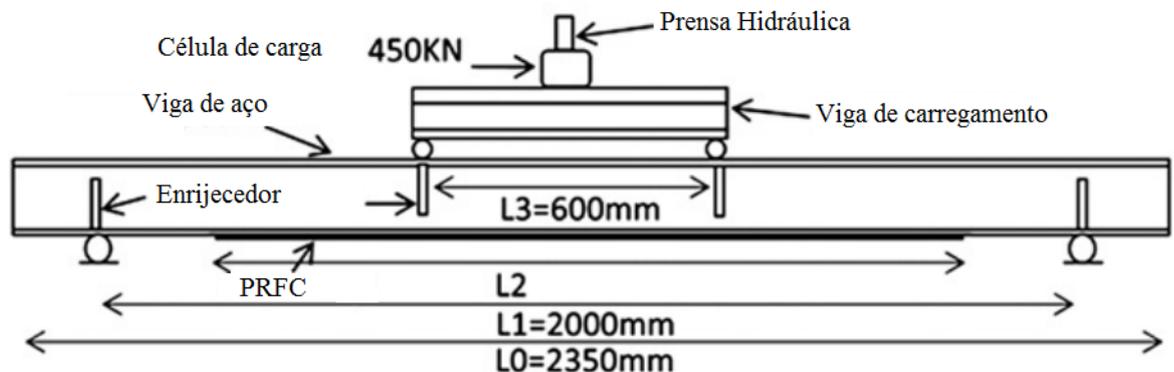
### 3.3 ESTUDO DE NARMASHIRI, SULONG E JUMAAT (2012)

No estudo realizado por Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012) foi investigado os modos de falha do sistema de reforço de vigas de aço com PRFC e seu comportamento estrutural. Para o estudo foram escolhidos diferentes tipos e dimensões do PRFC, e empregados estudos de simulação numérica e testes experimentais.

Foram utilizadas amostras com dimensões das vigas de aço iguais e reforçadas com diferentes combinações de PRFC, variando comprimento, espessura e módulo de resistência à tração do laminado. Com a finalidade de obter a capacidade de incremento de resistência com o reforço, uma amostra de viga não reforçada  $F_1$  também foi utilizada. Dentre as amostras, todas foram simuladas e analisadas numericamente, e apenas seis delas foram testadas e analisadas experimentalmente.

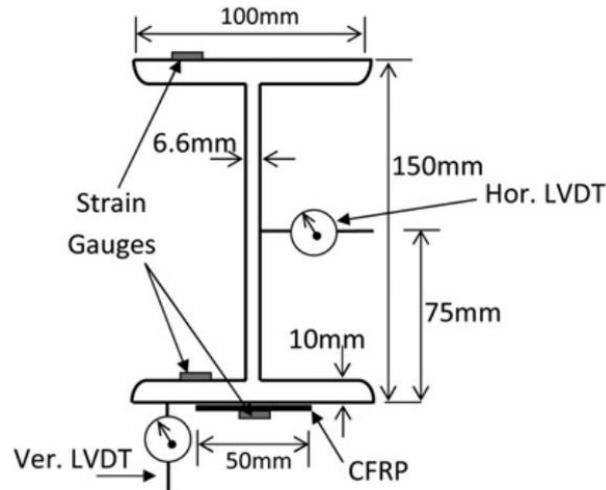
Para as oito vigas reforçadas consideradas, espécimes  $F_2$  a  $F_9$ , foi utilizado PRFC de alta resistência à tração com tensão de ruptura  $f_u$  igual a 2800 MPa e módulo de elasticidade com 160 GPa. O esquema geral de ensaio e as dimensões da viga de aço em questão podem ser vistos na Figura 3.3 e Figura 3.4, respectivamente.

**Figura 3.3 – Disposição do ensaio e dimensões dos elementos**



**Fonte:** Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012)

**Figura 3.4 – Dimensões das vigas de aço e posicionamento dos strain gauges e LVDT.**



**Fonte:** Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012)

As simulações e análises numéricas das amostras foram realizadas com uso do *software* ANSYS. O elemento escolhido foi o tetraédrico com 10 nós (*SOLID 187*), tanto para a viga de aço quanto para o laminado de PRFC e o adesivo. A interface de superfícies comuns foi definida entre a viga aço, o adesivo e o PRFC.

Quanto às propriedades dos materiais, para o laminado de PRFC foram definidas como lineares e ortotrópicas, e a viga de aço e adesivo foram definidos como materiais com propriedades não lineares.

A análise estática não linear foi realizada para alcançar o ponto das falhas, sendo assim, a carga foi aplicada incrementalmente até que a deformação plástica em um elemento atingisse sua tensão final.

Os resultados obtidos com as análises da simulações e testes experimentais foram utilizados para estabelecer quais os modos de falha que ocorrem quando há o reforço da viga com o laminado de PRFC.

Narmashiri, Sulong e Jumaat concluíram que a capacidade de carga das vigas reforçadas aumentou com placas de maior comprimento e espessura, e que o uso de comprimento do PRFC maior que seu comprimento efetivo não tem influência significativa na resistência final.

## 4 MODELOS DESENVOLVIDOS E RESULTADOS OBTIDOS

Neste item está descrito o processo de elaboração dos modelos das vigas simuladas numericamente, bem como os resultados obtidos. Os modelos numéricos aqui desenvolvidos foram analisados pelo *software* ANSYS 18.2 (Versão Acadêmica) e validados com resultados experimentais e numéricos desenvolvidos por Lenwari, Thepchatri e Albrecht (2005), Sellem, Sharaky e Sallam (2010) e Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012)..

Visando evitar repetição excessiva quando da menção ao programa utilizado, no caso o ANSYS 18.2 (Versão Acadêmica), o mesmo será referido adiante apenas por ANSYS.

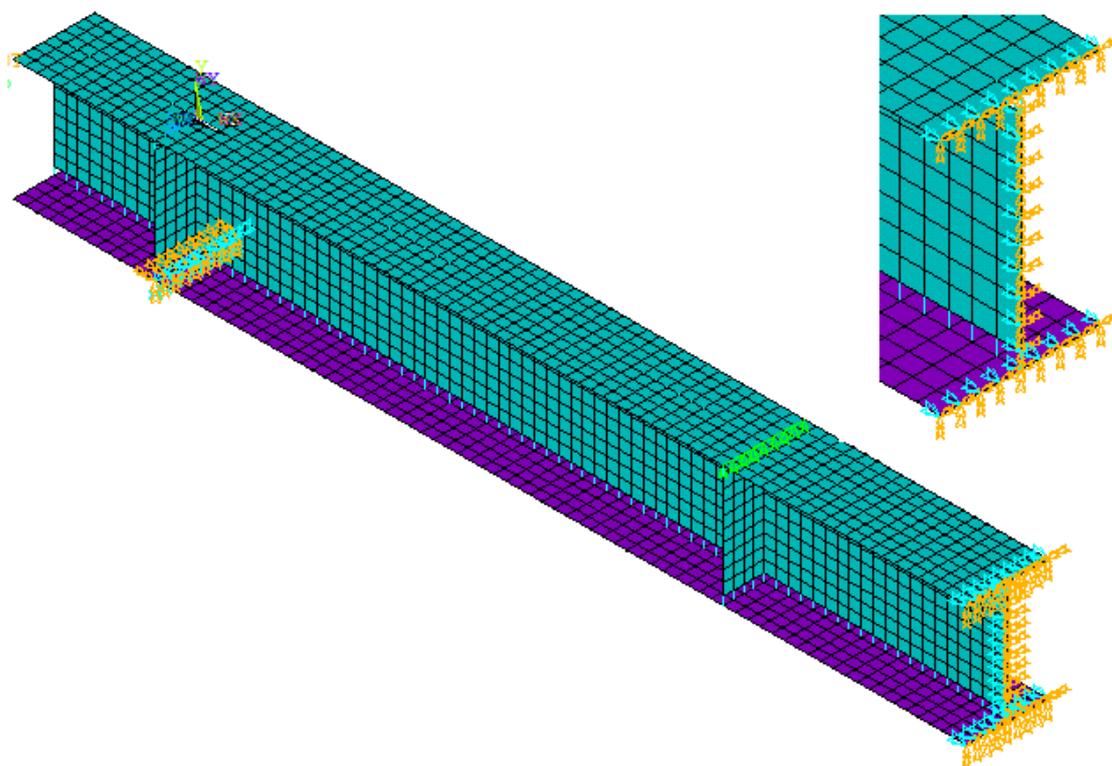
Os modelos são divididos em dois grupos para cada referência estudada, sendo o primeiro a viga de aço sem o reforço, e o segundo a viga reforçada com o PRFC.

### 4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

As vigas utilizadas como base de desenvolvimento do presente trabalho apresentam simetria quanto suas dimensões, pontos de apoios e aplicações de carga. Sendo assim, a simulação foi realizada para apenas metade da viga, fazendo uso de restrições de graus de liberdades dos elementos para a simulação da continuidade da mesma. Na Figura 4.1 tem-se um exemplo de discretização em elementos finitos da viga de aço de acordo com o mencionado.

Foram realizadas análises estáticas não lineares, onde a carga total aplicada no elemento finito do modelo foi dividida em incrementos de carga. O método de Newton-Raphson é um dos mecanismos utilizados pelo ANSYS para solucionar análises não lineares, sendo este método empregado no presente trabalho. O processo de convergência foi controlado pelos incrementos de carga e seus deslocamentos correspondentes, de forma iterativa.

**Figura 4.1 – Exemplo de discretização em elementos finitos da viga de aço considerando a simetria do modelo e as restrições empregadas**



**Fonte:** Da própria autora

Informações como propriedades materiais e geométricas para os diferentes materiais, configuração de distância entre apoios e pontos de aplicação de carga, comprimento da viga e do reforço, tamanho do elemento finito para a malha, são utilizadas como dados de entrada para a construção do modelo da viga de simulação.

#### 4.2 DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS

Para a elaboração dos modelos numéricos foram utilizados diferentes tipos de elementos finitos, com a finalidade de alcançar um modelo que correspondesse aos resultados obtidos pelos estudos utilizados como base da pesquisa.

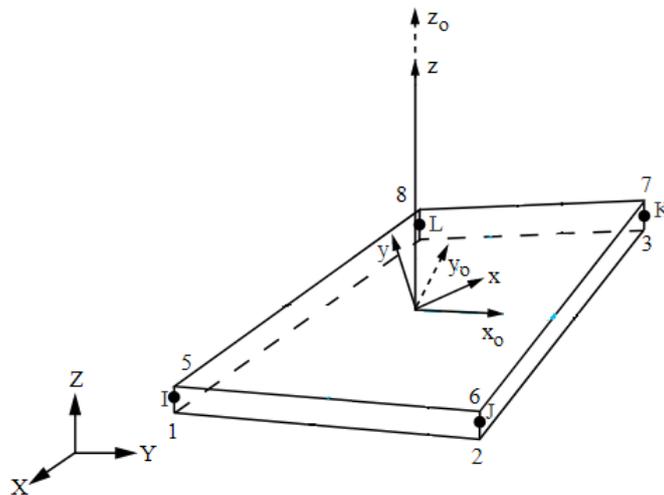
Dentre os elementos utilizados, disponibilizados na biblioteca interna do ANSYS, encontram-se o elemento de casca SHELL181 para modelar a seção transversal da viga de aço, o adesivo e o reforço de PRFC, o elemento sólido SOLSH190 para modelagem do adesivo e reforço de PRFC, e por fim, o elemento de interface INTER205 para simulação da

ligação entre as interfaces. Vale destacar que a estratégia de utilizar o elemento de casca *Shell* para tentar simular o comportamento da viga e do reforço difere das demais estratégias presentes nas referências encontradas de vigas reforçadas com PRFC.

#### 4.2.1 Elemento SHELL181

O elemento SHELL181, ilustrado na Figura 4.2, é um elemento de casca bastante adequado para modelar elementos estruturais de paredes finas, em que uma dimensão é muito menor do que as outras duas dimensões. É um elemento plano, com quatro nós e seis graus de liberdade por nó, três translações e três rotações. Esse tipo de elemento permite que seja considerada a não linearidade do material e a deformação linear é apresentada no plano em que está contido.

Figura 4.2 - Elemento SHELL181



Fonte: Biblioteca interna ANSYS 18.2 (2017)

Esse elemento permite que o seu ponto de referência seja adotado tanto no plano das suas superfícies, superior e inferior, quanto no plano médio da sua espessura.

Tal elemento foi utilizado principalmente para a modelagem da seção da viga de aço, e conforme está descrito na seção 4.3.2, também foi testado para a representação do adesivo e do reforço de PRFC, por se tratar de um elemento que permite ainda a consideração de camadas com diferentes espessuras e propriedades de materiais, sendo um possível recurso bastante interessante para a análise de compósitos.

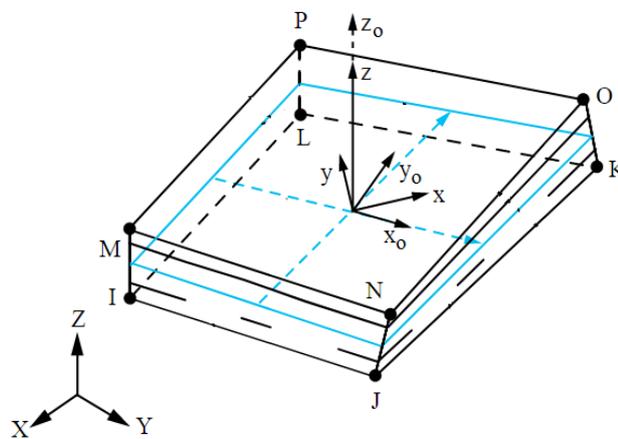
### 4.2.2 Elemento SOLSH190

O elemento SOLSH190, ilustrado na Figura 4.3, é usado para simular estruturas de casca com espessuras de finas a moderadamente espessas. É um elemento que possui oito nós e três graus de liberdade em cada nó: translações nas direções nodais  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

O elemento possui a topologia de elemento sólido contínuo, podendo assim, ser facilmente conectados a outros elementos contínuos.

Conforme apresentado em ANSYS (2017), o elemento SOLSH 190 apresenta capacidade da consideração de plasticidade, hiperelasticidade, efeito da carga axial na rigidez do elemento (*stress stiffening*), fluência, grandes deslocamentos e grandes deformações. Possuindo também capacidade para simular deformações de materiais elastoplásticos quase incompressíveis e materiais hiperelásticos totalmente incompressíveis.

**Figura 4.3 - Elemento SOLSH190**



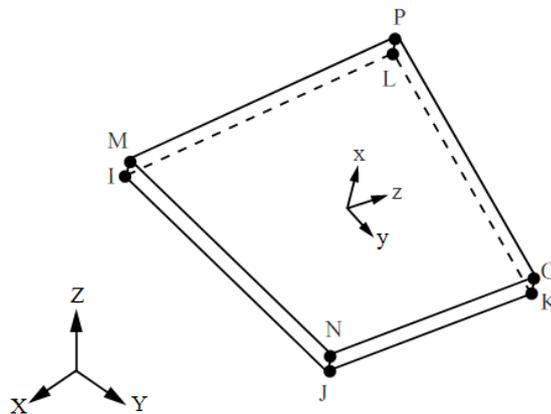
**Fonte:** Biblioteca interna ANSYS 18.2 (2017)

Esse é um elemento que também pode ser utilizado para aplicações em camadas, com diferentes espessuras e propriedades de materiais, sendo um recurso bastante útil na análise de compósitos.

### 4.2.3 Elemento INTER205

O elemento finito INTER205, conforme apresentado na Figura 4.4, é um elemento utilizado para simulação de interface entre duas diferentes superfícies, simulando a conexão entre elas. Ele possui oito nós e três graus de liberdade em cada nó.

**Figura 4.4 - Elemento INTER205**



**Fonte:** Biblioteca interna ANSYS 18.2 (2017)

Esse elemento possui a capacidade de simular o processo de descolamento interfacial entre as duas superfícies, onde essa separação é representada pelo aumento no deslocamento entre os nós, inicialmente coincidentes, dentro do próprio elemento de interface. A simulação do comportamento desse descolamento é regida por um modelo de zona de coesão, podendo o usuário definir qual modelo melhor se adequa ao caso em análise.

Para os modelos desenvolvidos neste trabalho, foi utilizado o modelo de interface exponencial, com definições de valores baseados na pesquisa de Fawzia et al. (2010) e os dados apresentados pelo fabricante do material de ligação. Tais valores serão apresentados e explicados dentro da apresentação do respectivo modelo.

A seguir são apresentados os modelos numéricos desenvolvidos, bem como os elementos utilizados, comportamentos dos materiais adotados, e a evolução de cada modelo a partir dos resultados obtidos por meio da simulação numérica realizada com a utilização do programa ANSYS.

Com a finalidade de validação de resultados e eficiência dos modelos, os modelos elaborados tiveram seus resultados comparados aos resultados numéricos e experimentais de trabalhos já realizados por outros pesquisadores.

#### 4.3 VIGAS DE LENWARI, THEPCHATRI E ALBRECHT (2005) E SELEEM, SHARAKY E SALLAM (2010)

A seguir serão apresentados aspectos gerais da estratégia de modelagem desenvolvida no presente trabalho em concordância com os dados de vigas ensaiadas experimentalmente por Lenwari, Thepchatri e Albrecht (2005) e simuladas numericamente por Seleem, Sharaky e Sallam (2010).

O esquema de configuração dos apoios, dos pontos de aplicação da carga e ligação do reforço é o mesmo do apresentado na Figura 3.1. As dimensões da geometria da seção transversal do perfil da viga de aço utilizada na elaboração dos modelos são apresentadas na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 – Propriedades geométricas da viga de aço**

Seção	Dimensões (mm)					Comprimento total
	Largura	Altura	Espessura			
			Mesa	Alma		
Viga	100	100	8	6	2000	
Placa	200	-	12,2		2000	

Fonte: Da própria autora

##### 4.3.1 Modelo 1 – Viga de Referência

O primeiro modelo foi elaborado como a viga de referência, apenas com a seção transversal de aço sem aplicação do reforço de PRFC. A viga em questão é composta por um perfil I reforçado com uma placa de aço na face superior da mesa superior. Sendo assim, quando referido a seção transversal da viga de aço, subentende-se o uso do conjunto como um todo.

Para a discretização da seção transversal da viga de aço foi utilizado o elemento de casca SHELL181, com malha inicial de 25 mm.

Como dados de propriedades materiais a serem inseridos no modelo para representação do aço, encontram-se seu módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e a tensão de escoamento. Na Tabela 4.2 são apresentados os valores utilizados.

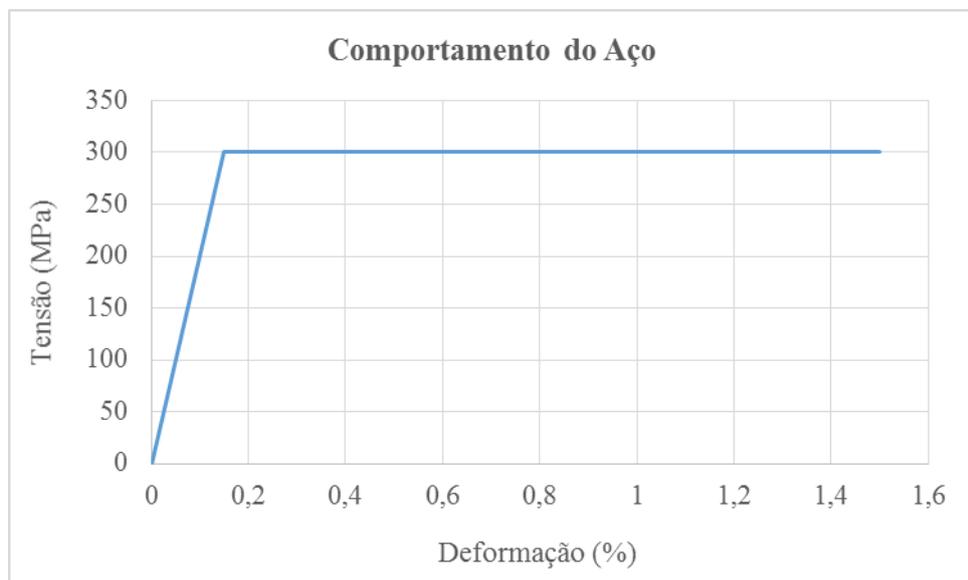
**Tabela 4.2 - Propriedades materiais do aço**

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

Fonte: Da própria autora

A seção da viga de aço foi modelada como um material elastoplástico perfeito. Foi utilizada uma relação tensão x deformação bilinear para seções de aço em compressão e tração, sendo adotada a relação de 1/10000 para uma pequena inclinação quanto ao segundo trecho da curva. O comportamento adotado está representado por meio do diagrama tensão-deformação, ilustrado na Figura 4.5.

**Figura 4.5 - Comportamento material da seção de aço**



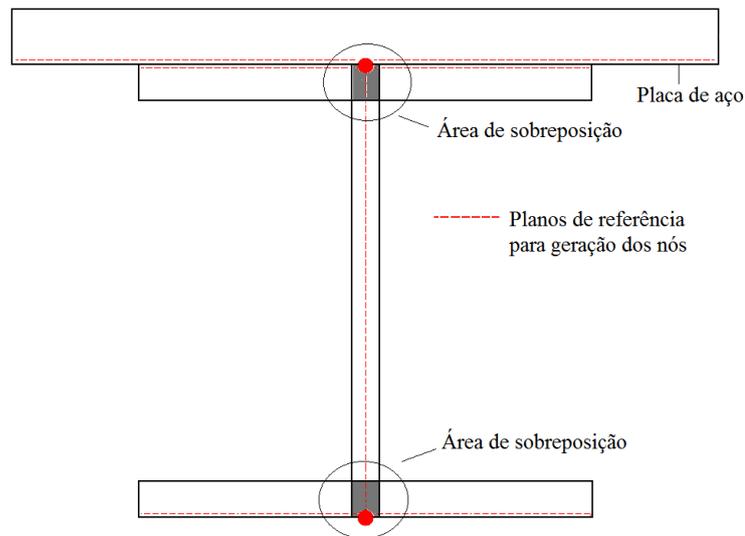
Fonte: Da própria autora

Inicialmente o modelo para a viga de referência foi elaborado utilizando o elemento SHELL181 com seus nós gerados nos planos de referência (em tracejado vermelho) conforme ilustrado de forma genérica pela Figura 4.6.

Nessa figura, também estão representadas a consideração da geração das espessuras dos elementos a partir da superfície de referência. É possível notar a superposição de áreas

das mesas superior e inferior com a alma. A conexão da mesa superior com a placa foi realizada por meio de acoplamento de graus de liberdade dos nós coincidentes de elementos finitos em todas as direções.

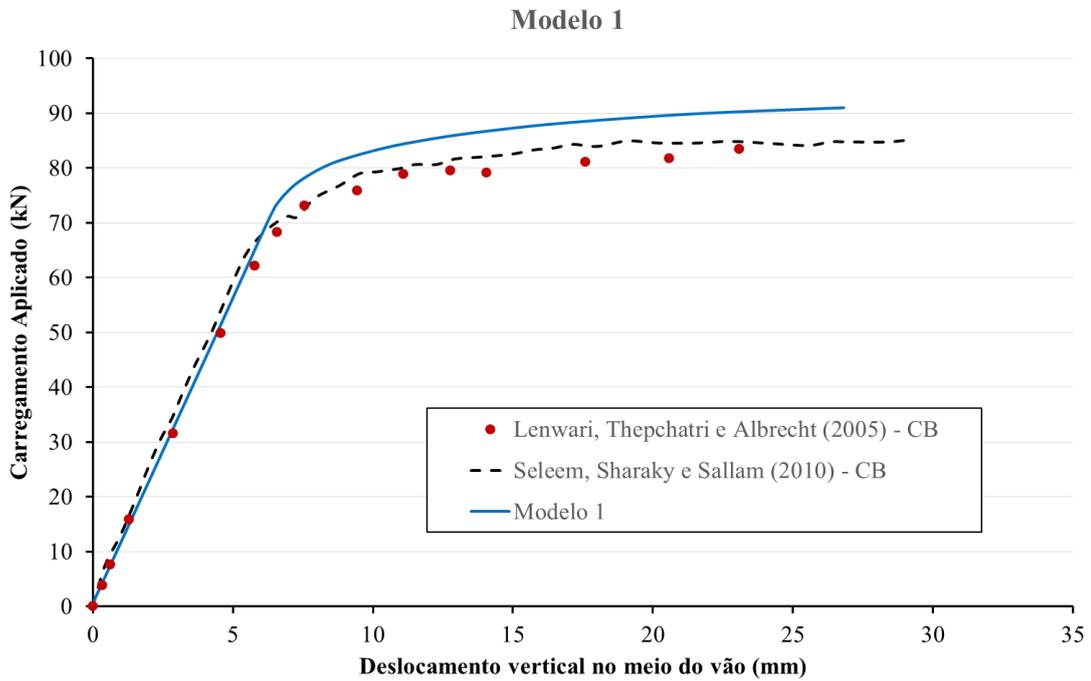
**Figura 4.6 – Posição dos nós dos elementos finitos no plano médio da espessura**



**Fonte:** Da própria autora

Os resultados obtidos, no ponto central do vão na face inferior da mesa inferior, para os deslocamentos da viga, em função do carregamento aplicado pode ser visto na Figura 4.7, onde também são apresentados os resultados das referências utilizadas.

**Figura 4.7 - Resultados Modelo 1**

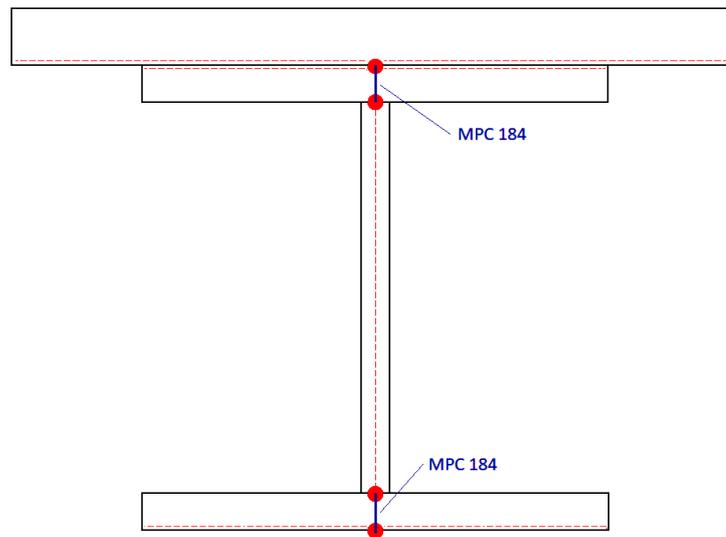


**Fonte:** Da própria autora

Nota-se uma boa concordância na rigidez inicial do modelo quando comparada com os resultados das referências utilizadas. No entanto, a carga de colapso obtida de 91 kN é maior que aquela obtida pelas referências utilizadas, da ordem de 85 kN, e maior que o carregamento de plastificação total da seção (88,7 kN) segundo Lenwari, Thepchatri e Albrecht (2005). Tal ocorrência pode ser atribuída às sobreposições de áreas quando atribuídas as espessuras dos elementos da seção transversal na configuração ilustrada na Figura 4.6.

Visando eliminar esse tipo de interferência no modelo, optou-se por alterar a geometria do modelo de modo que não haja sobreposição de áreas, conforme pode ser visto na Figura 4.8, mas de modo que haja a compatibilização ente os deslocamentos dos nós da extremidade da alma com as mesas.

**Figura 4.8 – Posição dos planos dos nós dos elementos de casca e aplicação do elemento MPC 184 para conexão entre mesas e alma**



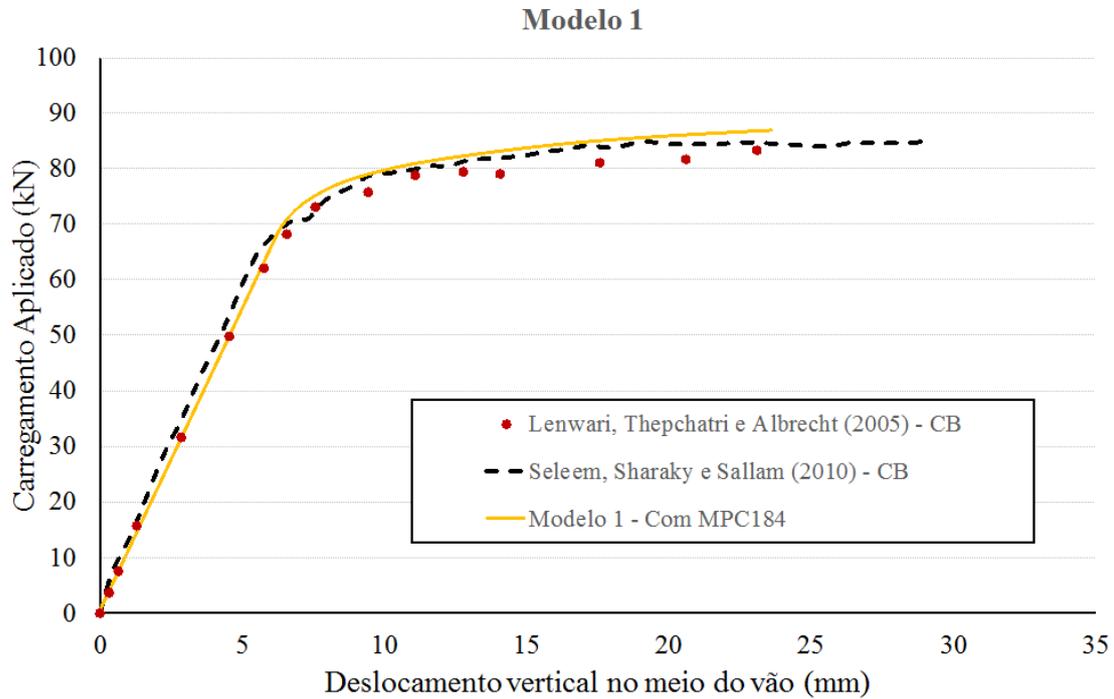
**Fonte:** Da própria autora

Para realizar a conexão dos nós de coordenadas coincidentes horizontalmente entre a alma e as mesas do perfil, utilizou-se o elemento de restrição multiponto denominado MPC184.

Conforme descrição apresentada na biblioteca do ANSYS, o MPC184 é um elemento que abrange uma classe geral de elementos de restrição multiponto que aplicam restrições cinemáticas entre nós. Podendo ser utilizado como um vínculo rígido para modelar uma restrição rígida entre dois corpos deformáveis ou como um componente rígido usado para transmitir forças e momentos.

No presente modelo, o elemento é utilizado como um componente rígido com suas restrições cinemáticas impostas via multiplicadores de Lagrange, onde todos os graus de liberdade são mantidos. A Figura 4.9 apresenta os resultados obtidos, no ponto central do vão na face inferior da mesa inferior, com as alterações realizadas.

**Figura 4.9 - Resultados Modelo 1 com MPC184**



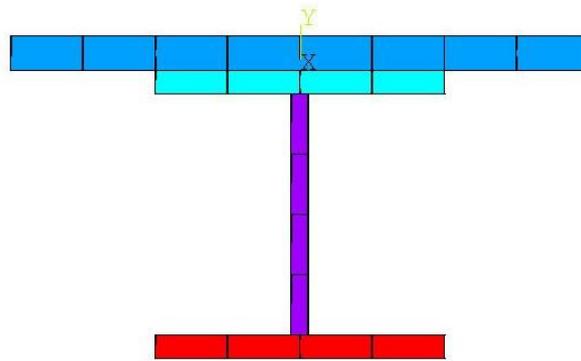
Fonte: Da própria autora

É possível observar que o modelo apresentou resultados mais próximos daqueles obtidos por Lenwari, Thepchatri e Albrecht (2005).

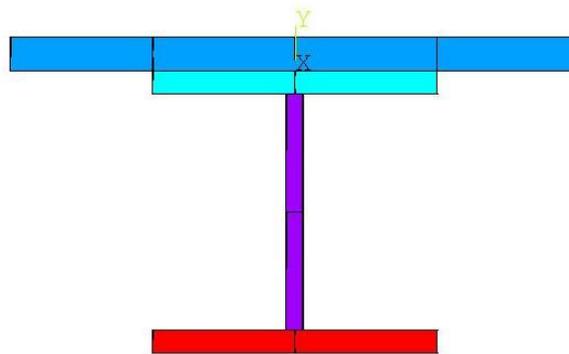
Em relação à carga máxima resistida, o modelo com MPC184 alcançou a carga de 87 kN, bastante próxima do carregamento de plastificação total da seção (88,7 kN) e, portanto, a estratégia mostrou-se adequada.

Definida a configuração dos elementos finitos do modelo numérico, iniciou-se testes com diferentes tamanhos de discretização da malha, visando definir um tamanho que seja eficiente para a modelagem. Para isso, foram realizados testes com malhas de 25 mm, 50 mm e 100 mm tanto na seção transversal, quanto na direção longitudinal do perfil. A Figura 4.10 representa o perfil de aço com dois diferentes tamanhos de malha para a seção transversal.

Figura 4.10 - Perfil de aço com malhas de (a) 25 mm (b) 50 mm



(a)

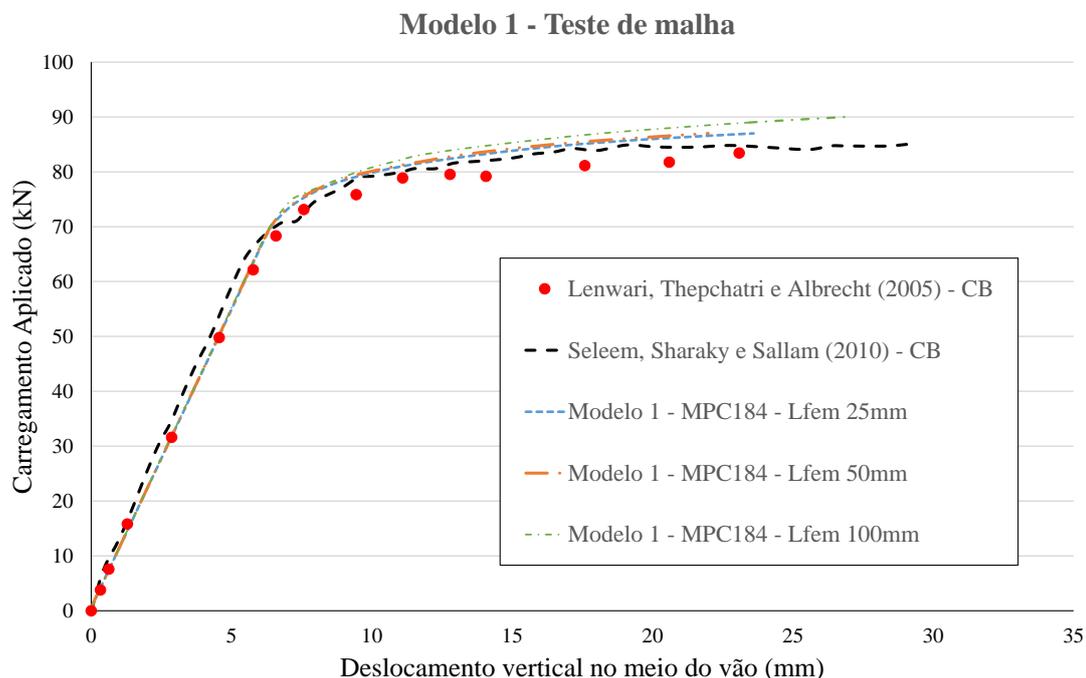


(b)

Fonte: Ansys 18.2 (2017)

Os resultados das diferentes simulações para teste de malha, para ponto central do vão na face inferior da mesa inferior, estão apresentados na Figura 4.11.

**Figura 4.11 - Resultados Modelo 1 para o teste de malha**



**Fonte:** Da própria autora

Para as malhas testadas os resultados obtidos se aproximam de forma satisfatória dos resultados experimentais de Lenwari, Thepchatri e Albrecht (2005).

Nota-se que as malhas de 25 mm e 50 mm têm melhor aproximação, e apresentam respostas muito semelhantes entre elas. Observado isto, optou-se por utilizar a malha de 25 mm para prosseguimento das análises, por ser uma malha que apresenta convergência de resultados e boa quantidade de discretização para os elementos do perfil.

Definido o modelo final da viga de referência (Modelo 1), quanto aos elementos finitos e tamanho da malha, deu-se início a modelagem do reforço da viga com o laminado de PRFC, sendo apresentadas a seguir.

#### **4.3.2 Modelo 2 – Viga de aço com reforço de PRFC – modelo com interação total entre a viga de aço e o reforço**

O segundo modelo é referente à adição do reforço de PRFC a mesma seção transversal da viga de aço do modelo 1. Com a definição do modelo para a seção transversal da viga de aço, deu-se início as estratégias de modelagem para a adição do reforço da mesa inferior com o laminado de PRFC.

Como já mencionando, o elemento SHELL181 apresenta como uma de suas características a possibilidade do uso de múltiplas camadas dentro de um mesmo elemento, permitindo a determinação de diferentes espessuras e propriedades materiais, possibilitando a simulação da camada adesiva e da camada do laminado de PRFC. Assim, essa é a primeira estratégia de modelagem para a viga de aço reforçada com PRFC, considerando interação total entre a viga de aço e o reforço.

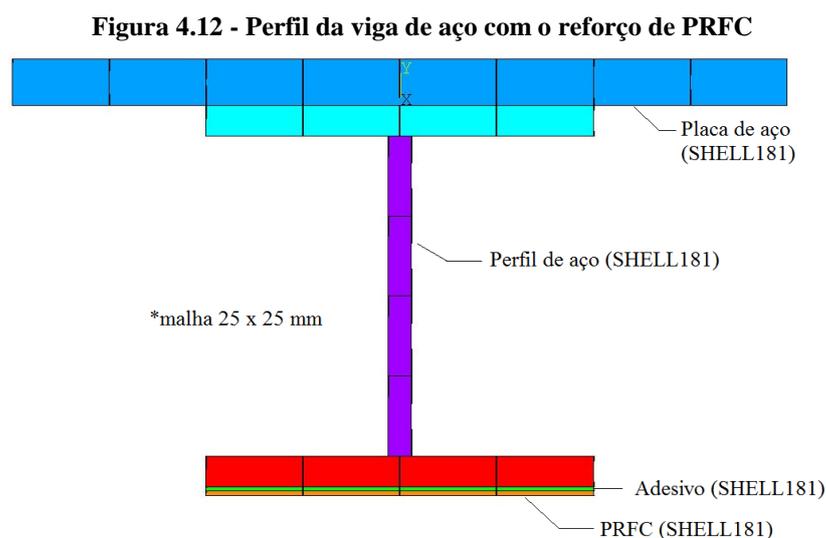
O laminado utilizado para a realização do reforço foi o Sika CarboDur H514, com propriedades geométricas e materiais utilizadas para sua representação, já apresentadas na Tabela 3.2.

O adesivo utilizado para a ligação das laminas a viga de aço foi o epóxi de duas partes da marca SikaDur 30, com uma camada de 1 mm de espessura, e módulo de elasticidade de 11,2 GPa.

O comportamento do sistema de reforço com PRFC foi considerado linear ortotrópico, e utilizado um critério de falha com dano por máxima deformação, tanto para o adesivo quanto para o laminado de PRFC.

Conforme já mencionado por Lenwari, Thepchatri e Albrecht (2005), diferentes comprimentos de reforço foram adotados para as verificações.

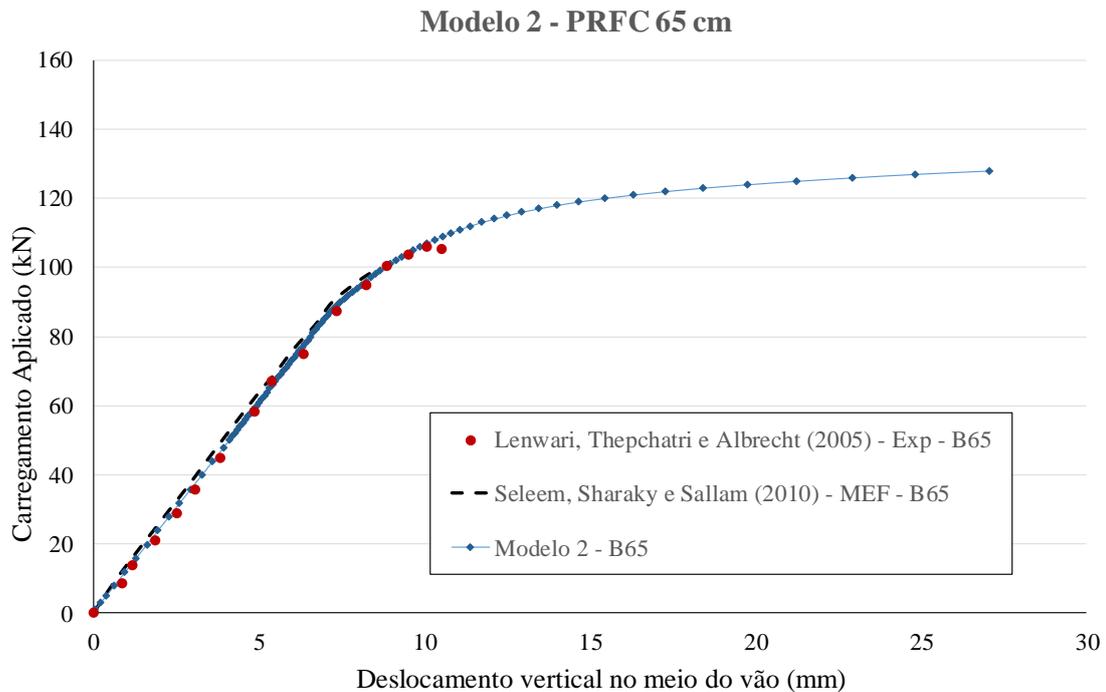
Na Figura 4.12 é apresentado o perfil da viga de aço, do adesivo e do laminado de PRFC.



**Fonte:** Da própria autora

Na Figura 4.13 são apresentados os resultados dos deslocamentos no meio do vão para o modelo 2 com o comprimento do reforço de 65 cm, bem como os resultados experimentais e numéricos dos outros pesquisadores.

**Figura 4.13 - Resultados Modelo 2 com PRFC de 65 cm**



**Fonte:** Da própria autora

O modelo 2 resultou em carga máxima de 128 kN com um deslocamento vertical de 27 mm, e o resultado experimental obtido para a carga máxima de resistência foi de 105 kN com deslocamento vertical de 10,5 mm. Enquanto a simulação de Seleem, Sharaky e Sallam (2010) resultou em carga máxima de 98,6 kN com deslocamento vertical de 8,4 mm.

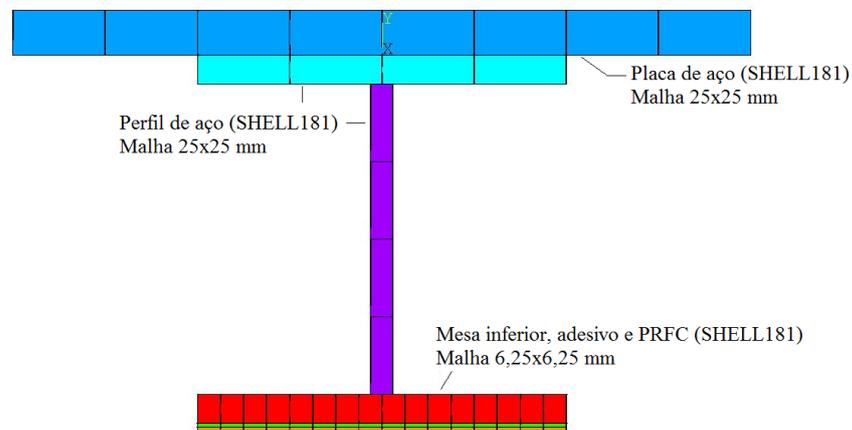
O resultado da carga máxima do modelo 2 foi aproximadamente 18% superior ao valor experimental, e 23% com relação ao modelo numérico de Seleem, Sharaky e Sallam (2010). Com relação ao deslocamento vertical no meio do vão, o modelo 2 apresentou resposta de aproximadamente 61% superior ao modelo experimental, e 69% em comparação ao modelo numérico.

Segundo Lenwari, Thepchatri e Albrecht (2005), neste caso, o pequeno aumento na resistência da viga após a adição do reforço está associado ao modo de falha resultante na estrutura, que se deu por deslocamento da extremidade do laminado.

A divergência dos resultados obtidos com o modelo 2 em relação aos resultados das referências utilizadas pode ser justificada com uma limitação do modelo em apontar o momento de ocorrência da falha viga, visto que, o modelo não possui elementos de interface, não sendo capaz de simular o processo de descolamento de extremidade.

Para uma possível melhoria de resultados, foi adotado um refinamento da malha do reforço e da porção da mesa inferior em contato com o mesmo. A redução foi em  $\frac{1}{4}$  do tamanho da malha inicial, resultando em uma discretização de 6,25 mm, e está representada na Figura 4.14.

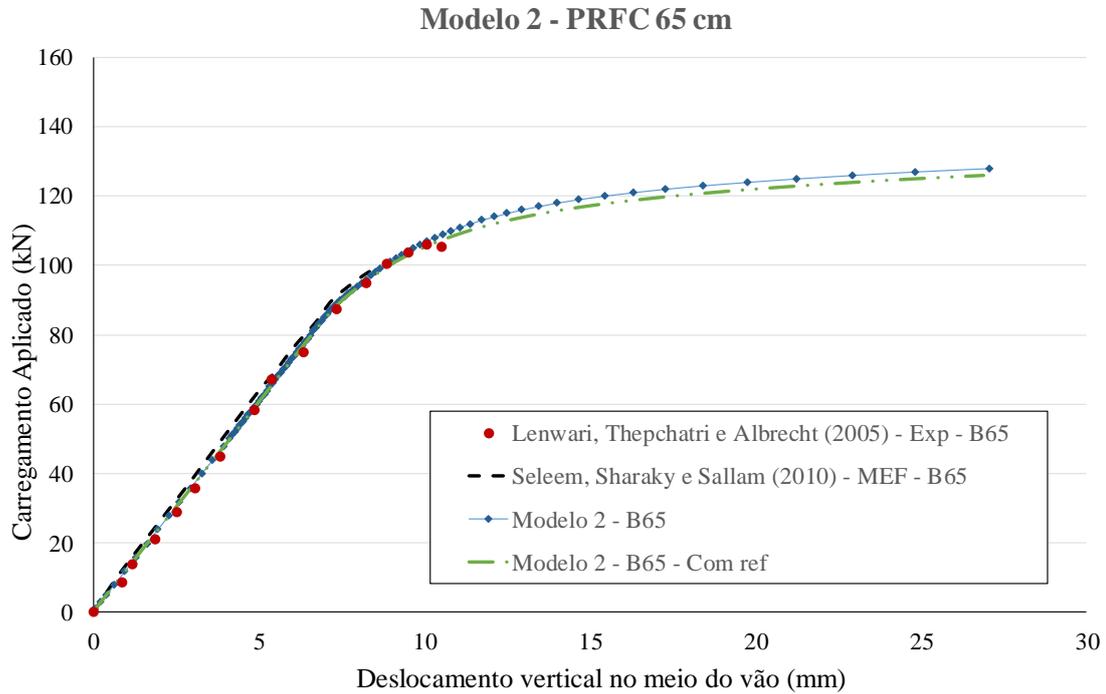
**Figura 4.14 - Perfil viga de aço com o reforço de PRFC e refinamento da malha**



**Fonte:** Ansys (2017)

Os resultados obtidos com o refinamento parcial do modelo 2 é apresentado na Figura 4.15, juntamente com os valores de comparação.

**Figura 4.15 - Resultados Modelo 2 com PRFC de 65 cm e refinamento da malha**

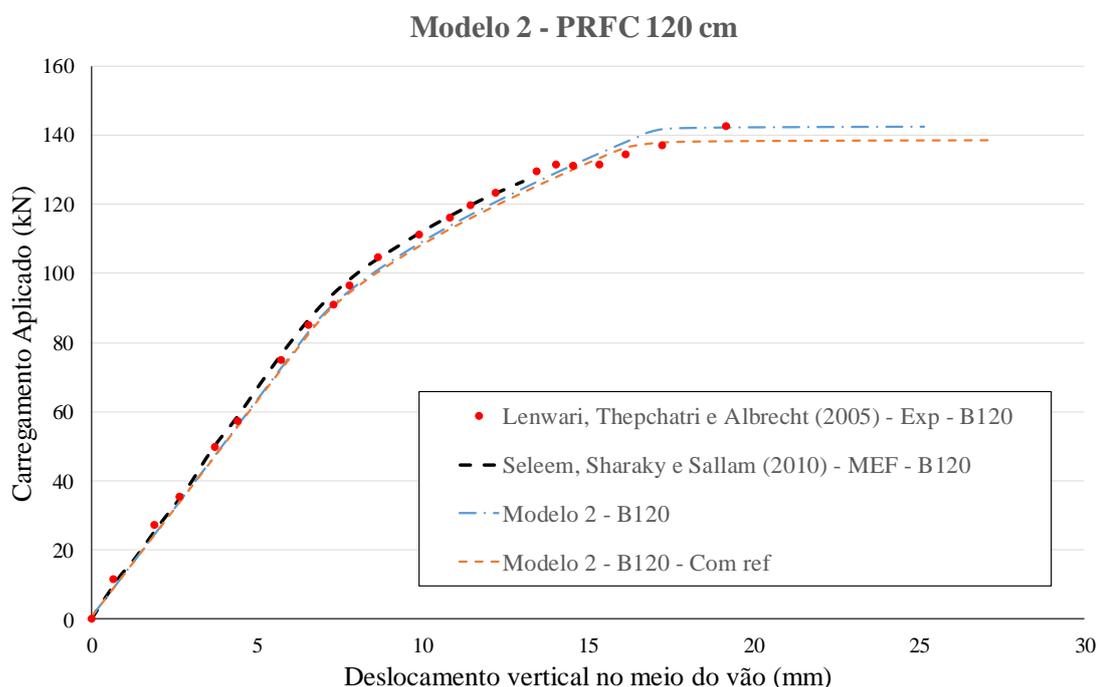


**Fonte:** Da própria autora

O modelo 2 com o refinamento da malha inferior alcançou carga máxima de 126 kN com deslocamento vertical de 26,8 mm. Valores muito próximos aos valores sem o refinamento, porém quando comparada à curva dos modelos com a curva do resultado experimental, o modelo com refinamento de malha apresenta, mesmo que pequena, melhor convergência. Quanto ao modo de falha, a estratégia não resultou em melhorias.

A simulação da viga com o reforço de 120 cm também foi realizada, e seus resultados de carga máxima e deslocamentos no meio do vão são apresentados na Figura 4.16. Assim como realizado para o reforço de 65 cm, a malha da mesa inferior e do reforço também foi simulada com o refinamento da malha em  $\frac{1}{4}$  do seu tamanho inicial.

**Figura 4.16 - Resultados Modelo 2 com PRFC de 120 cm**



**Fonte:** Da própria autora

O modelo 2 sem o refinamento da malha inferior resultou em uma carga máxima de 142,5 kN com um deslocamento vertical de 25,1 mm, enquanto o modelo 2 com o refinamento da malha inferior alcançou carga máxima de 138,5 kN com deslocamento vertical de 27,3 mm. O resultado experimental obtido para a carga máxima de resistência foi de 142,7 kN com deslocamento vertical de 19,2 mm. Enquanto a simulação de Seleem, Sharaky e Sallam (2010) resultou em carga máxima de 126,6 kN com deslocamento vertical de 13 mm.

Segundo o estudo de Seleem, Sharaky e Sallam (2010), para comprimentos maiores de reforço, que possuem suas extremidades situadas em regiões de menor solicitação, o laminado consegue atingir sua capacidade de resistência máxima, levando a viga a falhar pela ruptura a tração do reforço. O modelo 2 mostrou-se eficiente para a previsão desse tipo de falha, resultando em valores satisfatórios quando comparados aos obtidos pelos autores.

Ainda de acordo com Seleem, Sharaky e Sallam (2010), para laminados que possuem suas extremidades situadas em regiões com maior concentração de tensões, o modo de falha ocorre de outra forma, com o descolamento da extremidade, o que é o caso do reforço com 65 mm de comprimento. Como já exposto, o modelo 2 não apresenta a eficiência para a detecção desse tipo de falha, levando a resultados de carga de resistências elevadas, o que não condiz com a realidade apresentada no estudo experimental.

Essa limitação pode ser atribuída ao fato do modelo 2 não possuir a representação de interface entre os materiais aço, adesivo e laminado de PRFC, responsável por simular a falha por descolamento.

Sendo assim, criou-se uma nova estratégia de modelagem, que permite a simulação do descolamento entre as interfaces.

#### **4.3.3 Modelo 3 - Viga de aço com reforço de PRFC – modelo com elementos de interface**

O terceiro modelo é referente à adição do reforço de PRFC à mesma seção transversal da viga de aço do modelo 1, com a inclusão de um elemento de interface com capacidade para simular o comportamento de descolamento das interfaces do sistema de reforço, isto é, interface aço/adesivo e adesivo/PRFC. Por se tratar de um elemento concebido para união com elementos do tipo sólido, para geração automatizada com o ANSYS houve a necessidade de se utilizar o elemento finito SOLSH190 para simulação do adesivo e do reforço de PRFC.

O elemento de interface utilizado no modelo foi o INTER205, com suas características básicas já apresentadas. Por ser um elemento que simula a interface entre diferentes elementos, é necessário que se determine o comportamento constitutivo dessa ligação, isso se dá por meio da determinação de um modelo de zona de coesão (MZC).

Dentre as pesquisas realizadas sobre o assunto, podem ser citadas as realizadas por Fernando (2010), Fawzia, Zhao e Al-Mahaidi (2010) e Yu, Chiew e Lee (2011), que apontam a importância de um modelo de zona de coesão para a representação adequada do comportamento de perda de aderência entre as interfaces.

No presente modelo, optou-se por utilizar um modelo simplificado de zona de coesão, o modelo exponencial disponível no ANSYS, relacionando três parâmetros: a máxima normal de tração na interface (C1), o valor de separação normal por meio da interface em que a máxima tração normal é alcançada (C2) e a separação de cisalhamento em que a tração máxima de cisalhamento é atingida (C3).

A determinação dos valores de entrada para os parâmetros citados se deu com base na ficha técnica do fabricante do adesivo SikaDur 30 (2017) e na pesquisa realizada por Fawzia, Zhao e Al-Mahaidi (2010), sendo estes apresentados na Tabela 4.3.

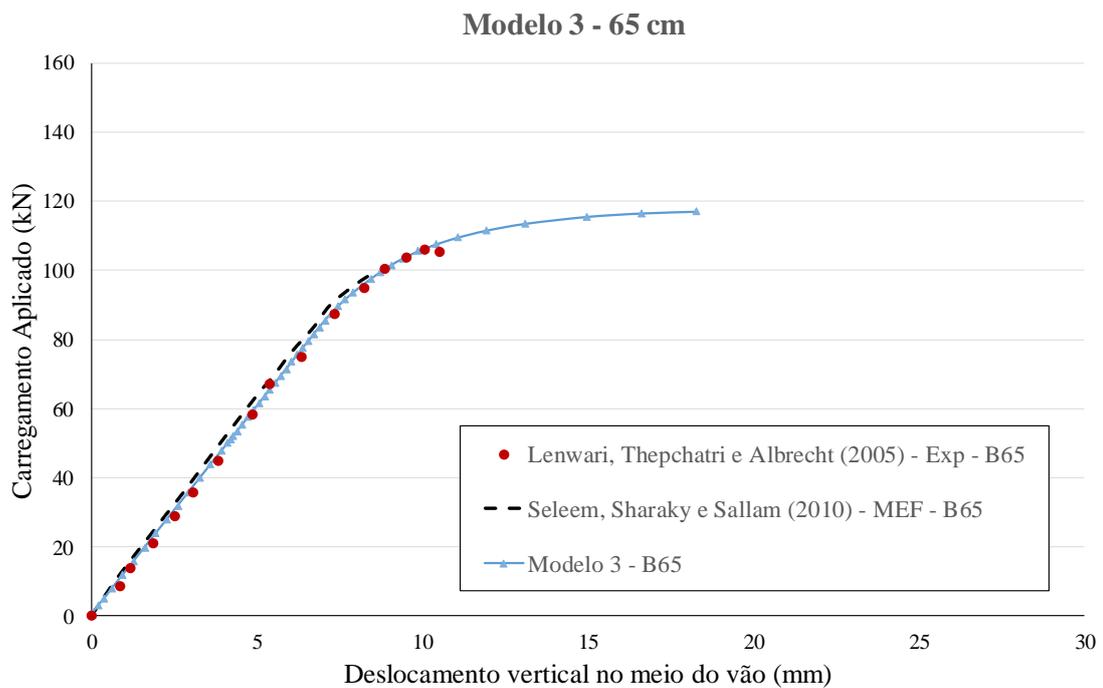
**Tabela 4.3 - Dados de entrada para o modelo de coesão**

Dados	Valores de entrada	Fonte
C1	21 MPa	SikaDur 30 (2017)
C2	0,04 mm	Fawzia et al.
C3	0,04 mm	(2010)

Fonte: Da própria autora

O critério de falha com dano por máxima deformação continuou sendo utilizado para o laminado de PRFC. Novamente, o acoplamento entre as mesas e a alma se deu por meio do elemento MPC184.

Na Figura 4.17 são apresentados os resultados obtidos com o modelo 3 para o laminado de 65 cm de comprimento, junto com os resultados de comparação.

**Figura 4.17 - Resultados Modelo 3 com PRFC de 65 cm**

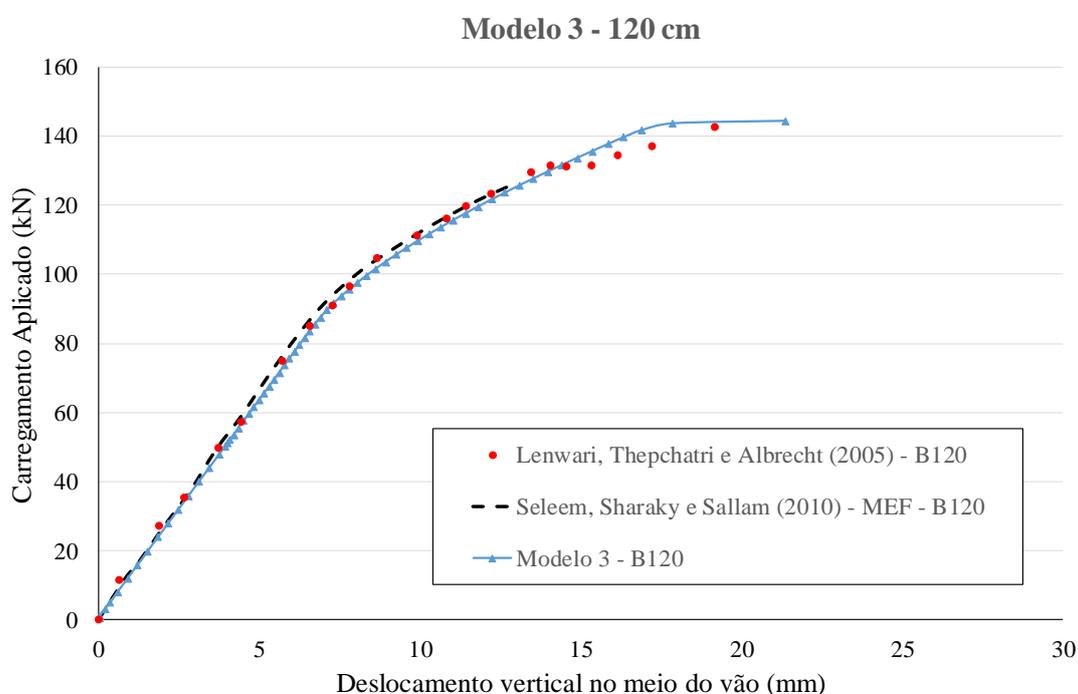
Fonte: Da própria autora.

A curva obtida para o modelo 3 apresenta boa concordância com as curvas de comparação até seus pontos de carregamentos máximos. O modelo resultou em um carregamento máximo de 117 kN com um deslocamento de aproximadamente 18 mm, o que são valores aceitáveis quando comparados ao modelo experimental, que apresenta carregamento máximo de 105 kN com um deslocamento de aproximadamente 10,5 mm.

Quando analisada a melhoria na capacidade de resistência da viga após o reforço, observa-se o aumento de aproximadamente 25,6% no valor da capacidade de carga, e redução de cerca de 22,6% no deslocamento vertical, quando se compara a viga controle (Modelo 1) com a viga reforçada com laminado de PRFC de 65 cm. Valores estes, coerentes aos obtidos no estudo experimental de Lenwari, Thepchatri e Albrecht (2005) e numérico de Seleem, Sharaky e Sallam (2010).

Na Figura 4.18 são apresentados os resultados obtidos com o modelo 3 para o laminado de 120 mm de comprimento, junto com os resultados de comparação.

**Figura 4.18 - Resultados Modelo 3 com PRFC de 120 cm**



**Fonte:** Da própria autora.

A curva obtida para o modelo 3 apresenta boa concordância com os resultados das referências utilizados até seus pontos de carregamentos máximos. O modelo resultou em um carregamento máximo de 144,2 kN com um deslocamento de aproximadamente 21,3 mm, o que são valores aceitáveis quando comparados ao modelo experimental, que apresenta carregamento máximo de 142,7 kN com um deslocamento de aproximadamente 19,2 mm.

Quando tratado da melhoria na capacidade de resistência da viga após o reforço, observa-se o aumento de aproximadamente 39,6% no valor da capacidade de carga, e redução de cerca de 10% no deslocamento vertical, quando comparada a viga controle com a viga

reforçada com laminado de PRFC de 120 cm. Valores estes, coerentes aos obtidos no estudo experimental de Lenwari, Thepchatri e Albrecht (2005) e numérico de Seleem, Sharaky e Sallam (2010).

Quando comparado ao Modelo 2, os resultados obtidos com o Modelo 3 para o comprimento de reforço de 65 cm mostram eficiência em detectar o descolamento do reforço, isso fica evidenciado com a melhoria da carga de colapso em aproximadamente 7% e da redução significativa do deslocamento em aproximadamente 33%.

#### 4.4 VIGAS DE NARMASHIRI, SULONG E JUMAAT (2012)

Com a definição das características do Modelo 3 do item anterior, foram simuladas também as vigas ensaiadas por Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012), sendo estas, um grupo vigas de aço reforçadas com o PRFC. O esquema geral de ensaio e as dimensões da viga de aço em questão foram apresentados na Figura 3.3 e Figura 3.4, respectivamente.

As dimensões das vigas de aço são iguais para todas as amostras, sendo utilizada uma viga controle sem reforço denominada de  $F_1$ . Os tipos e dimensões do reforço de PRFC foram variados para cada viga reforçada.

No presente trabalho foram consideradas as vigas reforçadas com PRFC de alta resistência à tração com 50 mm de largura, sendo cinco delas com espessura fixa de 1,2 mm e comprimentos variados de 600 mm, 1000 mm, 1500 mm, 1700 mm e 1800 mm, denominadas respectivamente por  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $F_4$ ,  $F_5$  e  $F_6$ . O restante é configurado com comprimento fixo de 1500 mm para o reforço, e variação das espessuras em 1,4 mm e 2 mm, denominadas respectivamente por  $F_7$  e  $F_8$ .

A Tabela 4.4 apresenta de forma resumida as diferentes configurações de reforço para as vigas.

**Tabela 4.4 - Propriedades geométricas do PRFC**

<b>Viga</b>	<b>Comprimento do reforço (mm)</b>	<b>Espessura do PRFC (mm)</b>
F2	600	1,2
F3	1000	1,2
F4	1500	1,2
F5	1700	1,2
F6	1800	1,2
F7	1500	1,4
F8	1500	2

**Fonte:** Da própria autora

A seção da viga de aço foi modelada como um material elastoplástico perfeito, com resistência ao escoamento de 370 MPa. Assim como na referência utilizada, as propriedades do material do laminado de PRFC foram definidas como lineares e ortotrópicas, e o adesivo foi definido como material elastoplástico perfeito.

O adesivo utilizado é de propriedades iguais ao SikaDur 30, com espessura de camada de 1 mm e propriedades materiais já apresentadas. O reforço de PRFC tem suas propriedades materiais apresentadas na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5 - Propriedades materiais do PRFC**

<b>Tipo de PRFC</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	<b>Resistência a Tração (MPa)</b>	<b>Deformação Última (%)</b>
Alto Módulo	160	2800	1,7

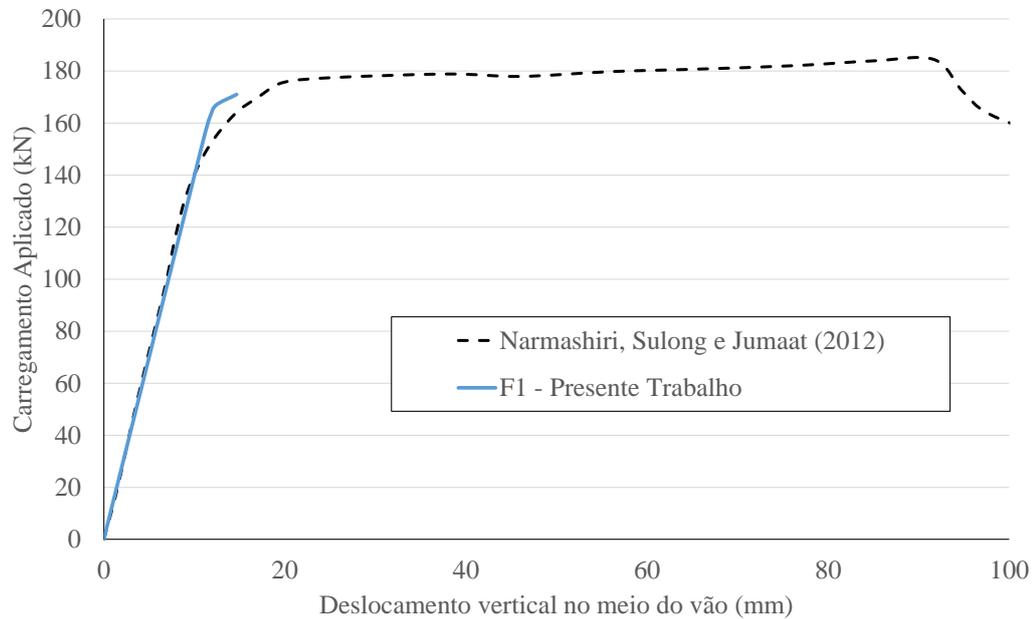
**Fonte:** Adaptado de Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012)

Dentre as combinações mencionadas, os testes experimentais foram realizados apenas nas amostras F<sub>1</sub>, F<sub>4</sub>, F<sub>5</sub>, F<sub>6</sub>, F<sub>7</sub>. As simulações numéricas foram realizadas para todas as configurações de reforço mencionadas.

Os resultados obtidos para cargas e deslocamentos com a simulação da viga sem reforço F1 é apresentado na Figura 4.19, juntamente com os resultados experimentais de Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012).

**Figura 4.19 - Resultados viga controle F1**

Viga controle - F1

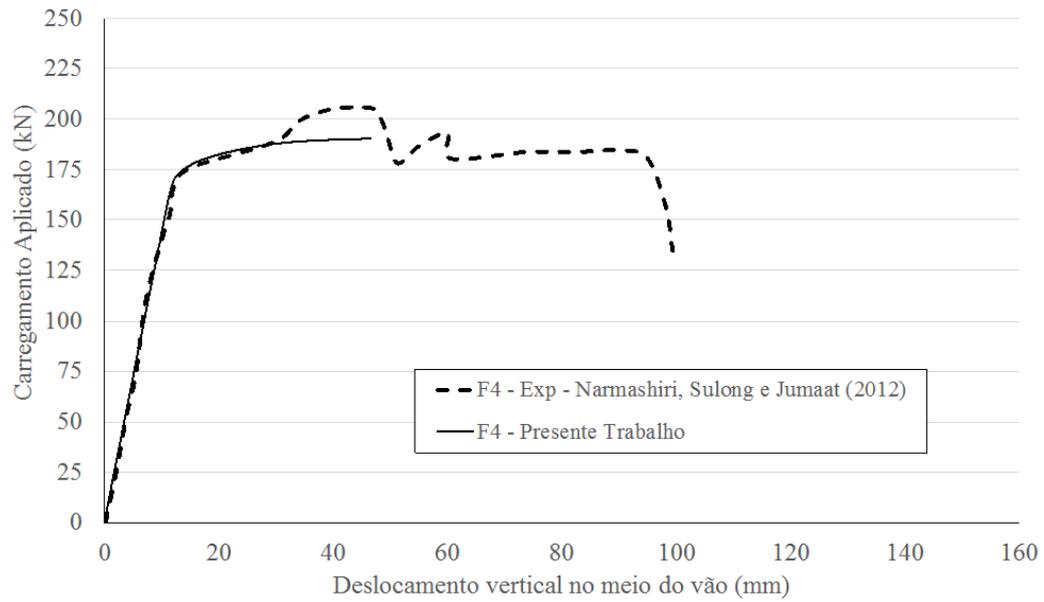
**Fonte:** Da própria autora

Por meio dos resultados é possível perceber a existência de boa concordância entre os resultados para a região elástica da curva. O presente trabalho alcançou a carga última de 171 kN, praticamente coincidente com o resultado numérico de Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012) de 170,93 kN e próximo à carga de colapso experimental, da ordem de 180 kN. Porém, apresentou um comportamento mais rígido quando comparado ao resultado experimental.

As Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 apresentam um comparativo de carga-deslocamento vertical para os resultados do modelo 3 e resultados experimentais das vigas F4, F5 e F6, respectivamente.

**Figura 4.20 - Resultados da viga F4**

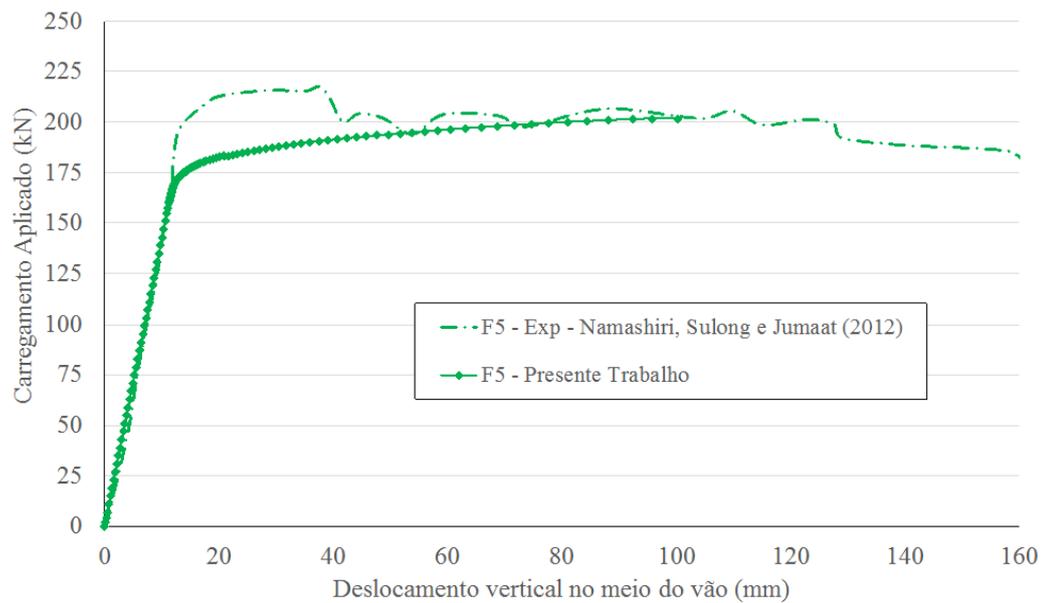
Viga com reforço de PRFC - F4



Fonte: Da própria autora

**Figura 4.21 - Resultados da viga F5**

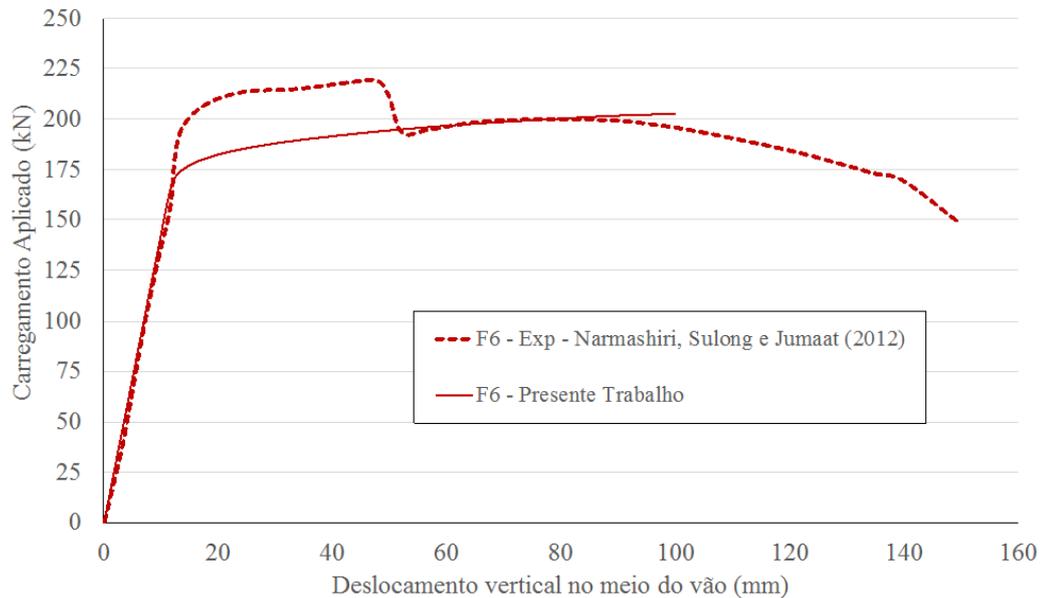
Viga com reforço de PRFC - F5



Fonte: Da própria autora

**Figura 4.22 - Resultados da viga F6**

Viga com reforço de PRFC - F6

**Fonte:** Da própria autora

Quando analisada a eficiência do modelo 3 para este caso, as curvas mostram resultados convergentes para a curva da viga F4. Apesar de não se alcançar com precisão a carga de colapso para as vigas F5 e F6, o modelo apresentou rigidez adequada no trecho elástico e ductilidade proporcional aos resultados dos ensaios, o que é bastante satisfatório.

Os resultados obtidos para a capacidade de carga com a simulação das vigas com reforço são apresentados na Tabela 4.6, juntamente com os valores de simulação numérica e ensaios experimentais de Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012). Vale ressaltar que a referência mencionada não apresenta as curvas deslocamento no meio do vão x força aplicada, apenas as cargas de colapso para as vigas ensaiadas.

Ainda na Tabela 4.6, são apresentados, nas duas últimas colunas, o erro percentual entre os valores de capacidade de carga do presente trabalho e os valores de simulação numérica e ensaios experimentais de Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012).

Tabela 4.6 - Especificações e capacidade de resistência das vigas analisadas

Viga	Comprimento do reforço (mm)	Espessura do PRFC (mm)	Carga de colapso (kN)				
			Experimental	Numérico		Erro	
			Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012)	Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012)	Presente Trabalho	Exp. (%)	Num. (%)
F1	N/A	N/A	184,88	170,93	171,00	8,12	0,04
F2	600	1,2	N/A	180,13	178,55	-	0,88
F3	1000	1,2	N/A	186,52	188,25	-	0,92
F4	1500	1,2	206,24	191,13	190,28	8,39	0,45
F5	1700	1,2	217,77	203,8	201,79	7,92	1,00
F6	1800	1,2	219,19	206,6	202,36	8,32	2,10
F7	1500	1,4	222,5	210,01	203,55	9,31	3,17
F8	1500	2	N/A	223,72	213,03	-	5,02

N/A – Não aplicável

Fonte: Da própria autora

Os resultados apresentados na Tabela 4.6 mostram que o modelo 3 do presente trabalho se mostrou eficiente ao simular o comportamento quanto a capacidade de cargas das amostras, apresentando valores em média 8% menores quando comparados ao estudo experimental, e valores muito próximos quando comparados ao estudo numérico, com a maior divergência de valores na ordem de 5%.

A Tabela 4.7 apresenta os valores, em porcentagem, quanto ao aumento na capacidade de resistência com a realização da aplicação do reforço nas vigas F<sub>2</sub>, F<sub>3</sub>, F<sub>4</sub>, F<sub>5</sub>, F<sub>6</sub>, F<sub>7</sub> e F<sub>8</sub> quando comparadas a viga sem reforço F<sub>1</sub>.

**Tabela 4.7 - Especificações e aumento na capacidade de resistência das vigas reforçadas com PRFC**

Viga	Aumento de resistência (%)				
	Comprimento do reforço (mm)	Espessura do PRFC (mm)	Experimental		Presente Trabalho
			Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012)	Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012)	
F1	N/A	N/A	-	-	-
F2	600	1,2	-	5,1	4,2
F3	1000	1,2	-	8,4	9,2
F4	1500	1,2	10,4	10,6	10,1
F5	1700	1,2	15,1	16,1	15,3
F6	1800	1,2	15,7	17,3	15,5
F7	1500	1,4	-	18,6	16,0
F8	1500	2	-	23,6	19,7

N/A – Não aplicável

**Fonte:** Da própria autora

Assim como observado no caso anterior, para uma mesma espessura de PRFC, os comprimentos mais longos resultam em maior capacidade de carga.

Quando comparado os resultados do presente trabalho para a viga F1 com a viga F6, esse aumento de resistência chega a 15,5%. Diferentemente da viga F2 que atinge aumento de aproximadamente apenas 4,2%. Porém, se comparado as vigas F5 e F6, nota-se que com um aumento de 100 mm no comprimento, resulta em acréscimo próximo de 1% na capacidade de carga. Ou seja, a partir de determinado comprimento, o ganho no desempenho estrutural passa a ser relativamente insignificante.

O exposto acima condiz com o apresentado por Narmashiri, Sulong e Jumaat (2012), em que afirma-se que ao aumentar o comprimento do laminado de PRFC até um comprimento eficiente, a capacidade de carga das vigas de aço aumentou. Para comprimentos além disso, não há ganho na capacidade de carga.

Com relação aos efeitos da espessura do PRFC, os resultados indicam que o uso do laminado de 2 mm aumentou a capacidade de carga em aproximadamente 20% quando comparado a F1. Quando comparado com a viga F7 com a F4, um aumento de 0,2 mm na espessura do PRFC levou ao incremento de 8% na capacidade de carga. Analisando os resultados de F8 em relação a F4, um aumento de 0,6 mm na espessura do laminado levou ao incremento de 13% na capacidade de carga.

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS E CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foram desenvolvidas e avaliadas estratégias de modelagem numérica para simulação do comportamento de vigas de aço de seção I reforçadas à flexão com laminado de PRFC para obtenção da capacidade de carga. Para validação dos modelos desenvolvidos, os resultados foram comparados a estudo experimentais e numéricos existentes na literatura.

O uso do elemento de casca SHELL181 para modelagem da viga de aço difere das principais estratégias de modelagem encontradas na literatura para simulação de vigas de aço reforçadas com PRFC, que empregam elementos do tipo sólido para viga de aço e para o reforço. A estratégia utilizada se mostrou adequada para simular o comportamento das vigas, apresentando resultados coerentes para a capacidade máxima de carga e deslocamentos no meio do vão.

Quando utilizado para simulação da camada adesiva e do reforço de PRFC, esse elemento de casca mostrou-se eficiente em situações com uso de laminados com comprimentos que possuem suas extremidades situadas em regiões de menor solicitação e apresentam seu modo de falha governado pela capacidade de atingir a resistência máxima do laminado, acarretando na ruptura à tração do mesmo no meio do vão.

Para as situações em que as extremidades do laminado estão posicionadas em regiões de maior solicitação e possuem seu modo de falha governado pelo descolamento da extremidade do reforço, o uso do elemento de casca SHELL181 com camadas de adesivo e de PRFC e interação total entre a viga de aço e o adesivo e entre o adesivo e o PRFC apresentou limitações quanto à capacidade de simular a falha na ligação, levando a resultados não coerentes com os resultados de comparação.

O uso de um elemento de interface com modelo de zona de coesão exponencial para a simulação de falhas na ligação se mostrou eficiente, apresentando resultados com boa representatividade com os valores de comparação.

As simulações realizadas com variação de comprimentos do laminado de PRFC mostraram a influência desse parâmetro no modo de falha da viga quanto ao alcance total da capacidade de resistência. A aplicação de laminados de PRFC mais curtos levou ao

descolamento prematuro da extremidade e a aplicação de laminados mais longos resultou em maior resistência contra o descolamento da extremidade.

Quando analisada a variação de espessuras, os laminados mais espessos aumentaram a capacidade de carga da viga. Para as espessuras utilizadas nas análises, o acréscimo na capacidade de carga da viga apresenta valores significativos.

A estratégia numérica de modelagem proposta neste trabalho, principalmente com o uso de elementos de interface, se mostrou eficiente ao prever rigidez, a capacidade de carga e os deslocamentos do elemento estrutural. E, por fim, é possível concluir que, em comparação a resultados presentes na literatura, os modelos computacionais alcançaram resultados com adequada aproximação dos valores experimentais e de outros modelos numéricos das referências utilizadas.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em âmbito nacional, as pesquisas relacionadas ao reforço de estruturas de aço com PRFC, especialmente vigas de aço reforçadas com PRFC, são praticamente inexistentes. Diante disso, a seguir são apresentados alguns tópicos importantes a serem investigados em pesquisas futuras, envolvendo o reforço de vigas de aço:

1. Avaliação de metodologias analíticas disponíveis para o cálculo do reforço de vigas de aço com seção I reforçadas com PRFC;
2. Estudo da influência do reforço nos modos de instabilidade global (FLT) e local (FLA e FLM);
3. Estudo do reforço de vigas de aço com PRFC para efeitos de força cortante;
4. Estender a análise do reforço com PRFC para vigas de aço com outros tipos de perfis, como seções U ou seções I em perfis formados a frio ou seções compostas;
5. Estudo de metodologias analíticas e numéricas de vigas mistas de aço e concreto reforçadas com PRFC e avaliação das respectivas metodologias disponíveis;
6. Estudo do comportamento de vigas de aço reforçadas com laminados de PRFC e da influência da preparação da superfície para a eficiência do reforço do PRFC, por meio da realização de ensaios experimentais.

Acredita-se que o aprofundamento do tema seja essencial para um pleno entendimento sobre o comportamento de vigas de aço reforçadas com PRFC.

## REFERÊNCIAS

ANSYS Student, Release 18.2. ANSYS, Inc., 2017.

AOKI, T.; KUBO, M. Steel members. Structural stability design: Steel and composite structures, ed. Fukumoto, Y. Pergamon Press, Elsevier Science Ltd., Oxford, UK.

ARQUEZ, A. P. **Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado.** 2010.242 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800:** Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

AZEVEDO, D. M. M. **Reforço de estruturas de betão com colagem de sistemas compósitos de CFRP - Recomendações para Dimensionamento.** 2008. 238 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.

BANEA, M. D.; DA SILVA, L. F. M. Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. **Journal of materials Design and Applications**, v. 223, n. L, p. 1–18, 2009.

BEBER, A. J.; FILHO, A. C.; CAPAGNOLO, J. L. **Avaliação do desempenho de vigas de concreto armado reforçadas com mantas flexíveis de fibra de carbono.** p. 75-84 Teoria e Prática na Engenharia Civil, nº 2, 2001.

CNR-DT 202/2005. **Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures.** Roma, Itália.

DEMIR H. **Strengthening and repair of steel bridges.** Techniques and managemet. Master of Science Thesis Division of structural Engineering Steel and Timber Structures, Chalmers University of Technology. 2011. Göteborg, Sweden.

DENG, J. ; LEE M.M.K.; MOY S.S.J. Stress analysis of steel beams reinforced with a bonded CFRP plate. **Composite Structures**, v. 65, n. 2, p. 205-215, 2004.

FAWZIA, S. et al. Bond characteristics between CFRP and steel plates in double strap joints. **The International Journal of Advanced Steel Construction**, p. 17-27, 2005.

FAWZIA, S. **Bond characteristics between steel and carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites.** Tese PhD, Departamento de Engenharia Civil, Monash University, 2007, Melbourne, Australia.

FAWZIA, S.; ZHAO, X-L.; AL-MAHAIDI, R. Bond-slip models for double strap joints strengthened by CFRP. **Composite Structures**, 92 (9), p. 2137-2145, 2010.

FERNANDO, D., et al. CFRP strengthening of rectangular steel tubes subjected to end bearing loads: Effect of adhesive properties and finite element modelling. *Thin-Walled Structures*, 47(10), 1020–1028, 2009.

FERNANDO, N. D. **Bond behaviour and debonding failures in CFRP-strengthened steel members**. 2010. 343 p. PhD Thesis, Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong.

FITTON, M. D.; BROUGHTON, J. G. Variable modulus adhesives: An approach to optimised joint performance. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 25, n. 4, p. 329–336, 2005.

HOLLAWAY, L. C.; CADEI, J. Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites. *Progress in Structural Engineering and Materials*, v. 4, n. 2, p. 131–148, 2002.

HOLLAWAY, L. C.; et al. Advances in adhesive joining of carbon fibre / polymer composites to steel members for repair and Rehabilitation of bridge structures. *Advances in Structural Engineering*, v. 9, n. 6, p. 791–803, 2006.

JUVANDES, L. F. P. **Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de “CFRP”**. 1999. 396 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.

KABIR, M. Z.; SEIF, A. E. Lateral-torsional buckling of retrofitted steel I-beams using FRP sheets. *Scientia Iranica*, v. 17, n. 4 A, p. 262–272, 2010.

LENWARI, A.; THEPCHATRI, T.; ALBRECHT, P. Flexural response of steel beams strengthened with partial-length CFRP plates. *Journal of Composites for Construction*. v. 9, n. 4, p. 296-303, 2005.

LINGHOFF, D.; AL-EMRANI, M.; KLIGER, R. Performance of steel beams strengthened with CFRP laminate - Part 1: Laboratory tests. *Composites Part B: Engineering*, v. 41, n. 7, p. 509–515, 2010.

LINGHOFF, D.; AL-EMRANI, M. Performance of steel beams strengthened with CFRP laminate - Part 2: FE analyses. *Composites Part B: Engineering*, v. 41, n. 7, p. 516–522, 2010.

MACHADO, A. P. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibra de carbono**. 120 p. 2011.

MAHERI, M. R.; ADAMS, R. D. Determination of dynamic shear modulus of structural adhesives in thick adherend shear test specimens. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 22, n. 2, p. 119–127, 2002.

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)**. 2008. 332f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Santa Catarina, Florianópolis.

NARMASHIRI, K.; RAMLI SULONG, N. H.; JUMAAT, M. Z. Failure analysis and structural behaviour of CFRP strengthened steel I-beams. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 1–9, maio 2012.

RADOMSKI, W. **Bridge rehabilitation**, London: ICP, 2002.

SALLAM, H. E. M. et al. Evaluation of steel I-beams strengthened by various plating methods. **Advances in Structural Engineering**, v. 9, n. 4, p. 535–544, 2006.

SELEEM, M.H; SHARAKY, I.A.; SALLAM, H.E.M. Flexural behavior of steel beams strengthened by carbon fiber reinforced polymer plates – Three dimensional finite element simulation. **Material and Design**, v. 31, p. 1317-1324, 2010.

SIKA. CarboDur - Lâminas de fibra de carbono para reforço estrutural. 2009. Disponível em: <[www.sika.com.br](http://www.sika.com.br)>. Acesso em: 2018.

SOUZA, V. C. M. de; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 255 p.1 Ed. São Paulo: PINI, 1998.

SOUZA, C. A. S. **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Aço Segundo a NBR 8800:2008**. 2009. Universidade Federal de São Carlos - Departamento de Engenharia Civil, São Carlos.

TAWFIK, Q. H.; KARUNASENA, W. K. Use of CFRP for Rehabilitation of Steel Structures : a Review. **Southern Region Engineering Conference SREC2010**, p. 5, 2010.

TENG, J. G. et al. Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs. **Construction and Building Materials**, v. 17, n. 6–7, p. 447–462, 2003.

TENG, J. G.; YU, T.; FERNANDO, D. Strengthening of steel structures with fiber-reinforced polymer composites. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 78, p. 131–143, 2012.

TEOBALDO, I. **Estudo do Aço como Objeto de Reforço Estrutural em Edificações Antigas**. 2004. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

YU, Y; CHIEW, S.P.; LEE, C.K. Bond failure of steel beams strengthened with FRP laminates – Part 2: Verification. **Composites Part B: Engineering**, v. 42, n. 5, p. 1122-1134, 2011.

ZHAO, X-L. **FRP-Strengthening Metallic Structures**. CRC Press Taylor&Francis Group, Boca Raton, 2014.

ZHAO, X-L.; ZHANG, L. State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures. **Engineering Structures**, v. 29, n. 8, p. 1808–1823, 2007.

## ANEXO A

Metodologias analíticas para o dimensionamento de vigas de aço reforçadas com PRFC.

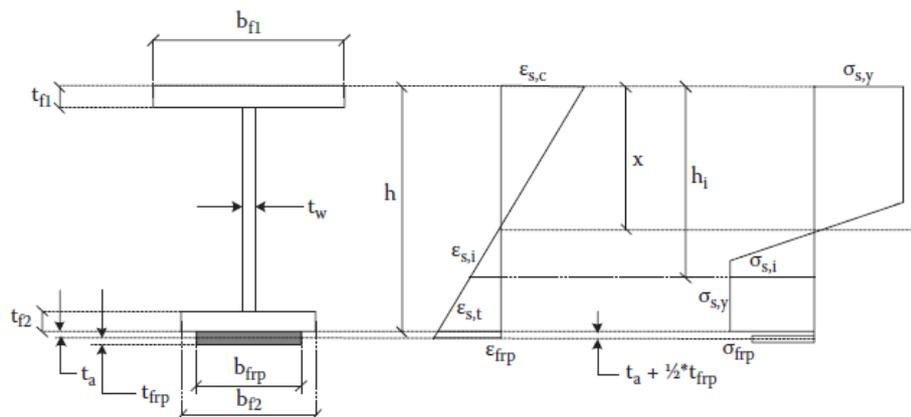
### RESISTÊNCIA À FLEXÃO

#### Modelo do CNR-DT 202/2005

Com base nas diretrizes do guia CNR-DT 202/2005 e em Zhao (2014), apresenta-se a seguir a determinação da resistência de vigas de aço reforçadas com laminados de PRF ligados a face tracionada do elemento.

Inicialmente, para uma adequada compreensão do modelo, apresenta-se a distribuições de tensão e de deformação por toda a seção de uma viga seção I de aço reforçada em PRFC conforme a Figura A.1 na qual  $h$  é a altura total da seção,  $h_i$  é a altura de análise,  $b_i$  e  $b_{frp}$  são a largura da seção na altura de análise e do laminado de PRFC, respectivamente.  $\sigma_{s,i}$  é a tensão na seção de aço na profundidade  $h_i$ ,  $E_{frp}$  é o módulo de elasticidade do PRFC,  $\varepsilon_{frp,d}$  é o valor de projeto da deformação limite do PRFC,  $t_{frp}$  e  $t_a$  são a espessura da camada de PRFC e do adesivo, respectivamente.

Figura A.1 - Seção de aço reforçada com PRFC e sua distribuição de tensões e deformações



Fonte: Zhao (2014)

A tensão na seção de aço na profundidade  $h_i$  pode ser encontrada pelas equações abaixo:

$$\sigma_{s,i} = E_s \varepsilon_{s,i} \quad \text{para,} \quad \left| \varepsilon_{s,i} \right| < \frac{\sigma_{s,i}}{\gamma_s E_s} \quad (\text{A.1})$$

$$\sigma_{s,i} = \frac{\varepsilon_{s,i}}{\left| \varepsilon_{s,i} \right|} \frac{\sigma_{s,y}}{\gamma_s} \quad \text{para,} \quad \left| \varepsilon_{s,i} \right| > \frac{\sigma_{s,i}}{\gamma_s E_s} \quad (\text{A.2})$$

Sendo,

$$\varepsilon_{s,i} = \varepsilon_{frp} \frac{h_i - x}{h + t_a + \frac{t_{frp}}{2} - x} \quad (\text{A.3})$$

As deformações da seção de aço nas faces comprimidas e tracionadas estão relacionadas com a deformação do PRFC, e podem ser calculadas com as equações A.4 e A.5, respectivamente.

$$\varepsilon_{s,c} = \varepsilon_{frp} \frac{-x}{h + t_a + \frac{t_{frp}}{2} - x} \quad (\text{A.4})$$

$$\varepsilon_{s,t} = \varepsilon_{frp} \frac{h - x}{h + t_a + \frac{t_{frp}}{2} - x} \quad (\text{A.5})$$

Como já visto anteriormente, a falha no plano de vigas reforçadas com PRFC ocorre quando o reforço rompe por atingir seu valor limite de deformação de ruptura. Sendo assim, o valor de projeto para a deformação limite do PRFC,  $\varepsilon_{frp,l,d}$  deve primeiro ser determinado de acordo com a equação A.6:

$$\varepsilon_{frp,l,d} = \min(\varepsilon_{frp,rup,d}, \varepsilon_{frp,l,d}) \quad (\text{A.6})$$

Sendo,  $\varepsilon_{frp,rup,d}$  o valor de projeto para a deformação quanto à ruptura à tração do PRFC, dado pela equação A.7,  $\varepsilon_{frp,l,d}$  o valor de projeto para a deformação do PRFC quanto ao

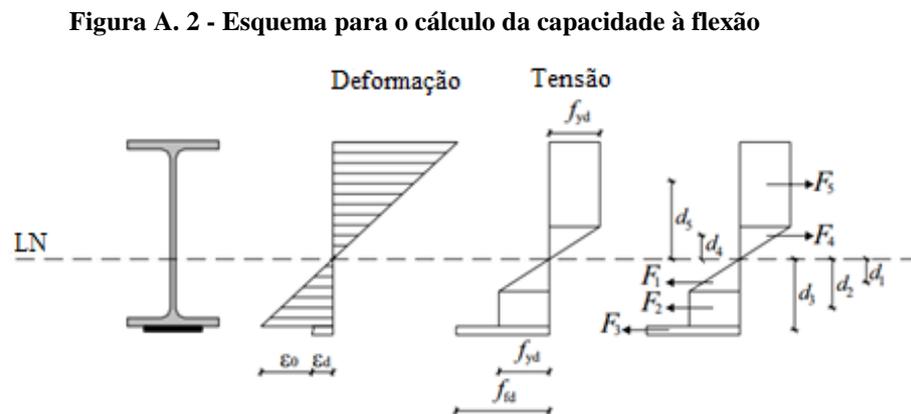
descolamento intermediário, a ser discutido posteriormente, quando do tratamento da falha por descolamento.

$$\varepsilon_{frp,rup,d} = \frac{\sigma_{frp,rup}}{\gamma_{frp} E_{rup}} \quad (A.7)$$

Onde  $\sigma_{frp,rup}$  é o valor característico de resistência à tração do PRFC e  $\gamma_{frp}$  é um fator parcial de segurança para o PRFC.

Para o cálculo do valor de projeto para a capacidade de flexão,  $M_{Rd}$ , deve-se assumir que um dos materiais que compõe a seção transversal atingiu, na fibra extrema da seção transversal, sua capacidade de deformação, conforme especificado anteriormente.

A Figura A. 2 mostra um esquema dos diagramas de deformação e de tensão, para o cálculo da capacidade à flexão da viga.



Fonte: CNR-DT 202/2005

Inicialmente a posição da linha neutra é fixada para que seja estabelecido o estado de deformação na seção transversal, devido à suposição de uma distribuição de deformação linear, onde seções planas permanecem planas.

Em seguida, avalia-se as tensões em cada fibra da seção transversal, com base na relação de tensão-deformação.

O equilíbrio das forças resultantes na direção axial da seção da viga é verificado. Com referência à condição de equilíbrio deve ser satisfeita de acordo com a equação A.8. Caso contrário, é necessário reajustar a posição da linha neutra e novamente avaliar as tensões e a condição de equilíbrio, até que a equação A.8 esteja satisfeita.

$$F_1 + F_2 + F_3 = F_4 + F_5 \quad (\text{A.8})$$

Uma vez determinado a posição da linha neutra que satisfaça as condições de equilíbrio, o valor de projeto para a capacidade de flexão associado ao modo de falha considerado pode ser calculado pela equação A.9.

$$M_{Rd} = \sum F_i \cdot d_i \quad (\text{A.9})$$

Para garantir que a verificação quanto ao estado limite último seja satisfatória, a condição da equação A.10 deve ser atendida.

$$M_{sd} \leq M_{Rd} \quad (\text{A.10})$$

## RESISTÊNCIA À FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO

De acordo com Zhao (2014), tendo em vista que as pesquisas existentes estão distantes de um adequado desenvolvimento de um método simples para obter a resistência à flambagem lateral com torção de vigas de aço reforçadas com laminados de fibras de carbono, os projetistas devem lançar mão de análises não lineares via método dos elementos finitos. Para tal fim, tanto o aço quanto o reforço de PRFC podem ser representados utilizando elementos tipo casca (*shell*). O PRFC pode ser tratado como uma placa ortotrópica fina perfeitamente conectada com a viga, já que a falha por descolamento pode ser considerada separadamente no projeto. Segundo essa referência, a carga de colapso para flambagem lateral com torção da viga reforçada com laminado de PRFC pode ser obtida adequadamente com análise que considerem as não linearidades geométrica e de material na análise, bem como das imperfeições geométricas.

## RESISTÊNCIA À FLAMBAGEM LOCAL

### Modelo proposto por Aoki e Kubo (1997)

Para a verificação quanto à resistência a flambagem local dos elementos, é utilizado um método aproximado baseado no estudo realizado por Aoki e Kubo (1997). É proposta uma equação de capacidade de rotação contra a flambagem da mesa de compressão e da alma para vigas de aço de seção I.

$$\phi_{lb} = \frac{0.15}{\lambda_s - 0.36} \leq 12 \quad (\text{A.11})$$

$$\lambda_s = \sqrt{\lambda_{pf} \lambda_{pw}} \quad (\text{A.12})$$

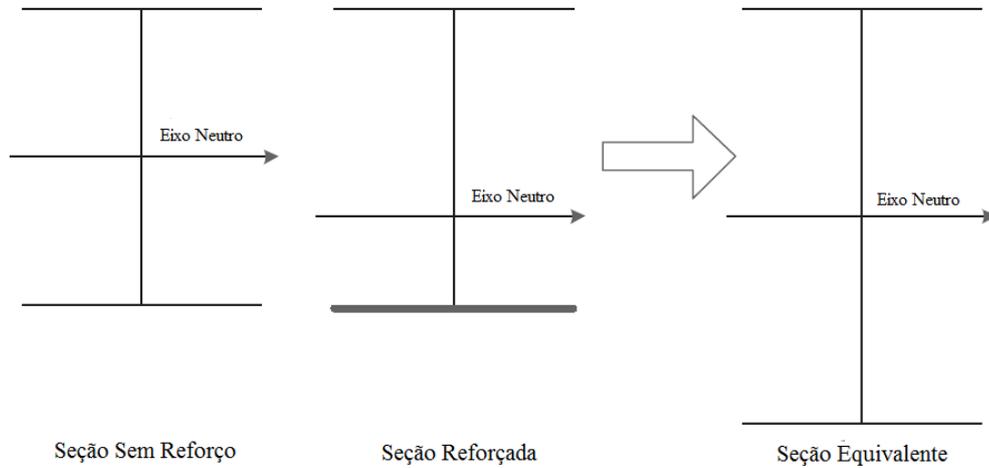
Onde  $\lambda_{pf}$  e  $\lambda_{pw}$  são, respectivamente, os parâmetros de relação largura-espessura para a mesa e a alma, e podem ser obtidos pela equação A.13.

$$\lambda_p = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \sqrt{\frac{\sigma_{s,y}}{E_s}} \quad (\text{A.13})$$

Os valores de  $b$  e  $t$  são de acordo com o elemento em análise, e o valor para o coeficiente de flambagem  $k$  é de 0,43 para a mesa e 2,39 para a alma.

Para os casos em que existe o reforço com o laminado de PRFC utiliza-se uma seção transversal equivalente para encontrar o valor de  $\lambda_{pw}$ , como é mostrada na Figura A. 3.

**Figura A. 3 - Seção equivalente para viga de aço reforçada com PRFC**



**Fonte:** Adaptado Zhao (2014)

A flambagem da alma por cisalhamento pode ser considerada não crítica caso atenda de forma satisfatória a condição a seguir, dada equação A.14, baseada no código EN 1993 2005.

$$\frac{(h-2t_f)}{t_w} < 72 \frac{\varepsilon}{\eta} \quad (\text{A.14})$$

Com,  $\eta$  podendo ser tomado, de forma conservadora, igual a 1.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{\sigma_{s,y}}} \quad (\text{A.15})$$

A realização de análises não lineares por meio do método dos elementos finitos fornecem previsões mais precisas sobre a possibilidade de flambagem local. Para tal análise, pode ser utilizado um modelo baseado em elemento *Shell* para a representação da viga de aço e do laminado de PRFC, preocupando-se com a inclusão apropriada das imperfeições geométricas no modelo, garantindo resultados confiáveis.

## RESISTÊNCIA AO DESCOLAMENTO

### Resistência ao descolamento intermediário

No estudo realizado por Fernando (2010) é apresentada uma proposta de formulação para a determinação do valor de projeto da deformação do laminado de PRFC prevendo o descolamento intermediário.

Segundo Fernando (2010) o valor de projeto da deformação do PRFC quanto ao descolamento intermediário, para um comprimento de ligação ( $L$ ) maior que o comprimento de ligação mínimo referido como o comprimento efetivo ( $L_e$ ), é dado pela equação A.16, apresentada a seguir. O uso da equação A.16 é indicado para prever o descolamento intermediário do reforço PRFC devido a um único dano localizado no substrato de aço.

$$\varepsilon_{frp,l,d} = \frac{F_{1,d}}{\gamma_{debond} b_{frp} E_{frp} t_{frp}} = \frac{1}{\gamma_{debond}} \sqrt{\frac{2G_f}{E_{frp} t_{frp}}} \quad (A.16)$$

Onde,  $\gamma_{debond}$  é o fator de segurança parcial para falha de descolamento,  $b_{frp}$ ,  $E_{frp}$  e  $t_{frp}$  são a largura, o módulo de elasticidade e a espessura do laminado de PRFC, respectivamente.  $G_f$  é a energia de fratura interfacial, para os adesivos lineares e não-lineares, e pode ser obtida pela equação A.17.

$$G_f = 628 t_a^{0,5} R^2 \quad (A.17)$$

Sendo  $t_a$  a espessura da camada de adesivo, e  $R$  a energia de deformação a tração do adesivo, que é igual à área sob a curva de tensão-deformação de tração uniaxial.

A capacidade do momento de projeto de uma viga reforçada com PRFC para o modo de falha de descolamento intermediário pode ser calculada tomando a deformação limite do reforço igual a sua deformação por descolamento intermediário.

Como mencionado anteriormente, o comprimento da ligação não deve ser menor que um comprimento mínimo efetivo. Fernando (2010) apresenta dois modelos de comportamento para essa ligação, sendo um para adesivos lineares e outro para os adesivos não lineares.

O primeiro modelo supõe que o comportamento da ligação seja representado por uma curva bilinear, e o comprimento efetivo pode ser encontrado pela equação A.18.

$$L_e = a_b + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \left( \frac{\lambda_1 + \lambda_2 \tan(\lambda_2 a_b)}{\lambda_1 - \lambda_2 \tan(\lambda_2 a_b)} \right) \quad (\text{A.18})$$

Com,

$$a_b = \frac{1}{\lambda_2} \operatorname{sen}^{-1} \left[ 0,97 \sqrt{\frac{\delta_f - \delta_1}{\delta_f}} \right] \quad (\text{A.19})$$

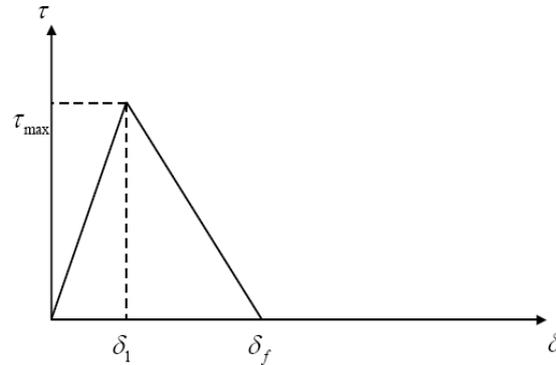
$$\lambda_1^2 = \frac{2G_f}{\tau_{\max} \delta_1} \lambda^2 \quad (\text{A.20})$$

$$\lambda_2^2 = \frac{2G_f}{\tau_{\max} (\delta_f - \delta_1)} \lambda^2 \quad (\text{A.21})$$

$$\lambda^2 = \frac{\tau_{\max}^2}{2G_f} \left( \frac{1}{E_{prf} t_{prf}} + \frac{b_{prf}}{E_s A_s} \right) \quad (\text{A.22})$$

Sendo  $\delta_1$  o deslizamento no pico da tensão de cisalhamento e  $\delta_f$  o deslizamento máximo apresentado pelo modelo. A Figura A. 4 mostra a curva idealizada para representar o comportamento da ligação para adesivos lineares.

Figura A. 4 - Curva “Bond-Slip” idealizada para adesivos lineares



Fonte: Fernando (2010)

Para o segundo modelo é suposto que o comportamento da ligação seja representado por uma curva trapezoidal, e o comprimento efetivo pode ser encontrado pela equação A.23.

$$L_e = a_d + b_e + \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{1+C}{1-C} \quad (\text{A.23})$$

Com

$$C = \frac{\lambda_3}{\lambda_1 \delta_1} (\delta_f - \delta_2) \cot(\lambda_3 b_e) - \lambda_1 a_d \quad (\text{A.24})$$

$$b_e = \frac{1}{\lambda_3} \text{sen}^{-1} \left[ \frac{\lambda_3 \lambda}{0,97 \delta_1 \lambda_1^2} (\delta_f - \delta_2) \right] \quad (\text{A.25})$$

$$a_d = \frac{1}{\lambda_1} \left( \sqrt{\left( 2 \frac{\delta_2}{\delta_1} - 1 \right)} - 1 \right) \quad (\text{A.26})$$

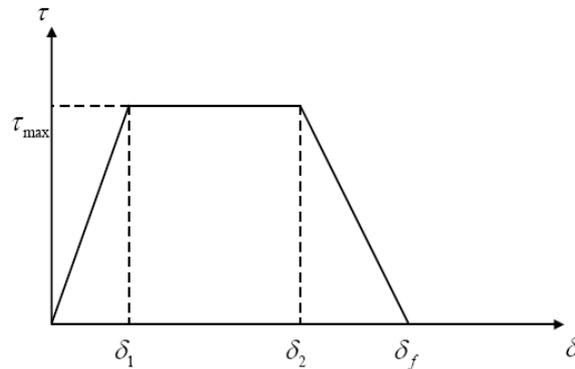
$$\lambda_3^2 = \lambda^2 \frac{2G_f}{(\delta_f - \delta_2) \tau_{máx}} \quad (\text{A.27})$$

$$\lambda_1^2 = \frac{2G_f}{\tau_{máx} \delta_1} \lambda^2 \quad (\text{A.28})$$

$$\lambda^2 = \frac{\tau_{m\acute{a}x}^2}{2G_f} \left( \frac{1}{E_{prf} t_{prf}} + \frac{b_{prf}}{E_s A_s} \right) \quad (\text{A.29})$$

Sendo  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  e  $\delta_f$  os valores obtidos pela curva trapezoidal do modelo, conforme mostra a Figura A. 5.

**Figura A. 5 - Curva “Bond-Slip” idealizada para adesivos lineares**



Fonte: Fernando (2010)

### Resistência ao Descolamento da Extremidade

De acordo com o CNR-DT 202/2005 a força de descolamento é convencionalmente calculada avaliando a tensão máxima na camada adesiva através de uma análise elástica linear.

Deve ser assumido que a seção transversal do elemento reforçado permanece plana; a tensão de cisalhamento na viga de aço e no reforço são negligenciadas; existe ligação perfeita entre os materiais; relação de tensão-deformação elástico linear; a tensão normal e de cisalhamento são constantes em toda espessura da camada de adesivo.

A diferença de deformação ( $\Delta\varepsilon_{fs}$ ) e curvatura ( $\Delta\chi_{fs}$ ) entre o aço e o reforço desenvolvem as tensões de cisalhamento e normal, respectivamente, e podem ser encontradas pelas equações a seguir.

$$\Delta\varepsilon_{fs} = (\varepsilon_{fa,t} - \varepsilon_{fa,0}) - (\varepsilon_{sa,t} - \varepsilon_{sa,0}) \quad (\text{A.30})$$

$$\Delta\chi_{fs} = (\chi_{f,t} - \chi_{f,0}) - (\chi_{s,t} - \chi_{s,0}) \quad (\text{A.31})$$

Sendo,

$\varepsilon_{fa,t}$  é a deformação longitudinal na interface adesivo-PRF após a instalação da ligação adesiva;

$\varepsilon_{sa,t}$  é a deformação longitudinal equivalente na interface aço-adesivo;

$\varepsilon_{fa,0}$  é a deformação longitudinal na interface adesivo-PRF na instalação da ligação adesiva (t=0);

$\varepsilon_{sa,0}$  é a deformação longitudinal na interface aço- adesivo na instalação da ligação adesiva (t=0);

$\chi_{f,t}$  é a curvatura de flexão no reforço após a instalação da ligação adesiva;

$\chi_{s,t}$  é a curvatura a flexão equivalente na viga de aço;

$\chi_{f,0}$  é a curvatura de flexão no reforço na instalação da ligação adesiva (t=0);

$\chi_{s,0}$  é a curvatura a flexão equivalente na viga de aço na instalação da ligação adesiva (t=0).

A tensão de cisalhamento máxima na camada adesiva pode ser encontrada pela equação A.32.

$$\tau_{máx} = \frac{1}{b_f} \left[ \left( \frac{\Delta\varepsilon_0}{f_2} \right) \lambda + \frac{\Delta\varepsilon_1}{f_2} \right] \quad (\text{A.32})$$

Sendo,

$$\Delta\varepsilon_0 = -\frac{\Delta M(0)}{E_s I_s} y_s \quad (\text{A.33})$$

$$\Delta\varepsilon_1 = -\frac{\Delta T(0)x}{E_s I_s} y_s \quad (\text{A.34})$$

Onde  $\Delta M(0)$  e  $\Delta T(0)$  são, respectivamente, a mudança do momento fletor e da força cortante no ponto de x=0 após a instalação do reforço.

$$\lambda = \sqrt{\frac{f_2}{f_1}} \quad (\text{A.35})$$

$$f_1 = \left( \frac{t_a}{G_a b_f} \right) \quad (\text{A.36})$$

$$f_2 = \left( \frac{1}{E_f A_f} + \frac{1}{E_s A_s} + \frac{(y_s + t_f/2 + t_a) y_s}{E_s I_s} \right) \quad (\text{A.37})$$

Onde,  $b_f$  e  $t_f$  são, respectivamente, a largura e espessura do reforço;  $t_a$  é a espessura da camada adesiva;  $G_a$  é o módulo de cisalhamento do adesivo;  $E_f$  e  $A_f$  são, respectivamente, módulo de elasticidade e área da seção transversal do reforço;  $E_s$  é o módulo de elasticidade da viga metálica;  $A_s$  é a área da seção transversal da viga metálica;  $I_s$  é o momento de inércia da viga metálica; e  $y_s$  é a distância do centróide da viga até a interface do adesivo.

O máximo valor para a tensão normal na camada adesiva pode ser obtida por meio da equação A.38.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{1}{b_f} \left[ \frac{a_3 C_1 \lambda^2}{a_1 \lambda^4 + a_2} - 2\beta^2 C_4 \right] \quad (\text{A.38})$$

Onde,

$$a_1 = \frac{t_a}{E_a b_f} \quad (\text{A.39})$$

$$a_2 = \frac{1}{E_f I_f} + \frac{1}{E_s I_s} \quad (\text{A.40})$$

$$a_3 = \frac{y_f}{E_f I_f} - \frac{(y_s + t_f/2 + t_a) - y_f}{E_s I_s} \quad (\text{A.41})$$

$$\beta = \left( \frac{a_2}{4a_1} \right)^{0,25} \quad (\text{A.42})$$

As constantes  $C_1$  e  $C_4$  são obtidas pelas equações A.43, A.44 e A.45.

$$C_1 = \frac{\Delta\varepsilon_0}{f_2} \quad (\text{A.43})$$

$$C_4 = \frac{1}{\beta} \left( \frac{\Delta\chi_1}{a_2} + \frac{a_3\Delta\varepsilon_1}{a_2f_2} + \frac{\lambda a_3 C_1}{a_1\lambda^4 + a_2} \right) + C_3 \quad (\text{A.44})$$

$$C_3 = - \left( -\frac{\Delta\chi_0}{a_2} + \frac{a_3\Delta\varepsilon_0}{a_2f_2} + \frac{a_3 C_1}{a_1\lambda^4 + a_2} \right) \quad (\text{A.45})$$

Conhecidas as tensões máximas de cisalhamento e normal com referência ao estado limite último, a delaminação do reforço pode ser verificada comparando o valor da tensão principal com a resistência de projeto do adesivo, conforme equação A.46.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\left( \frac{\sigma}{2} \right)^2 + \tau^2} \leq \frac{f_{ak}}{\gamma_a \gamma_{Rd}} \eta \quad (\text{A.46})$$

Sendo  $f_{ak}$  o valor da resistência característica do adesivo,  $\gamma_a$  é um fator parcial do adesivo referente ao seu método de instalação,  $\gamma_{Rd}$  é um fator parcial modelo que depende do tipo de resistência verificada,  $\eta$  é um fator de conversão baseado nas possíveis interferências na durabilidade e comportamento do reforço.