CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE JUNTAS COLADAS COMPÓSITO / AÇO EM UM TESTE DE ARRANCAMENTO COM ROLETES FLUTUANTES VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Phelippe de Araujo Pereira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientador: Silvio Romero de Barros, D. Sc.

Rio de Janeiro
Abril de 2018

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE JUNTAS COLADAS COMPÓSITO / AÇO EM UM TESTE DE ARRANCAMENTO COM ROLETES FLUTUANTES VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Phelippe de Araujo Pereira

Banca Examinadora:

_____

Presidente, Professor Dr. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar – CEFET/RJ

_____

Professor Dr. Silvio Romero de Barros – CEFET/RJ (orientador)

_____

Dr. Carlos Eduardo Reuther de Siqueira – Petrobras

Rio de Janeiro

Abril de 2018

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

P436 Pereira, Phelippe de Araujo
Avaliação do comportamento mecânico de juntas coladas compósito / aço em um teste de arranchamento com roletes flutuantes via método dos elementos finitos / Phelippe de Araujo Pereira.—2018.
76f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.
Bibliografia : f. 72-76
Orientador : Silvio Romero de Barros

1. Juntas (Engenharia). 2. Juntas (Engenharia) – Ensaios e provas. 3. Materiais compostos – Propriedades mecânicas. 4. Aço. 5. Método dos elementos finitos. I. Barros, Silvio Romero de (Orient.). II. Título.

CDD 621.825

Elaborada pela bibliotecária Lívia Lima CRB-7/5904

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, minha querida esposa Jandrine e minha amada filha Júlia.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida e por ter me sustentado até aqui em mais esta jornada, sempre me proporcionando meios de transpor os mais diversos desafios.

Aos meus pais, por todo o suporte e esforço empregado durante os anos da minha formação, sempre investindo nos meus estudos.

À minha querida esposa, Jandrine, por toda paciência e companheirismo em todas horas de dedicação aos estudos e elaboração desta dissertação. Certamente, sem este apoio e amor eu não teria conseguido. À minha adorável filha, Júlia, razão pela qual tenho acordado a cada manhã.

Ao meu orientador Silvio Romero de Barros, pela paciência, ensinamentos e confiança depositados durante a realização deste trabalho.

Ao CEFET/RJ, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais (PPEMM), pela contribuição na minha formação.

EPÍGRAFE

“Not everything that counts can be counted, and not everything that's counted truly counts”.

William Bruce Cameron

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo numérico para avaliar o comportamento mecânico de juntas coladas compósito-metal em um teste de arrancamento com roletes flutuantes, através do método dos elementos finitos. As propriedades ortotrópicas do compósito foram calibradas através de dados experimentais obtidos a partir de ensaios de tração do CFRP. Diferentes abordagens foram utilizadas para representar o elemento finito (sólido tipo casca e sólido) e as camadas de fibra (a nível da lâmina e do laminado). As propriedades da junta colada foram representadas por elementos de contato com critérios de falha para os modos I e II de fratura. Os modos de fratura são avaliados através de critérios para tensão normal e de cisalhamento na interface, bem como deslocamento relativo máximo entre os elementos de contato. As propriedades coesivas são calibradas a partir da curva força *versus* deslocamento e da força média de arrancamento obtidas dos ensaios. Os resultados numéricos apresentaram similaridade com os experimentos. O trabalho fornece bons resultados para abordagem via elementos finitos de juntas coladas compósito-aço, permitindo a variação da sua composição, bem como variação de fibras, orientações e materiais de forma a observar a influência na resposta mecânica da junta colada.

Palavras-chave: Juntas Coladas; Ensaio de Arrancamento com Roletes Flutuantes; Método dos Elementos Finitos; Descolamento; CFRP-aço.

ABSTRACT

In this study a numerical model was developed to evaluate the mechanical behavior of the composite-metal bonded joint in a floating roller peel test using the finite element method. The composite orthotropic properties were calibrated by experimental data obtained from CFRP tensile tests. Different approaches were considered to represent the finite element (solid-like-shell and solid) and fiber layer (at the level of lamina and laminate). The bonded joint properties were implemented through contact elements with failure criteria for fracture modes I and II. The fracture modes were evaluated by stresses criteria for normal and shear at the interface, as well as criteria for relative displacement between contact elements. The cohesive properties are calibrated by the load versus displacement curve and by the average of peeling force assessed from peel test. The numerical results showed similarity with tests. This study provided good results by using finite element on composite-steel bonded joints, allowing the variation of its composition, as well as changes in fiber, orientations and materials in order to observe the variation of mechanical response in a bonded joint.

Keywords: Bonded Joints; Floating Roller Peel Test; Finite Element Method; Debonding; CFRP-steel.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de uma junta colada [4]. 17
Figura 2 – (a) Bancada/dispositivo de teste da ADMET [9]; Configuração do ensaio de arrancamento compósito-metal [10]. 18
Figura 3 – Fases de um material compósito. 21
Figura 4 – Exemplo de utilização de polímeros termoplásticos para formação de compósitos com matriz polimérica, adaptada de [15]. 22
Figura 5 – Relação entre tenacidade e temperatura de uso para os polímeros, adaptada de [12]. 23
Figura 6 – Fluxograma de classificação dos compósitos, adaptada de [12]. 24
Figura 7 – Compósito estrutural laminado, com detalhe para os seus componentes. 25
Figura 8 – Tipos de juntas coladas comumente utilizadas na engenharia. 28
Figura 9 – Representação esquemática dos diferentes modos de falha em juntas coladas de sobreposição simples, adaptada de [19]. 29
Figura 10 – Esquemático dos três diferentes modos de fratura, adaptada de [21]. 30
Figura 11 – Dispositivo utilizado no teste de arrancamento com roletes flutuantes, adaptada de [7] 31
Figura 12 – Amostra do teste segundo ASTM, adaptada de [7] 31
Figura 13 – Exemplo de uma curva carregamento x deslocamento obtida em um teste de arrancamento, adaptada de [8]. 33
Figura 14 – Curva carregamento x deslocamento obtida em um ensaio de arrancamento, com detalhe para força média de arrancamento. Adaptada de [26] 34
Figura 15 – Malha hexaédrica de elementos finitos. 36
Figura 16 – Representação de uma malha de elementos finitos aplicado à delaminação entre CFRP e placa de aço. 36
Figura 17 – Exemplo de juntas de sobreposição simples (SLJ) e dupla (DLJ), adaptada de [35]. 38
Figura 18 – Modelo de falha tensão versus deslocamento. 40
Figura 19 – Representação dimensional dos corpos de prova CFRP-aço. 42
Figura 20 – Fabricação dos corpos de prova CFRP-aço [26]. 43

Figura 21 – Bancada de teste e amostra de CFRP – Ensaio de tração [52]. 44
Figura 22 – Resultado dos ensaios de tração para o laminado 0/90°, adaptada de [52]. 45
Figura 23 – Resultado dos ensaios de tração para o laminado 45/-45°, adaptada de [52]. 45
Figura 24 – Resultados de carga versus deslocamento para os corpos de prova CFRP-aço com 500 mm, sem envelhecimento [55]. 46
Figura 25 – Geometria típica do elemento SOLSH190, [56]. 48
Figura 26 – Representação das 20 camadas do laminado 0/90° e ±45°. 49
Figura 27 – Geometria do corpo de prova e dispositivo de teste. À esquerda imagem adaptada de [26]..... 50
Figura 28 – Representação das camadas do laminado 0/90° e metal. 51
Figura 29 – Geometria do elemento SOLID185 [56]. 52
Figura 30 – Malha de elementos finitos – modelo peel test. 52
Figura 31 – Condições de contorno do FEA, com detalhe, à esquerda, para as regiões que são representadas no FEA. 53
Figura 32 – Junta cilíndrica considerada no FEA. 54
Figura 33 – Contato do tipo colado considerado no FEA. 55
Figura 34 – Contato do tipo sem atrito considerado no FEA. 56
Figura 35 – Comparação numérico versus experimenal dos ensaios de tração para o laminado 0/90°. 58
Figura 36 – Comparação numérico versus experimenal dos ensaios de tração para o laminado ±45°. 58
Figura 37 – Curvas de força versus deslocamento dos corpos de prova CFRP-aço com 500 mm, sem envelhecimento, adaptada de [26]..... 60
Figura 38 – Variação da força média de arrancamento com o parâmetro NFLS. 61
Figura 39 – Variação da força média de arrancamento com o parâmetro SFLS. 62
Figura 40 – Variação da força média de arrancamento com o parâmetro CCRIT. 62
Figura 41 – Comparação numérico-experimental da curva força versus deslocamento. 63
Figura 42 – Comparação numérico-experimental da curva força versus deslocamento na região de avaliação da força média. 63
Figura 43 – Influência dos diferentes tipos de substratos (CFRP-aço e aço-aço) na curva força versus deslocamento. 65

Figura 44 – Influência de diferentes tipos de substratos (CFRP-aço e aço-aço) na força média de arrancamento. 66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do aço (ASTM A36)..... 43
Tabela 2 – Propriedades ortotrópicas do CFRP ao nível da lâmina. 46
Tabela 3 – Propriedades ortotrópicas do CFRP ao nível do laminado (seis camadas). . 51
Tabela 4 – Influência do NFLS na força média..... 61
Tabela 5 – Influência do SFLS na força média. 61
Tabela 6 – Influência do CCRIT na força média..... 61
Tabela 7 – Parâmetros da junta colada utilizados no FEA. 64
Tabela 8 – Comparação numérico-experimental da força de arrancamento média. 64
Tabela 9 – Comparação da força de arrancamento média para diferentes tipos de substratos (CFRP-aço e aço-aço)..... 66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP	*ANSYS Composite PrePost*
CAE	*Computer Aided Engineering*
CFRP	*Carbon Fiber Reinforced Polymer*
CZM	*Cohesive Zone Model*
DCB	*Double Cantilever Beam*
DLJ	*Double Lap Joint*
FEA	*Finite Element Analysis*
FSDT	*First-Order Shear Deformation Theory*
MEF	Método dos Elementos Finitos
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
SLJ	*Single Lap Joint*
VCCT	*Virtual Crack Closure Technique*

LISTA DE SÍMBOLOS

$CCOD$	*Critical crack opening distance*
$CCRIT$	Distância crítica de abertura na interface
d_i	Parâmetro de descolamento
E	Módulo de Young isotrópico
E_{11}	Módulo de Young ortotrópico na direção 1 (no plano, na direção da fibra)
E_{22}	Módulo de Young ortotrópico na direção 2 (no plano, ortogonal a fibra)
E_{33}	Módulo de Young ortotrópico na direção 3 (fora do plano)
$F_{médio}$	Força média do ensaio de arrancamento com roletes flutuantes
G_{12}	Módulo de Cisalhamento ortotrópico no plano
G_{13}	Módulo de Cisalhamento ortotrópico fora do plano, na direção da fibra
G_{23}	Módulo de Cisalhamento ortotrópico fora do plano, ortogonal a fibra
G_i	Energia crítica de fratura [J/m^2]
G_{Ic}	*Critical energy release rate in mode I*
G_{IIc}	*Critical energy release rate in mode II*
H	Módulo tangente de encruamento
$K_{contato}$	Rigidez de contato
P	Tensão no contato
$NFLS$	Tensão normal na falha
$SFLS$	Tensão de cisalhamento na falha
u_i	Gap / deslizamento no contato
σ_n	Tensão normal de contato
σ_s	Tensão de cisalhamento de contato
σ_y	Tensão de escoamento
ν	Coeficiente de Poisson isotrópico
ν_{12}	Coeficiente de Poisson ortotrópico no plano
ν_{13}	Coeficiente de Poisson ortotrópico fora do plano, na direção da fibra
ν_{23}	Coeficiente de Poisson ortotrópico fora do plano, ortogonal a fibra
ρ	Massa específica (kg / m^3)

SUMÁRIO

Introdução 16

1. Revisão Bibliográfica 20

1.1 Materiais Compósitos 20

1.2 Juntas Coladas 26

1.3 Ensaio de Arrancamento com Roletes Flutuantes 30

1.4 Método dos Elementos Finitos aplicado as Juntas Coladas 34

1.4.1 Modelagem de juntas coladas 37

1.4.2 Modelo de descolamento para elementos de contato 39

2. Materiais e Métodos 42

2.1 Materiais 42

2.2 Metodologia Numérica 47

2.2.1 Representação do ensaio à tração do laminado CFRP 47

2.2.2 Representação do ensaio de arrancamento da junta CFRP-aço 49

3. Resultados e Discussão 57

3.1 Ensaio de Tração 57

3.2 Ensaio de Arrancamento com Roletes Flutuantes 59

Conclusão 68

Discussão para Trabalhos Futuros 71

Referencias Bibliográficas 72

Introdução

A necessidade por componentes estruturais cada vez mais resistentes têm auxiliado o desenvolvimento de materiais compósitos com propriedades específicas que podem ser definidas dependendo do tipo de serviço a que serão submetidos.

As características e propriedades destes materiais, tais como o baixo peso e a alta resistência mecânica, são fatores determinantes para um melhor desempenho de equipamentos, sejam eles direcionados para a indústria aeronáutica, aeroespacial, naval, óleo e gás, ou até mesmo na indústria de alta competição.

Entretanto, o elevado custo e os desafios associados à caracterização das propriedades do compósito para todos os modos de falha têm se tornado uma barreira para sua maior utilização.

Um dos problemas associados ao dimensionamento surge na união de diferentes elementos através de ligações aparafusadas e rebitagens que, além de introduzirem concentradores de tensões, quando feitas em compósitos necessitam de insertos que são facilmente alvos de defeitos de fabricação. Neste sentido surgem os adesivos estruturais como um elemento de ligação com potencial para se tornarem rapidamente numa mais-valia a nível do uso de materiais compósitos [1-2].

As vantagens da utilização de adesivos são: a sua maior resistência à fadiga, redução dos concentradores de tensão e distribuição suave da carga em toda região colada. Outras vantagens incluem a baixa densidade, capacidade de unir componentes finos e dissimilares, boa vedação, baixo custo de fabricação e suas excelentes propriedades de amortecimento para prevenir a vibração [3]. A Figura 1 ilustra um exemplo de junta colada utilizada para promover a união entre duas chapas metálicas.

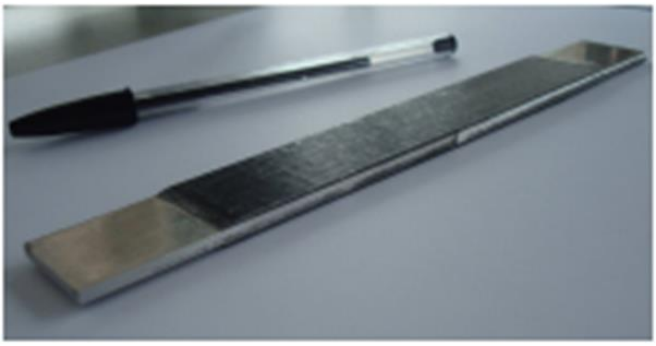


Figura 1 – Exemplo de uma junta colada [4].

Apesar das vantagens acima citadas, as juntas coladas, em sua grande maioria, são suscetíveis a degradação por um ou mais fatores ambientais. A temperatura, a umidade e a radiação solar são alguns parâmetros com grande influência na durabilidade das juntas adesivas. Além dos fatores ambientais, os procedimentos de fabricação das juntas e os carregamentos a que são submetidas podem introduzir ou iniciar defeitos, cuja evolução controlará o desempenho e a confiabilidade das juntas coladas [5].

A utilização dos adesivos para promover a união entre componentes é cada vez mais observada em aplicações industriais, daí a necessidade de uma análise mais detalhada das estruturas. Esta avaliação está associada, não só à escolha mais adequada da geometria das juntas, dos adesivos, do método de fabricação das juntas adesivas, como também, a partir da observação das condições ambientais, das solicitações e a aplicação a que a junta será submetida [6].

Neste sentido, na concepção de um projeto de juntas coladas, faz-se necessário avaliar experimentalmente a resistência do adesivo por diferentes métodos. Uma ligação adesiva pode ser medida por ensaio de tração, cisalhamento ou teste de compressão, entretanto, em uniões onde não há flexibilidade em um dos componentes da junta, um teste de arrancamento é mais apropriado para caracterizar a resistência do adesivo.

Os requisitos e parâmetros do ensaio de arrancamento com roletes flutuantes (*Floating Roller Peel Test*) são descritos na norma ASTM D 3167 [7], que foi elaborada para avaliar a resistência do adesivo quando utilizado na união de componentes metálicos.

Recentes estudos das propriedades mecânicas das juntas adesivas compósito-compósito e compósito-metal foram realizados utilizando-se os ensaios de arrancamento com roletes flutuantes, conforme [8], seguindo os requisitos e parâmetros especificados pela norma ASTM D 3167 [7]. Os resultados mostram que o teste de arrancamento

também pode ser utilizado para caracterizar as propriedades de adesão e o comportamento de juntas de compósito.

Além dos métodos experimentais, o estudo de juntas coladas tem sido amplamente explorado através de metodologias analíticas ou através de métodos numéricos. A utilização da engenharia assistida por computador (CAE), não só propicia um ganho em custo e tempo de resposta comparado aos testes experimental, como também permite a avaliação de componentes complexos onde a obordagem analítica não é possível sem aplicar as devidas simplificações. Adicionalmente, esta técnica permite avaliar diferentes materiais e composições de maneira rápida, como por exemplo, diferentes tipos de geometrias de adesivo, espessuras e componentes.

O principal objetivo deste trabalho é a utilização do Método de Elementos Finitos (MEF) para representar o comportamento mecânico de uma junta colada CFRP-aço submetida a um teste de arrancamento com roletes flutuantes, conforme ilustrado na Figura 2.



(a) (b)

Figura 2 – (a) Bancada/dispositivo de teste da ADMET [9]; Configuração do ensaio de arrancamento compósito-metal [10].

O software de análise dinâmica ANSYS LS-DYNA® [11] é empregado na modelagem do ensaio de arrancamento com roletes flutuantes entre compósito / aço. As

geometrias dos corpos de prova são definidas de forma a ter o compósito como substrato rígido e o aço como substrato flexível. As propriedades coesivas do adesivo são calibradas através de resultados experimentais que são comparados aos resultados numéricos.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica dos principais aspectos associados aos materiais compósitos e suas fases, importante para melhor compreensão do trabalho. Na seção seguinte, o tema juntas coladas é abordado com ênfase nas suas características, vantagens e desvantagens. Em seguida, o ensaio de arrancamento com roletes flutuantes é mostrado, ressaltando-se o seu objetivo, particularidades e o que a norma ASTM especifica. Por último, é apresentado o MEF aplicado à modelagem de juntas coladas, com ênfase para a representação do descolamento entre os substratos.

No capítulo 3 são descritos os materiais e métodos utilizados no estudo. Primeiramente são especificados os resultados experimentais utilizados como referência na avaliação comparativa numérico *versus* experimental. Em seguida são apresentadas as metodologias numéricas utilizadas no levantamento das propriedades mecânicas do CFRP e na representação do ensaio de arrancamento com roletes flutuantes.

O capítulo 4 apresenta os resultados numéricos obtidos das análises de elementos finitos. Os resultados do ensaio à tração do laminado CFRP são comparados graficamente com os dados experimentais. Em seguida, são mostrados os resultados da calibração das propriedades coesivas da junta colada, bem como a comparação numérico-experimental para o ensaio de arrancamento com roletes flutuantes. Por final, é realizada uma avaliação numérica da influência do material do substrato rígido na curva de arrancamento.

O capítulo 5 é separado para apresentar às conclusões deste trabalho, onde são elencadas as principais observações dos resultados e metodologia numérica proposta.

No capítulo 6 são apresentadas sugestões para trabalhos futuros baseando-se nos resultados e conclusões obtidos nos capítulos anteriores.

1. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentada uma revisão teórica e de publicações recentes sobre os principais aspectos associados aos materiais compósitos, às juntas coladas, ao ensaio de arrancamento com roletes flutuantes e aplicação do MEF na modelagem e avaliação do comportamento mecânico de uma junta colada CFRP-aço.

1.1 Materiais Compósitos

As conquistas tecnológicas da atualidade são inúmeras no que tange os materiais compósitos, principalmente as associadas com aplicações nas áreas aeronáutica, aeroespacial, petroquímica, naval, bioengenharia, automobilística, construção civil, e de artigos esportivos, entre outras. Estes avanços somente se tornaram viáveis após o surgimento dos compósitos estruturais. Esta classe de materiais é bastante ampla e abrangente, compreendendo desde os polímeros reforçados com fibras, os materiais híbridos metal/compósito e os concretos estruturais, e outros compósitos que incorporam matriz metálica ou cerâmica [12].

Os compósitos ainda são divididos em naturais e sintéticos. As madeiras, os ossos e os tecidos musculares são exemplos notáveis em termos de eficiência estrutural dos chamados compósitos naturais [13]. Nestes materiais também pode-se distinguir uma fase reforço, normalmente na forma filamentar, e outra aglutinante (a matriz), a qual permite que os reforços transfiram esforços mecânicos entre si e trabalhem de forma integrada.

Um compósito estrutural pode ser definido como um sistema material constituído por duas ou mais fases numa escala macroscópica, cuja propriedade mecânica é concebida para apresentar uma performance superior à dos materiais constituintes agindo de maneira independente [14].

A fase denominada por reforço é usualmente descontínua, rígida e mais resistente, enquanto que a fase contínua, menos rígida e menos resistente é nomeada por matriz. Por vezes uma terceira fase pode ser gerada entre o reforço e a matriz, sendo conhecida por interface e proveniente de interações químicas ou outros efeitos do processo, conforme Figura 3, adaptada de [14].

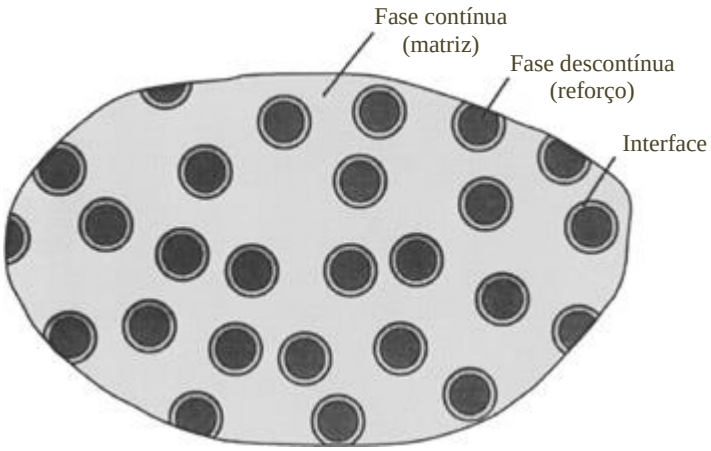


Figura 3 – Fases de um material compósito.

O principal objetivo das matrizes, especialmente no caso de compósitos de alta performance, é promover proteção e apoio as fibras, transferindo as tensões locais de uma fibra para outra [14]. As matrizes empregadas em estruturas compósitas podem ser divididas, em sua grande maioria, por quatro tipos: poliméricas, metálicas, cerâmicas e de carbono. As matrizes metálicas, cerâmicas e de carbono são mais utilizadas em aplicações de alta temperatura. As matrizes mais comumente utilizadas são compostas por estruturas poliméricas, pois, conferem menor peso ao compósito e possuem maior facilidade de processamento, podendo ser divididas em termorrígidas e termoplásticas.

As matrizes termorrígidas são classificadas de acordo com o tipo de resina utilizada no processo de manufatura do compósito. As mais comumente utilizadas são divididas em resinas poliéster, epóxi, fenólicas, poliamidas e bismaleimidas. Alguns agentes e processos térmicos podem ser aplicados a estas matrizes para conferir características específicas, tais como resistência ao impacto.

O processamento de uma resina termorrígida ocorre através da mistura adequada de resina, catalizador e acelerador, gerando a sua cura através do processo de polimerização. Os polímeros, quando submetidos ao processo de cura, desenvolvem uma rede interconectada tridimensional molecular com ligações cruzadas. A cura pode também ser definida como um processo que conduz à mudança de propriedades de uma resina via processo de reação química. O aumento das ligações cruzadas faz com que as cadeias poliméricas sejam menos suscetíveis de se alinhar em conformações que reduzem as tensões internas decorrentes do processo de cura, resultando em alto módulo elástico.

Uma das suas principais vantagens é a sua baixa viscosidade, que facilita o processo de impreginação das fibras na matriz.

Os termoplásticos são polímeros de alta massa molar, constituídos de cadeias lineares e, em alguns casos, apresentam alguma ramificação. As cadeias são emaranhadas permitindo que o material apresente integridade física, mas que são passíveis de deformação plástica quando submetidos a tensões [12]. A vantagem deste tipo de matriz é que podem atingir tenacidade à fratura interlaminar (G_{Ic}) de até 5 kJ/m^2, enquanto termorrígidos tenacificados atingem no máximo 300 J/m^2. O interesse na utilização de matrizes termoplásticas também está associado ao seu processamento, podendo ser realizado ao reforço ainda no estado sólido.

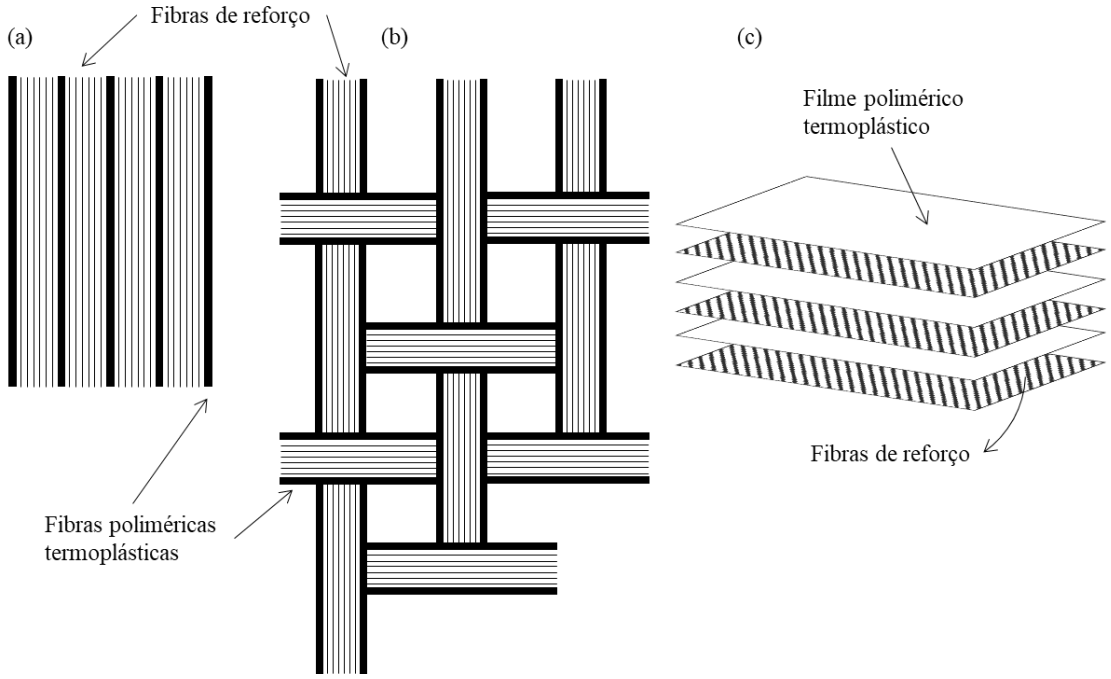


Figura 4 – Exemplo de utilização de polímeros termoplásticos para formação de compósitos com matriz polimérica, adaptada de [15].

A Figura 4(a) e Figura 4(b) ilustram a utilização de termoplásticos na sua forma filamentar unidirecional, incorporado diretamente às fibras de reforço, como também na forma de tecido, onde os filamentos são justapostos aos fios poliméricos, na fração em peso desejada, formando a matriz durante o processo de conformação. Os termoplásticos ainda podem ser encontrados na forma de filmes poliméricos que são dispostos de

maneira alternada com as as camadas de reforço, para posterior conformação, conforme apresentado na Figura 4(c).

O PEEK (poli-éter-éter-cetona), as poliamidas e o PPS (polisulfureto de fenileno) são exemplos de matrizes termoplásticas utilizadas em aplicações estruturais.

Quando comparamos estes dois tipos de matrizes, podemos destacar que as matrizes termorrígidas são estáveis termicamente, não se fundem ou não se amolecem e não possuem limitação quanto à sua utilização comparadas as matrizes termoplásticas.

Atualmente, uma variedade imensa de combinações de materiais formadores de matriz pode ser efetuada durante o processamento do compósito. A versatilidade é tal que compósitos pertencentes a uma classe, como por exemplo os compósitos poliméricos, podem ser transformados em compósitos de matriz cerâmica. Tanto a tenacidade à fratura como a capacidade de trabalhar em altas temperaturas são requisitos almejados para uma adequada seleção de matrizes, como mostra a Figura 5.

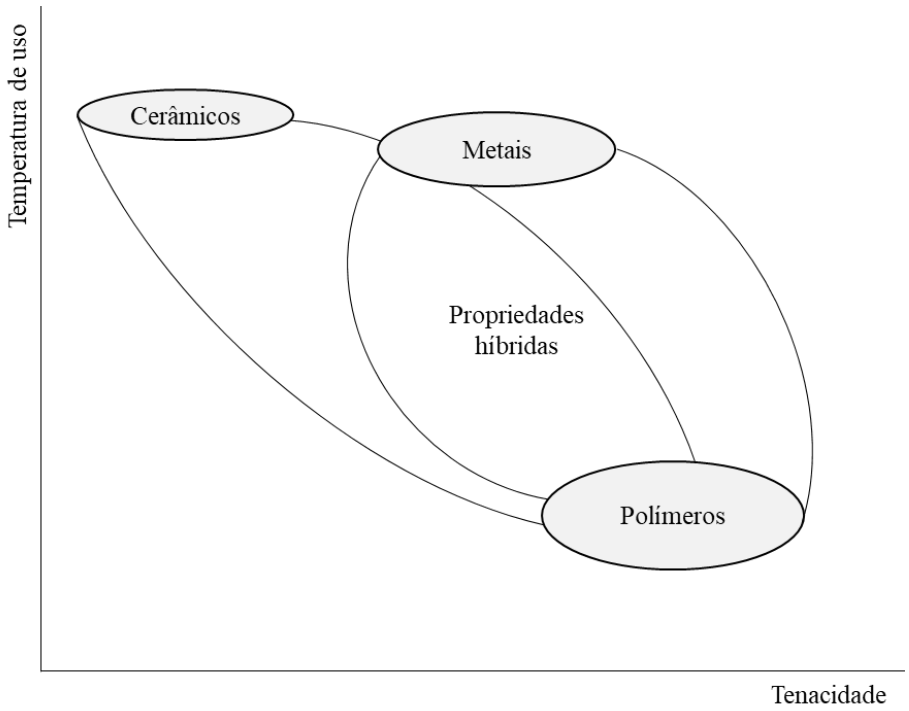


Figura 5 – Relação entre tenacidade e temperatura de uso para os polímeros, adaptada de [12].

O reforço, normalmente composto por componentes particulados ou fibrosos, tem como função aumentar a resistência do compósito, elevando as suas propriedades mecânicas.

Os compósitos de duas fases podem ser classificados em três grandes categorias: dependentes do tipo, da geometria e da orientação da fase de reforço. Assim, eles podem ser divididos em compósitos particulados, compostos de partículas de diferentes tamanhos e formas distintas distribuídas aleatoriamente na matriz, reforçados por fibras, ou estruturais. A Figura 6 ilustra um fluxograma de classificação dos compósitos pelo tipo de reforço utilizado.

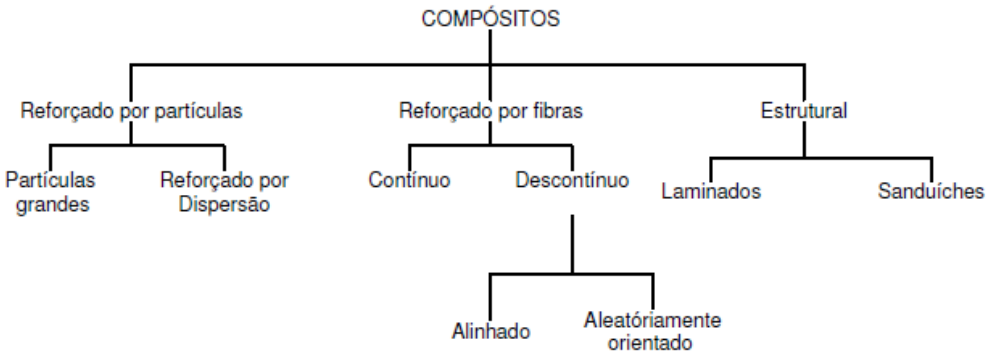


Figura 6 – Fluxograma de classificação dos compósitos, adaptada de [12].

Segundo MARINUCCI [16], as propriedades finais do compósito dependem das propriedades dos elementos constituintes, como concentração, distribuição da concentração, orientação e geometria das fibras.

Os compósitos estruturais laminados são construídos através do empilhamento de lâminas que podem variar sua espessura, propriedades mecânicas e orientação das fibras, conferindo ao laminado uma característica particular, conforme ilustrado na Figura 7. Comumente, as lâminas são compostas por fibras contínuas, que se assemelham a um tecido.

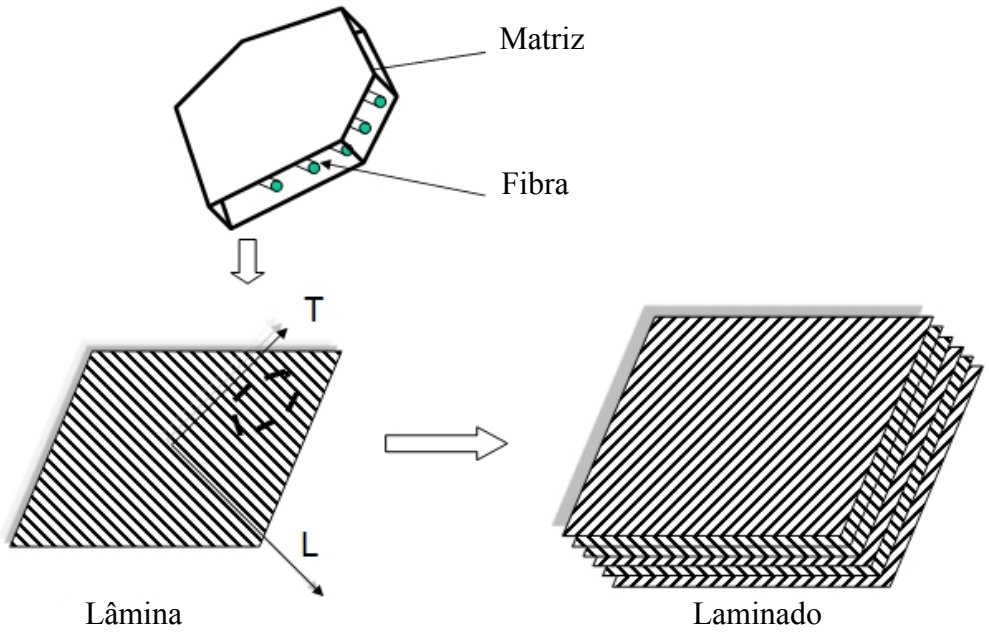


Figura 7 – Compósito estrutural laminado, com detalhe para os seus componentes.

O CFRP, utilizado neste trabalho, é um exemplo de compósito laminado estrutural composto por matriz polimérica e reforço em fibra de carbono.

As fibras de carbono são manufaturadas pela pirólise controlada de precursores orgânicos em forma de fibras. O processo de pirólise consiste, basicamente, no tratamento térmico do percursor que remove oxigênio, nitrogênio e hidrogênio dando origem às fibras de carbono. A primeira utilização de fibras de carbono foi registrada por Thomas Edison em 1880, numa patente sobre a sua aplicação em filamentos de lâmpadas elétricas [12]. Entretanto, somente no começo da década de 60 teve início a produção comercial de fibras de caborno, com requisitos para aplicação na indústria aeroespacial, onde o baixo peso e alta resistência são fatores determinantes. Atualmente, os Estados Unidos consomem 60% de toda produção mundial e o Japão detém 50% da produção mundial, sendo líder na produção de fibras de carbono através do piche.

A utilização deste tipo de união nos materiais compósitos pode ser comparada à soldagem nos materiais metálicos. Uma das dificuldades no seu uso é o comportamento sob solicitação que, apesar dos avanços dos últimos anos, ainda não está suficientemente aprofundado de forma a induzir a confiança necessária à sua utilização em elementos estruturais críticos.

1.2 Juntas Coladas

Um dos grandes desafios no que tange a utilização de materiais compósitos em grande escala está ligado à necessidade de peças contínuas, como um componente monolítico, para evitar zonas de concentração de tensões e a dificuldade em reparar alguns defeitos recorrentes nestes materiais. Neste sentido, como uma maneira de mitigar estes problemas surgem os adesivos estruturais, cuja função principal é unir e reparar elementos estruturais compósitos.

Uma importante vantagem desta técnica é a capacidade de unir materiais dissimilares ou que possuem baixa resistência à alta temperatura, onde a utilização de técnicas mais tradicionais de união, tal como a soldagem, acarretaria em diversos problemas.

As capacidades gerais deste método de junção envolvem um campo de tensão mais uniforme do que a fixação ou rebitagem, vedação de fluido, alta resistência à fadiga e a possibilidade de unir diferentes materiais devido ao efeito de corrosão e acomodação de diferentes expansões térmicas dos aderentes [2] e [17]. A união adesiva também se torna atrativa do ponto de vista da redução do peso. Superfícies externas lisas que podem ser obtidas e os custos de montagem que podem ser reduzidos a partir de uniões adesivas, por serem menos onerosos ao custo do que a fixação mecânica quando se trata de grandes áreas. As desvantagens das uniões adesivas são a necessidade da preparação de uma superfície especial no substrato, dificuldade na inspeção não destrutiva e a não compreensão dos efeitos do ciclo térmico e da alta umidade.

A concentração de tensão promovida por alguns métodos de fixação mecânica utilizadas comumente em materiais metálicos não é adequada para materiais compósitos reforçados com fibras, haja vista que nas proximidades de parafusos ou rebites, o mesmo estará suscetível à divisão intralaminar ou ao descolamento entre matriz e fibras como uma forma de aliviar a tensão localizada. Processos de usinagem ou furação em materiais compósitos podem incluir danos ao material, possibilitando um aumento da capacidade de falha por cisalhamento interlaminar. O resultado final é a não obtenção do potencial total das propriedades físicas de um material compósito.

As juntas coladas consistem na ligação de substratos através de um adesivo estrutrural, cuja cura conduz à criação de uma ligação rígida. Na união de dois substratos

proporcionada pelo adesivo estrutural, conhecida por junta colada, é desejável que esta quando submetida a um esforço mecânico apresente ruptura do substrato sem promover dano na região de adesão.

Segundo SKEIST [18], os adesivos estruturais são polímeros termofixos rígidos ou elastoméricos formados pela reação química de dois componentes que apresentam elevadas propriedades mecânicas e boa resistência química.

Há vários aspectos associados ao comportamento mecânico de uma junta colada, como: o tipo do adesivo, o desenho da junta, o tipo de substrato empregado, o acabamento superficial das superfícies aderidas e o método de aplicação. Portanto, o comportamento mecânico de uma junta colada não depende somente do adesivo, sendo este um processo que envolve algumas variáveis.

A adesão química pode ser considerada diferente da interação mecânica, contudo há uma grande influência física na resistência mecânica da junta colada. O aumento da rugosidade superficial e a aplicação de alguns tratamentos superficiais são utilizados para proporcionar uma melhor interação mecânica.

Os critérios de avaliação empregados em métodos convencionais de união não devem ser utilizados para o adesivo estrutural, pois suas propriedades mecânicas são, geralmente, inferiores às dos substratos. Os mais importantes materiais poliméricos utilizados como adesivo estrutural são: uretano, epóxi e metacrilato.

A Figura 8 apresenta os tipos de juntas coladas mais comumente utilizadas na engenharia.

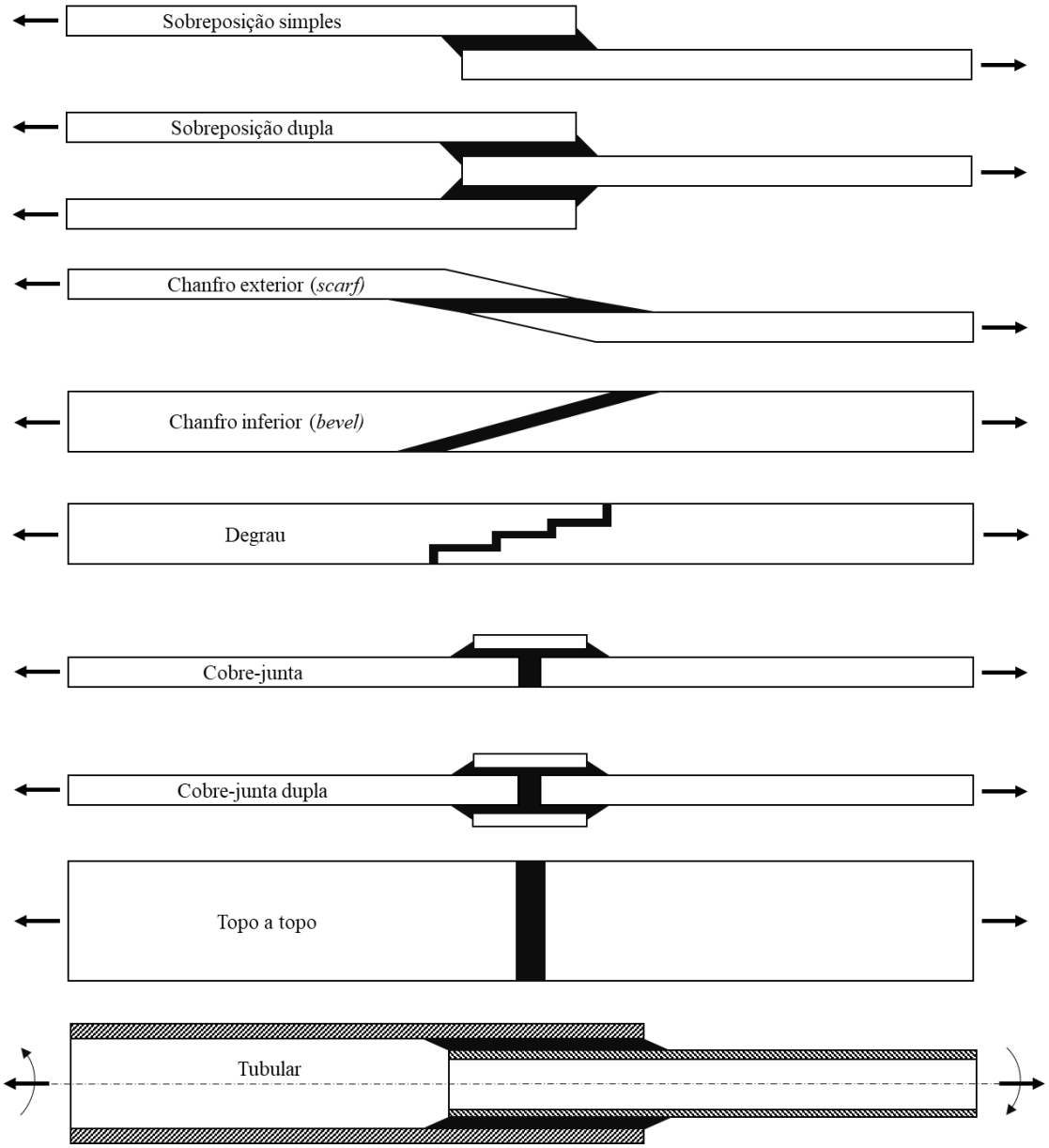


Figura 8 – Tipos de juntas coladas comumente utilizadas na engenharia.

A natureza da falha (falha adesiva, falha coesiva, falha pelo substrato ou por uma combinação destes) fornece informações sobre a qualidade da união e sobre quaisquer outros erros associados à fabricação da junta colada. Nos ensaios mecânicos, as juntas coladas são carregadas de modo que o ponto de falha ocorra pela região do adesivo. A Figura 9 apresenta um desenho esquemático dos diferentes modos de falha presentes em uma junta colada.

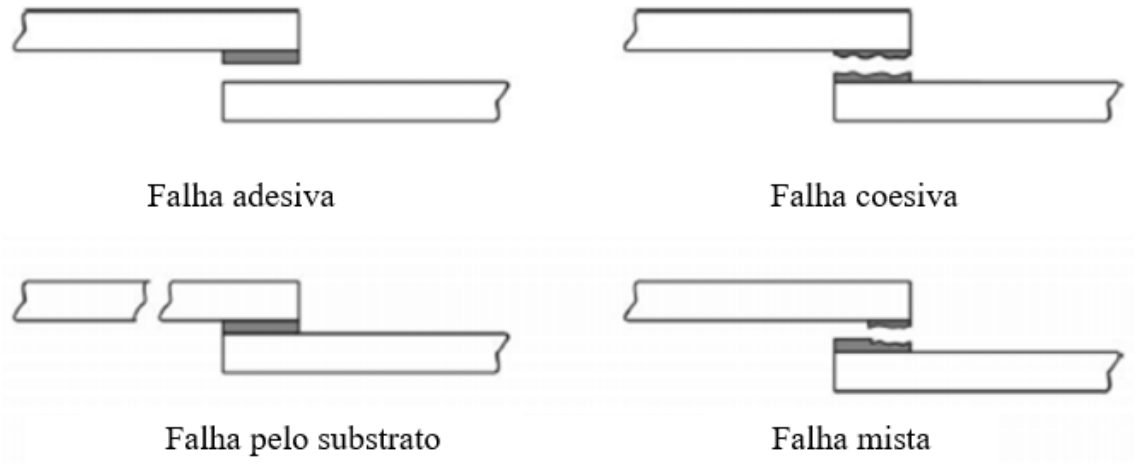


Figura 9 – Representação esquemática dos diferentes modos de falha em juntas coladas de sobreposição simples, adaptada de [19].

Uma falha coesiva em testes com condições controladas e amostras equilibradas, indicam que a adesão se manteve estável apesar das influências que atuam sobre a junta colada (por exemplo, umidade) [20]. Uma falha adesiva, diferentemente, indica que a junta falhou no seu ponto mais fraco, a adesão. Isto pode indicar uma incompatibilidade entre o material do substrato e do adesivo, um pré-tratamento superficial inadequado ou erros de processamento/aplicação. Em substratos laminados, a falha pode ser intralaminar.

Segundo BRÜGEMANN *et al*. [21], a interface entre diferentes materiais, conforme avaliado neste trabalho (camada compósito-metal), pode ser carregada por uma combinação de carregamentos. Todos os carregamentos podem ser decompostos em tensões normais ou de arrancamento, perpendiculares à interface e duas tensões de cisalhamento no plano. A divisão destas corrobora com a categorização de três modos básicos de falha: modo de fratura I, II e III, conforme ilustrado na Figura 10.

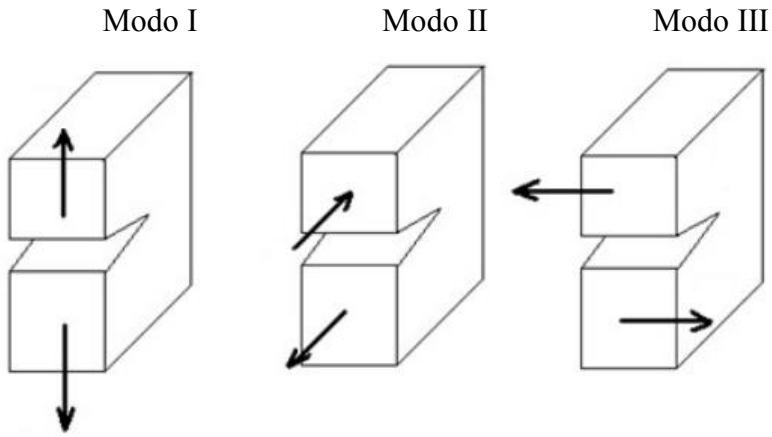


Figura 10 – Esquemático dos três diferentes modos de fratura, adaptada de [21].

O modo I representa a falha devido ao arrancamento (*peeling*), quando um carregamento é aplicado perpendicular à superfície de interface. O modo II é caracterizado como a falha que ocorre pelo cisalhamento no plano da interface. No modo II, a fratura começa na aresta de interface causada pelo carregamento perpendicular a face que contem esta aresta. Na fratura em modo III, cuja falha também é ocasionada pelo cisalhamento no plano, os deslocamentos associados a essa falha são paralelos à borda livre. Para laminados amplos, o último modo de falha é incomum.

1.3 Ensaio de Arrancamento com Roletes Flutuantes

Os testes de resistência da junta colada podem ser classificados em três categorias tradicionais: teste de tração (por exemplo DCB), conforme em [22], testes de cisalhamento (por exemplo SLJ), conforme em [3] e teste peel, conforme apresentado por [8], [23-24], entre outros.

A escolha do tipo de teste a ser empregado depende, diretamente, da propriedade que se deseja avaliar na junta colada. Uma das maneiras de se medir a resistência ao arrancamento de uma junta colada é através de um ensaio de arrancamento com roletes flutuantes. O teste de arrancamento com roletes flutuantes é regido pela norma ASTM D 3167 [7], que determina a utilização de um equipamento de teste, conforme ilustrado na Figura 11. O equipamento de teste é composto por dois roletes que são conectados à máquina do teste por duas chapas de ⅛”.

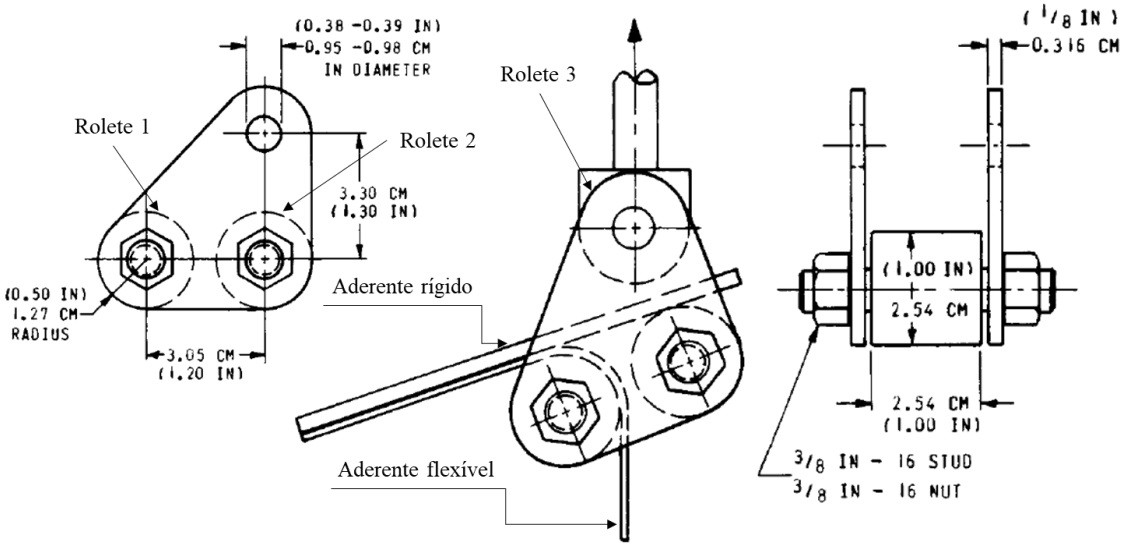


Figura 11 – Dispositivo utilizado no teste de arrancamento com roletes flutuantes, adaptada de [7].

A ASTM D 3167 sugere valores de espessuras para os substratos caso não tenham sido especificados, sendo a espessura do aderente flexível de 0,63 mm e do aderente rígido de 1,63 mm. O comprimento e largura dos substratos também são definidos conforme apresentado na Figura 12. A norma especifica que o comprimento mínimo da região descolada pode variar entre 38,1 mm e 74,2 mm. A ASTM D 3167 especfica a velocidade do teste em 152 mm/min.

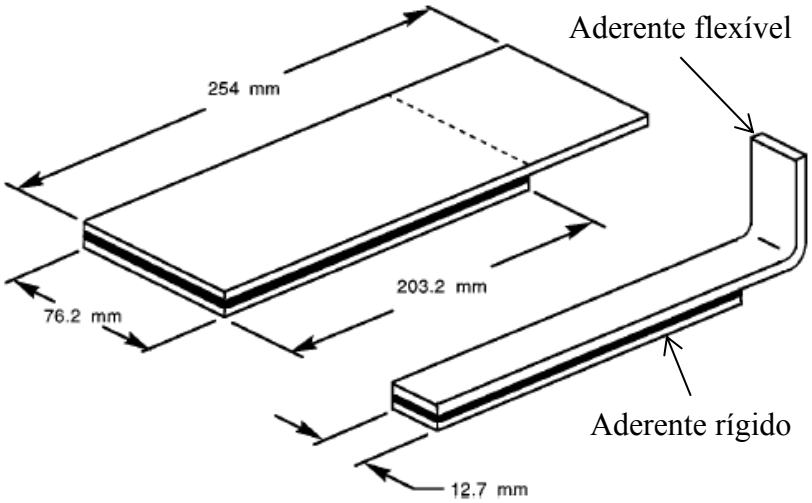


Figura 12 – Amostra do teste segundo ASTM, adaptada de [7].

Este ensaio consiste em avaliar à resistência do adesivo através do arrancamento do aderente flexível em relação ao aderente rígido. A diferenciação entre os aderentes rígido e flexível ocorre através de espessuras dissimilares associadas a cada componente, sendo o corpo flexível de menor espessura. Na Figura 11, o substrato flexível é deformado em torno do rolete 1 e fixado à bancada de teste através de garras que limitam a translação e rotação na sua extremidade, enquanto que o substrato rígido tem a capacidade de se movimentar apoiado no rolete 2, tendo a sua movimentação no plano restrita pelo rolete 3. Os dois roletes inferiores (#1 e #2) têm a possibilidade de rotacionar em torno do rolete superior, que por sua vez é fixado a bancada de teste, permitindo o ajuste do ângulo de arrancamento dependo da resistência mecânica normal e ao cisalhamento do adesivo estrutural avaliado.

Os ensaios de arrancamento são utilizados para uma avaliação comparativa da resistência dos adesivos e de métodos de tratamento superficial, devido a sua alta sensibilidade na identificação de diferenças existentes no comportamento da adesão e coesão da película adesiva [20]. Segundo BRÜGEMANN *et al.* [21], este teste é de natureza qualitativa e é projetado para avaliar a força máxima de arrancamento da interface. Como as tensões e deformações na ponta da trinca são locais e muito complexas, e o resultado é fortemente dependente dos materiais e dimensões usados, esse tipo de teste é usado apenas para estudos comparativos. Para realização dos testes, as amostras são submetidas a forças trativas em suas extremidades não coladas até que haja o rompimento do adesivo e as duas metades da amostra se separem. A força necessária para gerar o rompimento da película adesiva, bem como a distância entre as garras do dispositivo de teste são registradas em um gráfico (*Load vs. Displacement*). A força de arrancamento máxima é determinada por unidade de largura do corpo de prova (neste trabalho a largura do corpo de prova é 25 mm, conforme Figura 13).

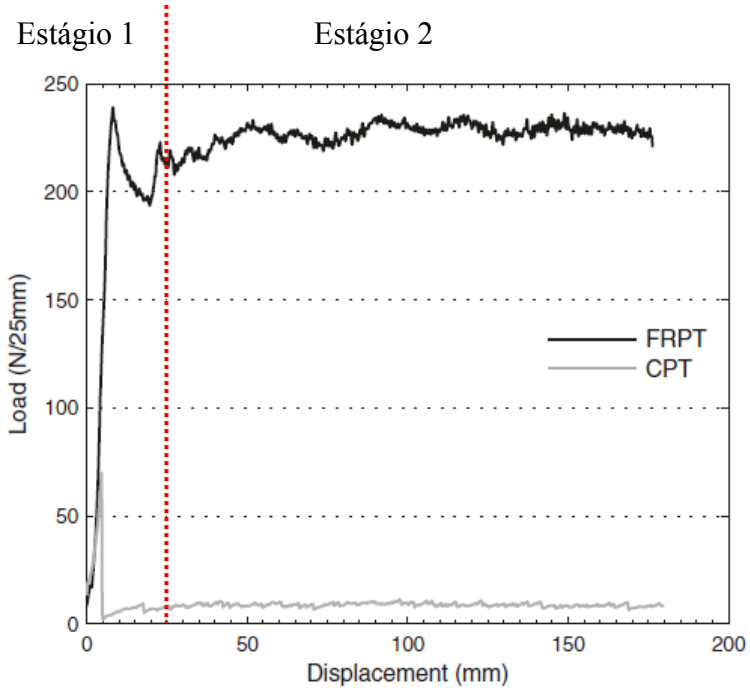


Figura 13 – Exemplo de uma curva carregamento x deslocamento obtida em um teste de arrancamento, adaptada de [8].

Na curva carregamento-deslocamento, ilustrada na Figura 13 é possível identificar dois estágios. O primeiro estágio, comumente identificado nos primeiros 25,4 mm de deslocamento do dispositivo de teste, não é observado *peeling* da interface. Nesta fase, o adesivo está bem aderido aos substratos e começa a suportar os esforços do arrancamento. Uma vez ocorrido o *peeling*, o segundo estágio começa mantendo constante a carga à medida que o arrancamento é observado na amostra de teste [25]. A ASTM D 3167 indica que no mínimo 76,2 mm de deslocamento do dispositivo de teste sejam registrados, desconsiderando-se os primeiros 25,4 mm de deslocamento. A força de arrancamento da junta colada é avaliada através da média dos valores obtidos no segundo estágio, conforme exemplo mostrado na Figura 14.

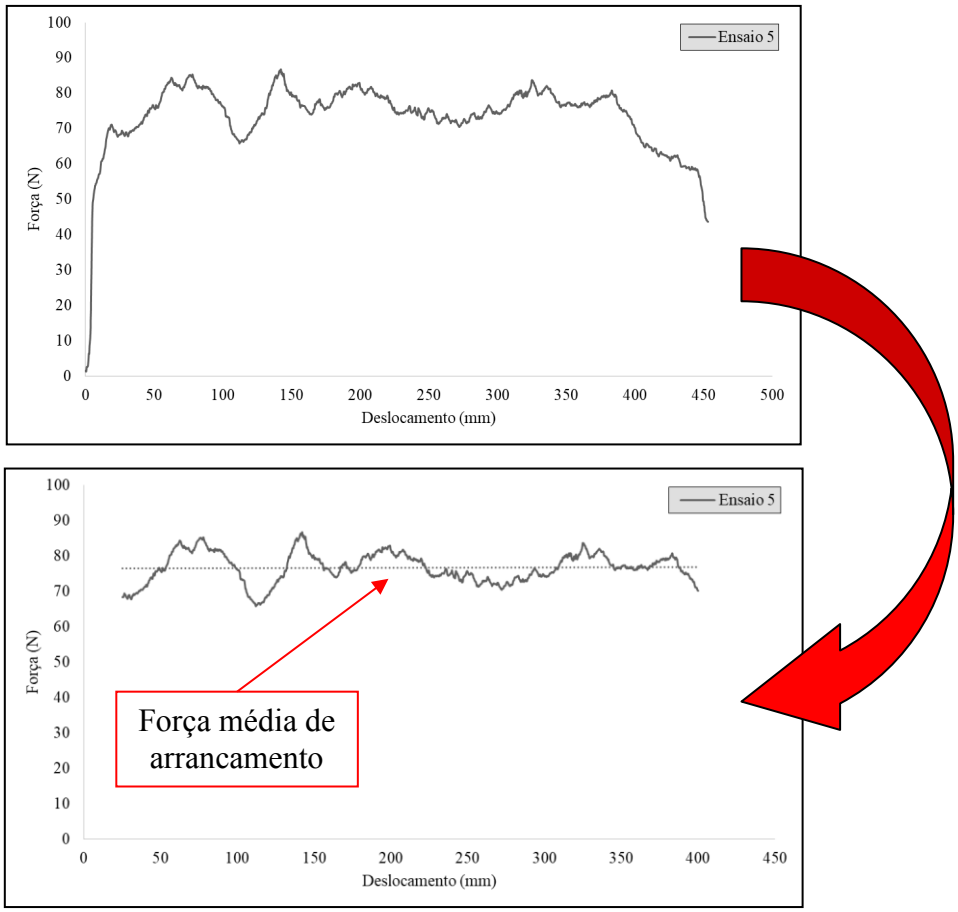


Figura 14 – Curva carregamento x deslocamento obtida em um ensaio de arrancamento, com detalhe para força média de arrancamento. Adaptada de [26].

Este ensaio foi inicialmente desensolvido pela ASTM para avaliar a resistência do adesivo estrutural quando da união entre dois aderentes metálicos. O *Composite Peel Test* é uma adaptação da norma para avaliar a resistência de adesivos com substratos compósitos ou entre compósito-aço. Conforme [8] e [23], o ensaio de arrancamento com roletes flutuantes é apropriado para avaliar a resistência dos adesivos em aderentes não metálicos.

1.4 Método dos Elementos Finitos aplicado as Juntas Coladas

Como uma maneira de complementar as informações obtidas em testes experimentais, a engenharia assistida por computador (CAE) vem se tornado uma ferramenta importante e presente nas atividades da indústria [27]. A avaliação de diversos parâmetros que modificam diretamente à resposta do sistema, sem a necessidade de

realizar testes experimentais ou gerar um custo elevado no desenvolvimento de um protótipo, são vantagens incontestáveis para as mais diversas indústrias, incluindo, a indústria de óleo e gás, naval, aeronáutica, civil, automotiva, entre outras.

Atualmente estão disponíveis diferentes métodos de avaliação numérica para obtenção de solução aproximada de um problema de engenharia, cada um com suas particularidades, vantagens e desvantagens associadas a um problema específico.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma ferramenta matemática amplamente utilizada, predominantemente, na análise do comportamento mecânico de materiais e de estruturas. O MEF consiste em transformar um problema físico que se encontra no domínio contínuo em discreto, constituído por um conjunto de elementos finitos conectados por nós, o que caracteriza a malha de elementos finitos. A solução do problema físico não só depende da escolha da malha mais adequada como também das funções de forma utilizadas na formulação do elemento.

O MEF foi desenvolvido em 1909 por Walter Ritz (1878-1909) para determinar solução aproximada de problemas de corpos deformáveis em mecânica dos sólidos, onde o funcional de energia era aproximado por funções conhecidas com coeficientes a serem determinados. Em 1943, Richard Courant (1888-1972) aumentou consideravelmente as possibilidades do método de Ritz introduzindo funções lineares especiais definidas sobre regiões triangulares e aplicou o método para a solução de problemas de torção. Sendo incógnitas, os valores das funções nos pontos nodais das regiões triangulares foram determinados. Assim, a principal restrição das funções de Ritz - a satisfação das condições de contorno - foi eliminada. O método de Ritz, junto com as modificações de Courant, é similar ao FEM proposto por Ray William Clough Jr. muitos anos depois. Coube a Clough (1960) introduzir, pela primeira vez, o termo elemento finito no artigo *The finite element method in plane stress analysis*.

A aplicação deste método era destinada a resolução de problemas de estruturas treliçadas, entretanto, o desenvolvimento métodos numéricos mais complexos permitiu uma maior abrangência, sendo a indústria aeronáutica à pioneira na utilização das técnicas matriciais de análise estrutural. Em 1956, Turner, Clough, Martin e Topp propuseram, com base na análise matricial, que se modelasse painéis de aeronaves a partir de pequenos triângulos, capazes de cobrir toda a superfície de cada peça, [28-29].

Segundo COOK [30], uma definição não sofisticada do método consiste na divisão da estrutura em vários elementos (pedaços da estrutura), descrevendo o comportamento de cada elemento de uma forma simples e depois reconectando esses elementos nos nós, como se os nós fossem pinos ou colas que unem o contorno desses elementos, Figura 15.

A Figura 16 ilustra um exemplo típico de MEF utilizado para estudo de delaminação entre o CFRP e uma placa de aço, onde as camadas individuais são representadas por elementos sólidos e a interface por elementos de contato, que por sua vez incluem modelo de falha.

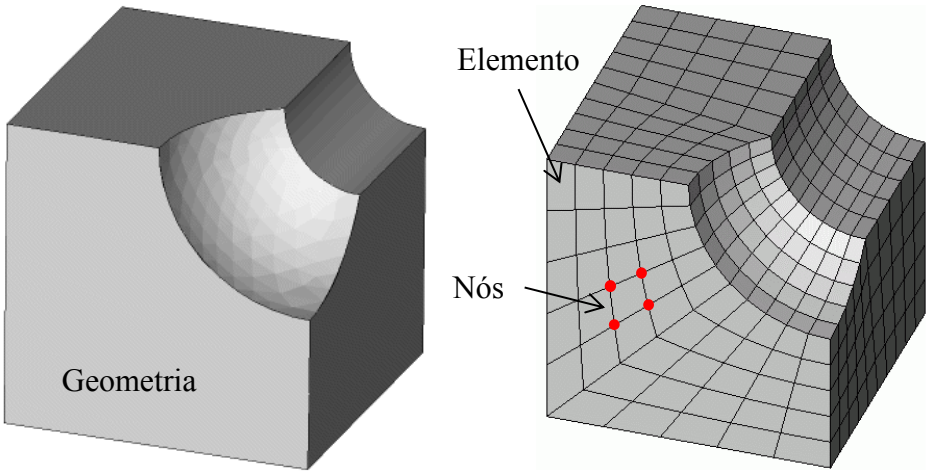


Figura 15 – Malha hexaédrica de elementos finitos.

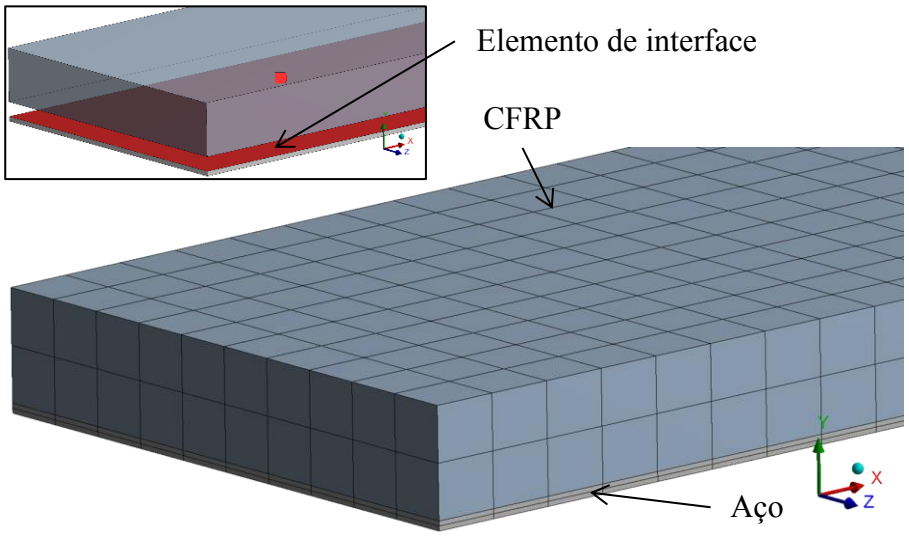


Figura 16 – Representação de uma malha de elementos finitos aplicado à delaminação entre CFRP e placa de aço.

1.4.1 Modelagem de juntas coladas

A camada de adesivo pode ser modelada de diferentes formas, tais como: representação geométrica do adesivo [31], elementos de interface ou elementos de contato, conforme [32-33].

A representação geométrica do adesivo gera um custo computacional elevado comparado as outras duas técnicas mencionadas, pois a baixa espessura do mesmo acarreta num elevado número de elementos pequenos, corroborando para a redução do passo de tempo de análise e, consequentemente, tempo final de análise. Esta aboradagem é recomendada quando o material do adesivo tem comportamento dúctil, permitindo capturar a distribuição de esforços entre o aderente para o adesivo.

Esta técnica combinada à caracterização da resistência da interface entre adesivo *versus* aderente permite representar os diferentes modos de falha (adesiva, coesiva, pelo substrato ou mista), sendo dependente do carregamento externo e resistência dos componentes avaliados. A falha adesiva ou pelo substrato pode ser representada por um critério de falha para o material do adesivo e substrato. Já a falha coesiva pode ser representada através de elementos de interface ou elementos de contato, sendo a falha dependente dos valores de critério.

A representação da fratura ou delaminação ao longo de uma interface entre as faces de um compósito ou entre dois substratos colados é de fundamental importância para o estudo da falha das interfaces.

Inicialmente, os métodos teóricos estimavam a falha através da comparação entre a máxima tensão no adesivo e a resistência do material, sendo estes limitados para distribuição de tensões no adesivo em geometrias simples, tais como juntas de sobreposição simples (SLJ) e de sobreposição dupla (DLJ) [34], como mostrado na Figura 17.

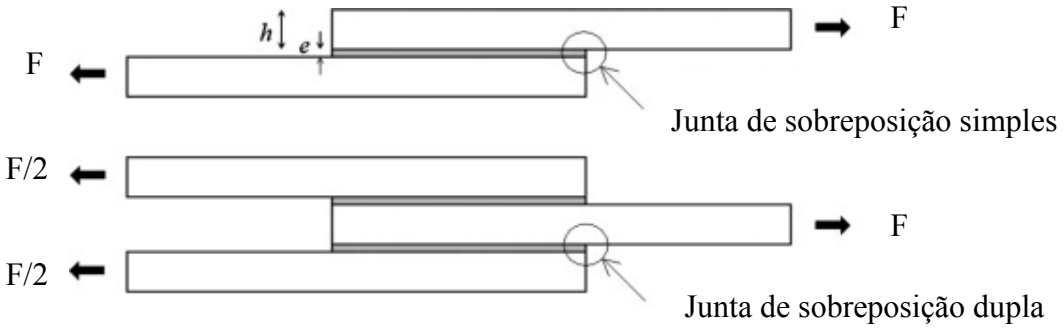


Figura 17 – Exemplo de juntas de sobreposição simples (SLJ) e dupla (DLJ), adaptada de [35].

O MEF começou a ser desenvolvido algumas décadas mais tarde para avaliar juntas coladas, conforme é apresentado em [36], considerando os critérios de tensão/deformação ou critérios para predição de falha baseados na mecânica da fratura [37].

Embora promissoras, a predição da falha baseada na tensão/deformação é totalmente dependente do tamanho de malha utilizada nas regiões críticas, enquanto que, os critérios de falha baseados na mecânica da fratura, tais como o *Virtual Crack Closure Technique* (VCCT) são restritos à Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) e necessitam de uma trinca inicial.

As falhas das interfaces podem ser representadas através de métodos tradicionais da mecânica da fratura, tal como a liberação nodal, que ocorre quando um critério de falha é atingido. O mecanismo da fratura também pode ser representado através da relação entre os esforços trativos e deslocamentos, que em outras palavras introduzem a energia crítica da fratura, que é também a energia requerida para promover a separação das interfaces [38]. Esta técnica é chamada de modelo de zona coesiva (CZM, *Cohesive Zone Model*).

Conforme apresentado em [39-40], esta técnica tem sido utilizada na última década para a previsão de resistência de juntas coladas, com o objetivo de complementar as análises de elementos finitos na simulação do crescimento de trinca em materiais contínuos ou interfaces entre diferentes materiais.

O modelo CZM consiste de uma relação constitutiva entre a tração (T), que age na interface, e a correspondente separação da interface (δ), que é o deslocamento relativo entre às superfícies da interface. As definições da tração e separação dependem, diretamente, do tipo do elemento e do modelo de material.

A superfície de interface de uma junta pode ser representada por um conjunto de elementos de interface ou elementos de contato, e um modelo CZM pode ser utilizado para caracterizar as relações constitutivas da interface.

Várias pesquisas têm sido realizadas para avaliar o tipo de lei tração-deslocamento utilizada no modelo CZM bilinear [41-43], parabólica-linear [44], exponencial [45-46] e trapezoidal [47-48]. ALFANO [49] avaliou a influência dos diferentes tipos de lei tração-deslocamento numa simulação de um problema de descolagem (*debonding*). O ensaio DCB foi utilizado para obter os resultados e concluir que a solução é independente do tipo de lei utilizada. Segundo JANG *et al.* [25], dentre todos os modelos propostos, o bilinear é o mais eficiente em termos de custo computacional e tem sido utilizado em muitas pesquisas, por exemplo [24] e [50].

XIAO *et al.* [51] recomenda que a camada de adesivo entre o aço e o CFRP seja substituído por um elemento de contato do tipo colado. A separação entre os componentes é considerada por um critério de falha, que combinada ao contato colado, é representada por um comando CONTACT_TIEBREAK_{X} (onde X = SURFACE_TO_SURFACE) no LS-DYNA® [11]. A separação é governada pela lei constitutiva tração-deslocamento nas direções normal e tangencial. Esta abordagem é similar ao modelo CZM.

1.4.2 Modelo de descolamento para elementos de contato

A delaminação representada numericamente através de elementos de contato é chamada de *debonding* ou descolamento. A formulação implementada no LS-DYNA® [11] tem a capacidade de dissipar energia durante o processo de separação das superfícies em contato através de um critério de falha.

A dissipação de energia durante o descolamento segue uma relação linear entre a força e o deslocamento na definição do contato. De acordo com BARBERO [38], durante a deformação dos substratos, a separação resultante entre as faces outrora conectadas é proporcional a rigidez do elemento coesivo. Desse modo, as forças transmitidas pelo elemento de contato geram uma tensão de contato, que é reduzida a zero quando critério do máximo deslocamento entre as faces em contato é atingido. Depois de atingido o critério de falha, se os substratos voltarem a estabelecer contato, o deslizamento e a separação entre os componentes passa a ser permitido. A interação entre os aderentes para

a ser definida através de um comando de contato do tipo *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE. Este comando tem a característica de permitir o deslizamento e a separação entre os componentes, prevenindo a penetração.

O contato do tipo tiebreak permite a separação entre as superfícies da junta colada usando o critério de falha apresentado na equação 1.

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{NFLS}\right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{SFLS}\right)^2 \geq 1 \qquad (1)$$

Onde NFLS é tensão normal de falha e SFLS tensão de cisalhamento na falha. Há um terceiro parâmetro definido para caracterizar o completo descolamento entre as superfícies coladas, que é o CCOD.

Os parâmetros NFLS e SFLS controlam a ocorrência da separação, enquanto que o CCOD/CCRIT controla a energia $G_i[J/m^2]$ liberada no descolamento entre os substratos, conforme Figura 18. Depois de atingido a tensão de critério para haver o descolamento entre os substratos, o dano é uma função linear da distância entre os pontos inicialmente em contato. Quando esta distância é igual ao CCOD/CCRIT, no ponto C, o dano está completamente desenvolvido e ocorre a falha da interface.

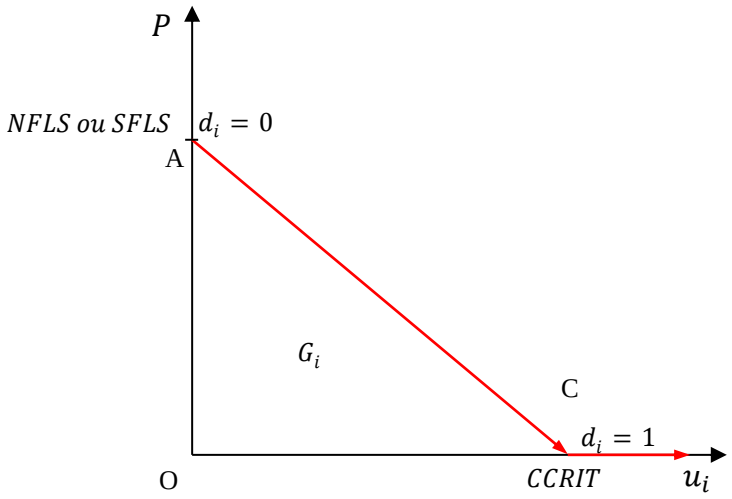


Figura 18 – Modelo de falha tensão *versus* deslocamento.

Assumindo que não ocorre reversão de carga, a energia liberada devido a falha da interface é dada ela área abaixo da curva AOC e é aproximadamente:

$$G_i = \frac{1}{2} P * CCRIT \tag{2}$$

Onde P é descrito por (3) na iniciação do dano.

$$P = \sqrt{\max(\sigma_n, 0)^2 + |\sigma_s|^2} \tag{3}$$

Esta interface pode ser utilizada para simular a propagação da trinca. Para a energia ser corrigida, a rigidez de contato de penalidade deve ser maior que:

$$K_{contato} > \frac{MIN(NFLS, SFLS)}{CCRIT} \tag{4}$$

Os nós inicialmente coincidentes vão descolar em modo I pelo *gap* entre as faces da interface ou descolar pelo deslizamento relativo (modo II ou III) entre os substratos, conforme Figura 10.

2. Materiais e Métodos

Neste capítulo são apresentadas as características mecânicas dos materiais e o detalhamento do método numérico empregado na avaliação da junta colada.

Detalhes sobre as propriedades mecânicas do CFRP, geometria e sequência de emplilhamento serão abordadas, seguidos pela metodologia numérica para representação do comportamento da junta colada CFRP-aço submetido a um ensaio de arrancamento com roletes flutuantes.

2.1 Materiais

As propriedades de adesão entre o compósito e o aço foram avaliadas através de ensaios de arrancamento considerando um laminado CFRP bidirecional, composto por seis lâminas de tecido de fibra de carbono orientadas a 0/90°, totalizando uma espessura de 4,6 mm. O componente metálico é uma chapa de aço carbono ASTM A36 de 0,4 mm de espessura. Os corpos de prova são compostos por uma união adesiva entre o substrato rígido (CFRP) e o substrato flexível (aço carbono).

Os corpos de prova CFRP-aço utilizados no ensaio de arrancamento possuem 500 mm de comprimento do aderente rígido, 550 mm de comprimento do aderente flexível e largura de 25 mm, conforme mostrado na Figura 19.

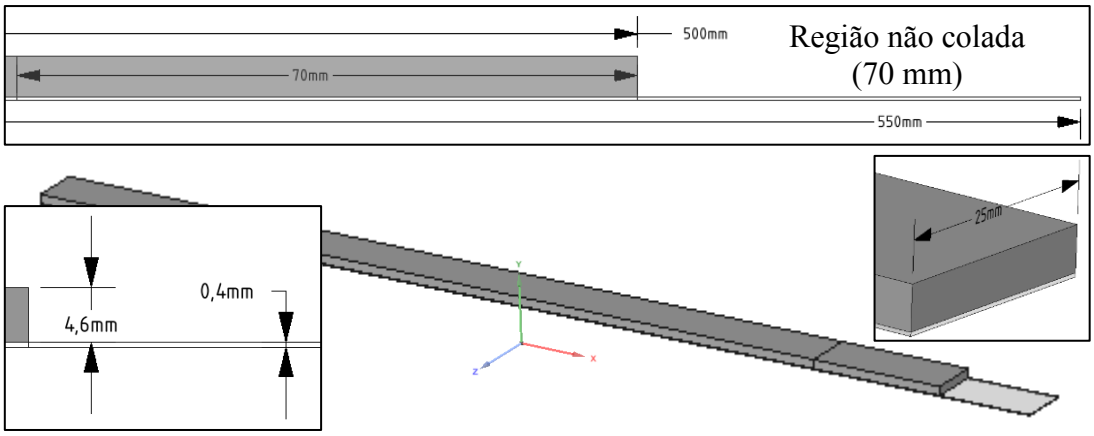


Figura 19 – Representação dimensional dos corpos de prova CFRP-aço.

O processo de manufatura do substrato rígido foi realizado através da laminação manual, com o empilhamento de cada tecido de fibra de caborno (massa específica de 430 g/m^2) e sua impreginação em matriz epóxi do tipo PIPEFIX® (Novatec Ltd., Rio de Janeiro, Brasil), como ilustrado na Figura 20. O processo de cura foi realizado à temperatura ambiente durante duas horas.



Figura 20 – Fabricação dos corpos de prova CFRP-aço [26].

As propriedades mecânicas do componente metálico (ASTM A36) são apresentadas na Tabela 1, considerando as suas propriedades mínimas.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do aço (ASTM A36).

Material	ρ (kg/m^3)	E (GPa)	ν	σ_y (MPa)	H (GPa)
Aço	7850	210	0,30	250	2,02

A colagem entre os substratos foi realizada com resina epóxi NVT201E® (Novatech Ltd., Rio de Janeiro, Brasil) e as propriedades mecânicas elásticas do compósito foram obtidas através de um ensaio de tração do CFRP, com matriz epóxi, apresentado em [52]. Quatro corpos de provas com dimensões 250 x 26 x 6,35 mm e 20 camadas de reforço orientadas 0/90° e ±45° foram avaliados neste ensaio. Cada camada de tecido de fibra de carbono possui uma espessura de 0,3175 mm, compondo um laminado de 6,35 mm. Neste ensaio de tração, os corpos de prova foram fixados nas garras

da bancada de teste em ambas as extremidades. Em uma das garras, o deslocamento do cabeçote da máquina produz um deslocamento na peça, aplicando o carregamento de tração no material, conforme Figura 21. A força e deslocamento são os parâmetros avaliados neste ensaio e armazenados automaticamente durante o ensaio, conforme indicado pela norma ISO 527 [53]. A distância entre as garras foi de 136 mm para ambos os corpos de prova.

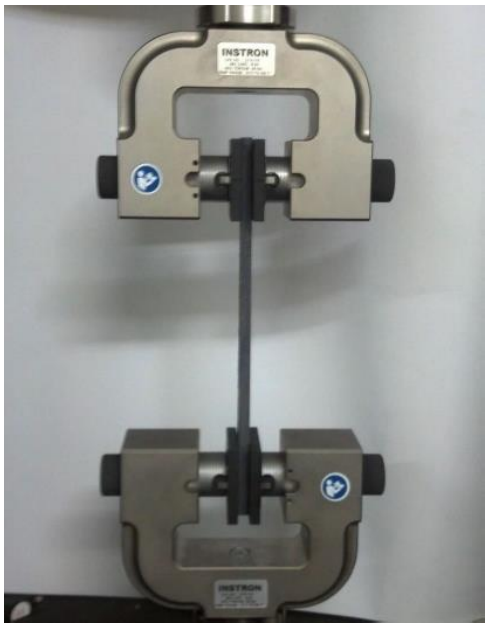


Figura 21 – Bancada de teste e amostra de CFRP – Ensaio de tração [52].

O resultado de força e deslocamento medidos durante os dois ensaios foram transformados em resultados de tensão e deformação, conforme Figura 22, para o laminado 0/90°, e Figura 23, para o laminado ±45°.

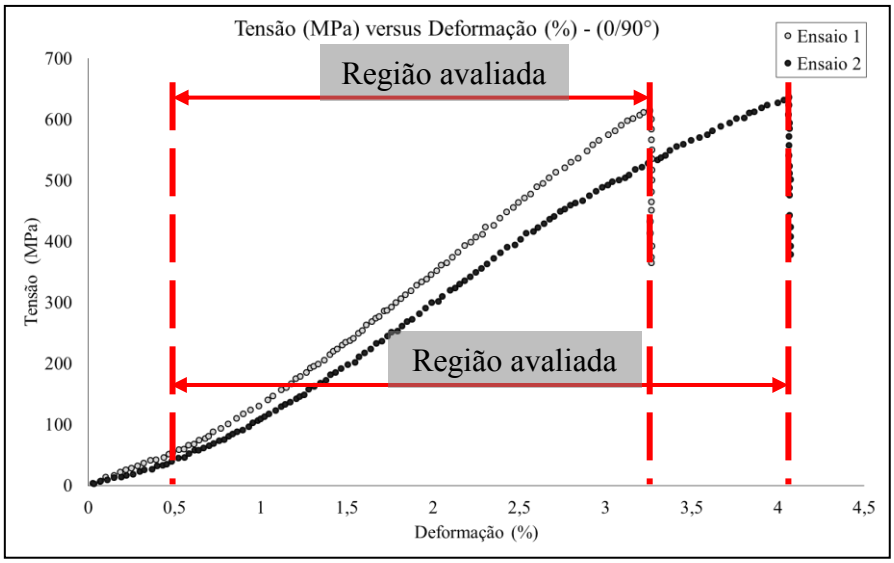


Figura 22 – Resultado dos ensaios de tração para o laminado 0/90°, adaptada de [52].

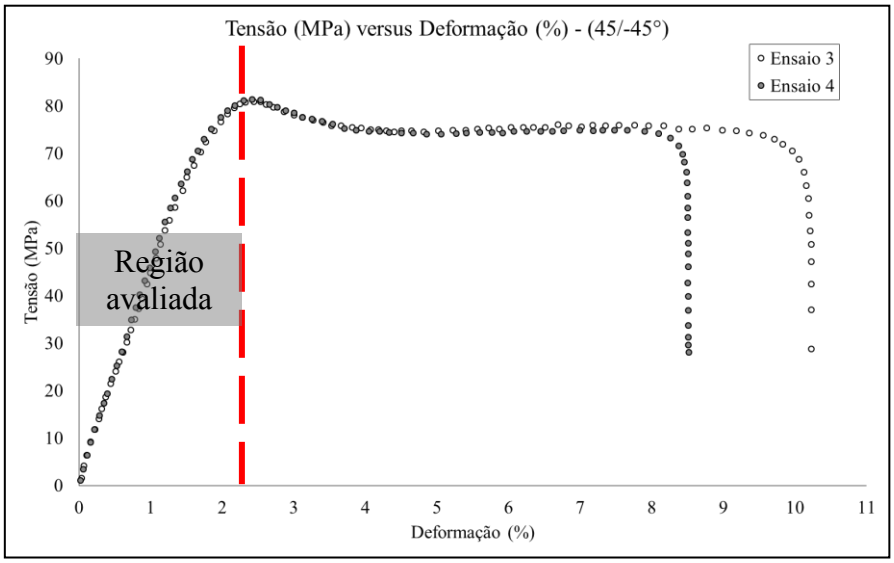


Figura 23 – Resultado dos ensaios de tração para o laminado 45/-45°, adaptada de [52].

Conforme observado por AROUCHE [52], os primeiros 0,5% (Figura 22) de deformação são ocasionados pela acomodação inicial do corpo de prova e, portanto, foram desconsiderados para efeito de comparação com o FEA e determinação das propriedades mecânicas da lâmina do CFRP. As propriedades ortotrópicas do compósito CFRP foram calibradas utilizando como referência a média das curvas experimentais do laminado 0/90° e a curva média do laminado com orientação 45/-45°. Um modelo de elementos finitos foi utilizado na predição das propriedades mecânicas através de um

processo iterativo de comparação com os dados experimentais. A comparação foi realizada utilizando-se os softwares ANSYS ACP® e ANSYS Workbench® [54].

As propriedades mecânicas obtidas deste processo iterativo são apresentadas na Tabela 2. Os detalhes do modelo de modelo de elementos finitos, bem como a comparação com a curva experimental serão apresentados nas próximas seções.

Tabela 2 – Propriedades ortotrópicas do CFRP ao nível da lâmina.

Material	E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	E_{33} (GPa)	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}	G_{12} (MPa)	G_{23} (MPa)	G_{13} (MPa)
$CFRP$	19,78	1,25	1,25	0,27	0,42	0,27	1280	450	1280

A Figura 24 mostra a curva força *versus* deslocamento obtida no ensaio de arrancamento para três corpos de prova CFRP-aço de 500 mm testados na condição sem envelhecimento. Observa-se uma grande irregularidade nas curvas obtidas nos ensaios 4 e 6, portanto, estes resultados serão descartados para efeito de comparação com os resultados numéricos. Somente a condição da junta colada sem envelhecimento será avaliada neste trabalho.

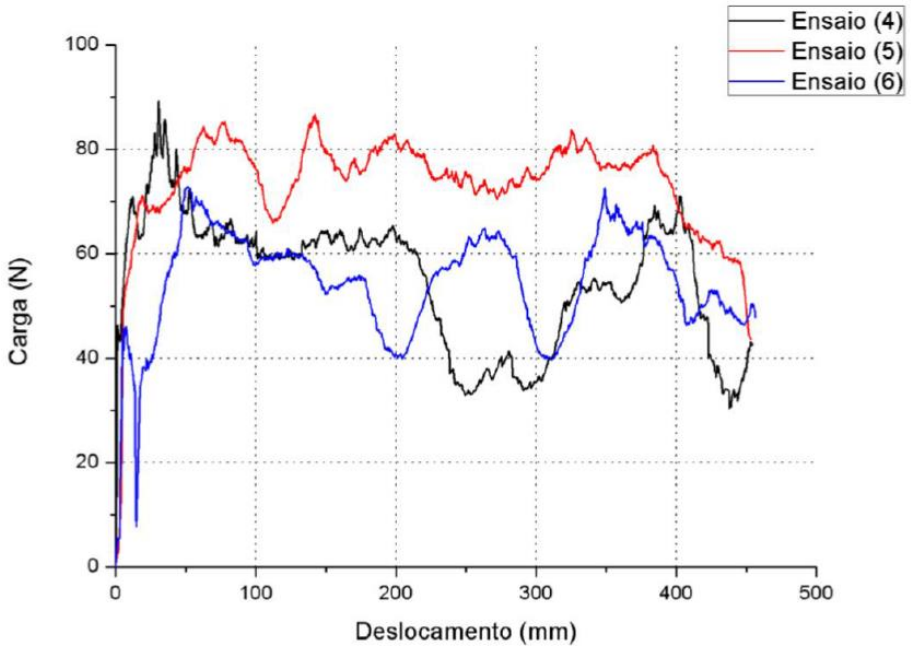


Figura 24 – Resultados de carga *versus* deslocamento para os corpos de prova CFRP-aço com 500 mm, sem envelhecimento [55].

2.2 Metodologia Numérica

2.2.1 Representação do ensaio à tração do laminado CFRP

A primeira etapa deste trabalho foi dedicada em representar numericamente o ensaio de tração do laminado 0/90° e ±45° com 20 camadas, através de elementos finitos sólidos tipo casca (SOLSH190[1]). O principal objetivo é caracterizar as propriedades ortotrópicas do compósito, a serem utilizadas no modelo numérico do ensaio de arrancamento. A Figura 22 e Figura 23 apresentam a curva tensão *versus* deformação dos laminados.

Nesta fase do trabalho, os softwares comerciais ANSYS ACP® e ANSYS Workbench® [54] foram utilizados para modelar o comportamento à tração do compósito avaliado, na sua versão 15.0.

O processo de elaboração do modelo de elementos finitos consiste na representação geométrica dos corpos de prova através de um corpo de superfície, discretização do corpo de superfície em elementos de casca, utilização do ACP para declarar as camadas do laminado nos elementos de casca e transformar os elementos de casca em elementos sólido tipo casca, definição das condições de contorno e carregamento no modelo sólido tipo casca, *solver* e pós-processamento no ANSYS Workbench® [54].

O elemento do tipo SOLSH190 é usado para simular estruturas de casca com uma ampla faixa de espessura (de fina a moderadamente espessa). O elemento possui a topologia de elemento sólido contínuo e apresenta conectividade de oito nós com três graus de liberdade em cada nó: translações nas direções nodais x, y e z.

A utilização de elementos sólidos tipo casca de primeira ordem permite uma representação assertiva de cascas finas, sem os problemas de travamento gerados por elementos sólidos comuns de primeira ordem. De acordo com ALMEIDA [27], essa abordagem é vantajosa do ponto de vista computacional pois, para os elementos sólidos comuns, há a necessidade de uma maior discretização dos elementos, bem como a utilização de elementos de segunda ordem.

[1] Nomenclatura do ANSYS® para indicar o elemento sólido tipo casca.

A boa acurácia na modelagem de compósitos laminados a partir dos elementos sólido tipo casca é devido a utilização da teoria FSDT (*first-order shear deformation theory*), também conhecida pela teoria de casca de Mindlin-Reissner. A Figura 25 apresenta a geometria típica deste elemento, com detalhe para a sua opção prismática degenerada.

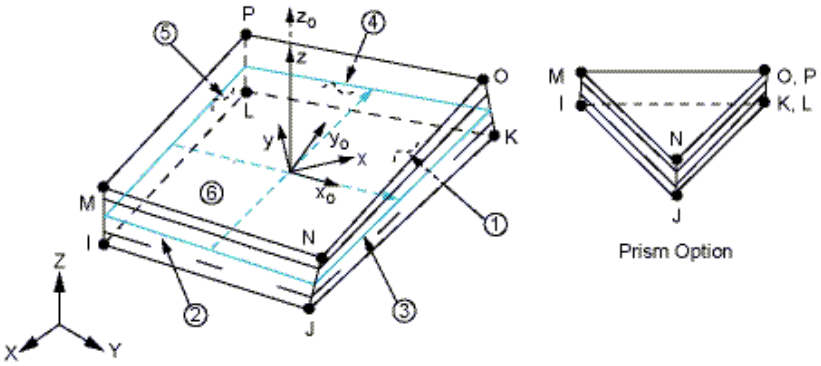


Figura 25 – Geometria típica do elemento SOLSH190, [56].

Neste trabalho, as propriedades da camada de fibra de carbono foram calibradas com os dados experimentais, portanto, cada camada é implementada a nível da lâmina no software ACP. A Figura 26 ilustra as sequências 0/90° e +45/-45° de lâminas declaradas, totalizando 20 camadas. Ainda no software ACP, os elementos de casca são transformados em elementos sólidos tipo casca, de forma que a análise de elementos finitos seja realizada considerando um elemento SOLSH190.

É importante ressaltar que a adesão entre as camadas foi idealizada como perfeita, sem qualquer capacidade de delaminação com a aplicação do carregamento.

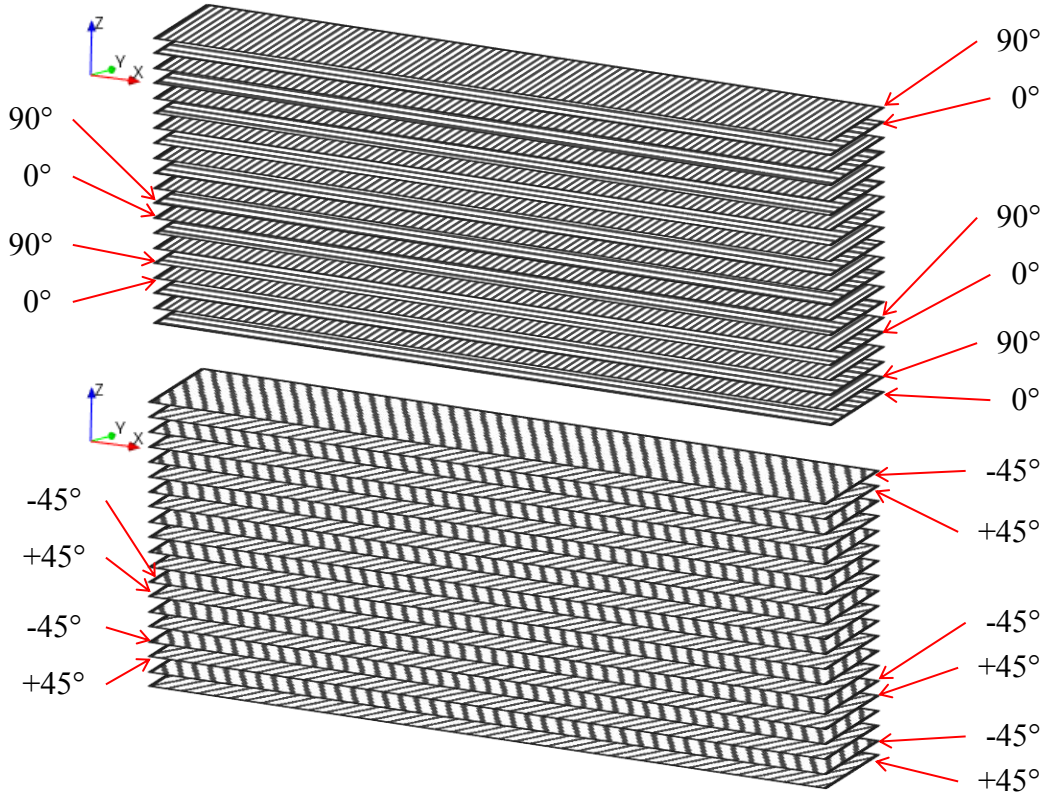


Figura 26 – Representação das 20 camadas do laminado 0/90° e ±45°.

Esta primeira etapa possibilitou determinar as propriedades ortotrópicas da lâmina do compósito, o que implica em mais assertividade na calibração das propriedades coesivas da junta colada da segunda etapa (ensaio de arrancamento com roletes flutuantes).

2.2.2 Representação do ensaio de arrancamento da junta CFRP-aço

A segunda etapa do trabalho consistiu na representação numérica do ensaio de arrancamento com roletes flutuantes da junta colada CFRP-aço, considerando as propriedades coesivas da interface compósito-metal, propriedades ortotrópicas do compósito e o comportamento elasto-plástico do corpo metálico. A geometria do corpo de prova e dispositivo de teste são apresentados na Figura 27. O modelo de elementos finitos tem como objetivo a correta representação do comportamento do sistema (propriedades do corpo de prova e dinâmica permitida pelo dispositivo de teste) e

calibração dos parâmetros coesivos com os resultados levantados por [26], através dos métodos experimentais.

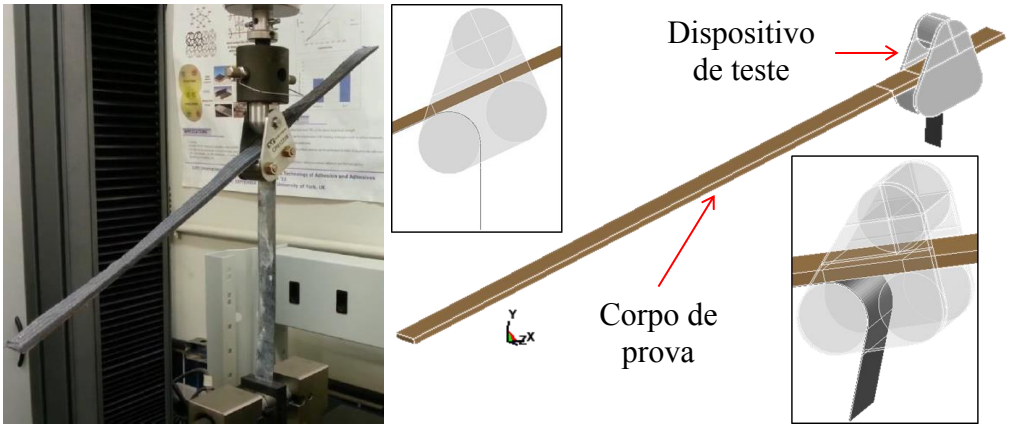


Figura 27 – Geometria do corpo de prova e dispositivo de teste. À esquerda imagem adaptada de [26].

Os componentes do corpo de prova, bem como todo o dispositivo de teste foram modelados como corpos sólidos com comportamento flexível, com exceção do dispositivo de teste que é simulado com comportamento rígido. Esta abordagem reduz o custo computacional, pois somente os elementos e nós dos corpos flexíveis são considerados, eliminando qualquer parâmetro de calibração que poderia ser direcionado ao dispositivo de teste, tal como a incerteza na correta propriedade do material.

O laminado é composto por seis camadas de fibra de carbono empilhadas na sequência 0/90°, compondo uma espessura total de 4,6 mm, conforme ilustrado na Figura 28. Na interface com o corpo metálico as fibras estão orientadas à 0°. A representação numérica do compósito foi realizada através de um corpo sólido com propriedade equivalente às seis camadas. Esta abordagem foi adotada com o objetivo de reduzir o tempo computacional das análises e, portanto, considera que a adesão entre as lâminas do CFRP é perfeita, sem qualquer capacidade de delaminação com a aplicação do carregamento. A delaminação só é representada na interface compósito-metal.

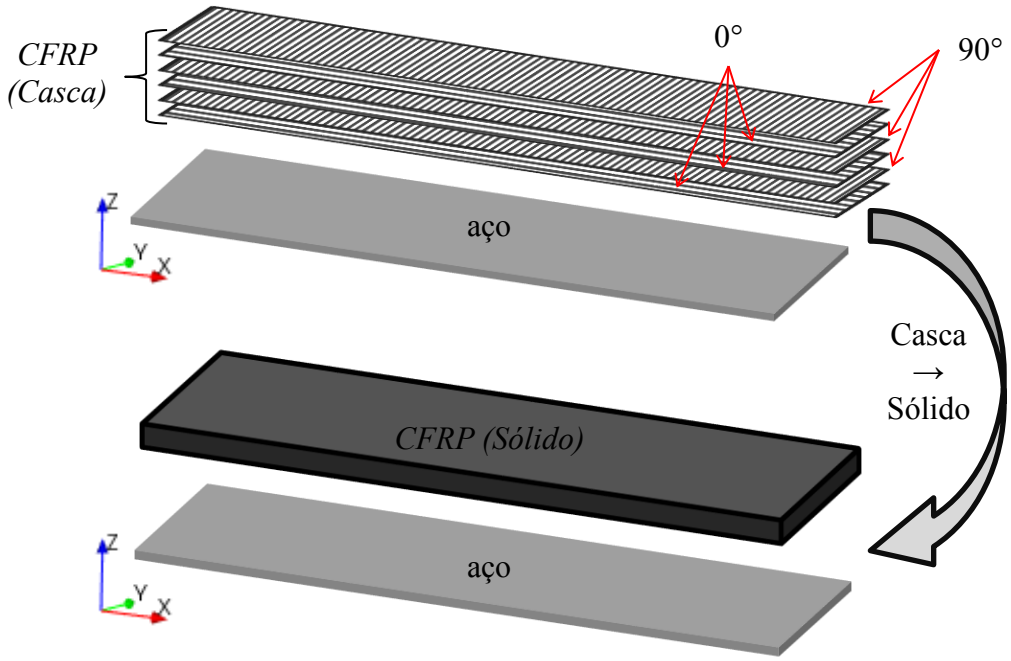


Figura 28 – Representação das camadas do laminado 0/90° e metal.

Utilizando as relações da macromecânica, as propriedades da lâmina foram transformadas em propriedades do laminado, podendo ser representado por um sólido equivalente, sem a necessidade de declarar camada por camada do CFRP. O compósito foi declarado como MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC (MAT #002), com comportamento elástico e ortotrópico através do LS-DYNA® [11]. As propriedades ortotrópicas do CFRP, a nível do laminado é apresentada na Tabela 3. O aderente metálico foi considerado com comportamento elasto-plástico através do modelo de material MAT 123, a partir do comando MAT_MODIFIED_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY.

Tabela 3 – Propriedades ortotrópicas do CFRP ao nível do laminado (seis camadas).

Material	E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	E_{33} (GPa)	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}	G_{12} (MPa)	G_{23} (MPa)	G_{13} (MPa)
CFRP	10,55	10,55	1,47	0,03	0,39	0,39	1280	865	865

A malha de elementos finitos empregada na discretização dos corpos sólidos é composta por elementos hexaédricos de primeira ordem do tipo SOLID185, com geometria conforme apresentada na Figura 29. Este elemento possui oito nós com três graus de liberdade em cada nó: translações nas direções nodais x, y e z.

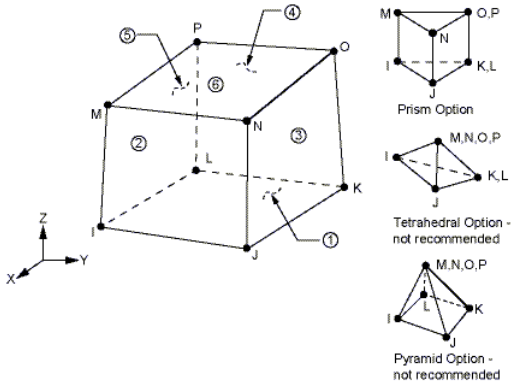


Figura 29 – Geometria do elemento SOLID185 [56].

A Figura 30 apresenta a malha de elementos finitos utilizada na discretização dos corpos de prova, com detalhe para região de interface CFRP-aço.

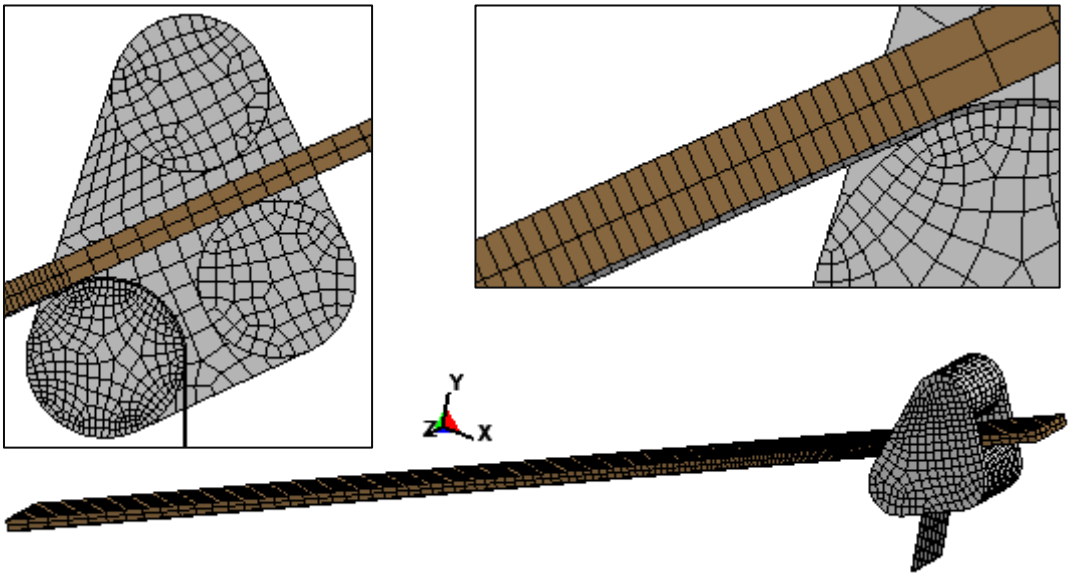


Figura 30 – Malha de elementos finitos – modelo *peel test*.

As condições de contorno foram aplicadas nos componentes 1 (aderente flexível) e 2 (rolete do dispositivo de teste, fixado a bancada de teste), conforme Figura 31. No aderente flexível (1), para representar a restrição imposta pela bancada de teste através das garras, as translações e rotações no espaço, em 25,4 mm do corpo de prova, foram declaradas nulas através do comando BOUNDARY_SPC_SET no LS-DYNA® [11]. Para o rolete do dispositivo de teste (2), somente a translação em y foi considerada live, sendo

os outros graus de liberdade fixos no espaço, tais como: translações em x e z e rotações em torno dos eixos x, y e z. Em y foi considerado um deslocamento prescrito de 500 mm ao longo da análise. As condições de contorno aplicadas ao corpo rígido (2) foram consideradas através do comando BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID. Pelo fato deste componente ter comportamento rígido e o rolete estar dividido em quatro corpos, as condições de contorno são aplicadas somente ao corpo declarado como *master*, sendo a mesma estendida aos corpos tratados como *slave* através do comando CONSTRAINED_RIGID_BODIES. Este comando cria um acoplamento rígido entre o corpo *master* e cada componente *slave*, transmitindo todos os graus de liberadade declarados ao componente *master*.

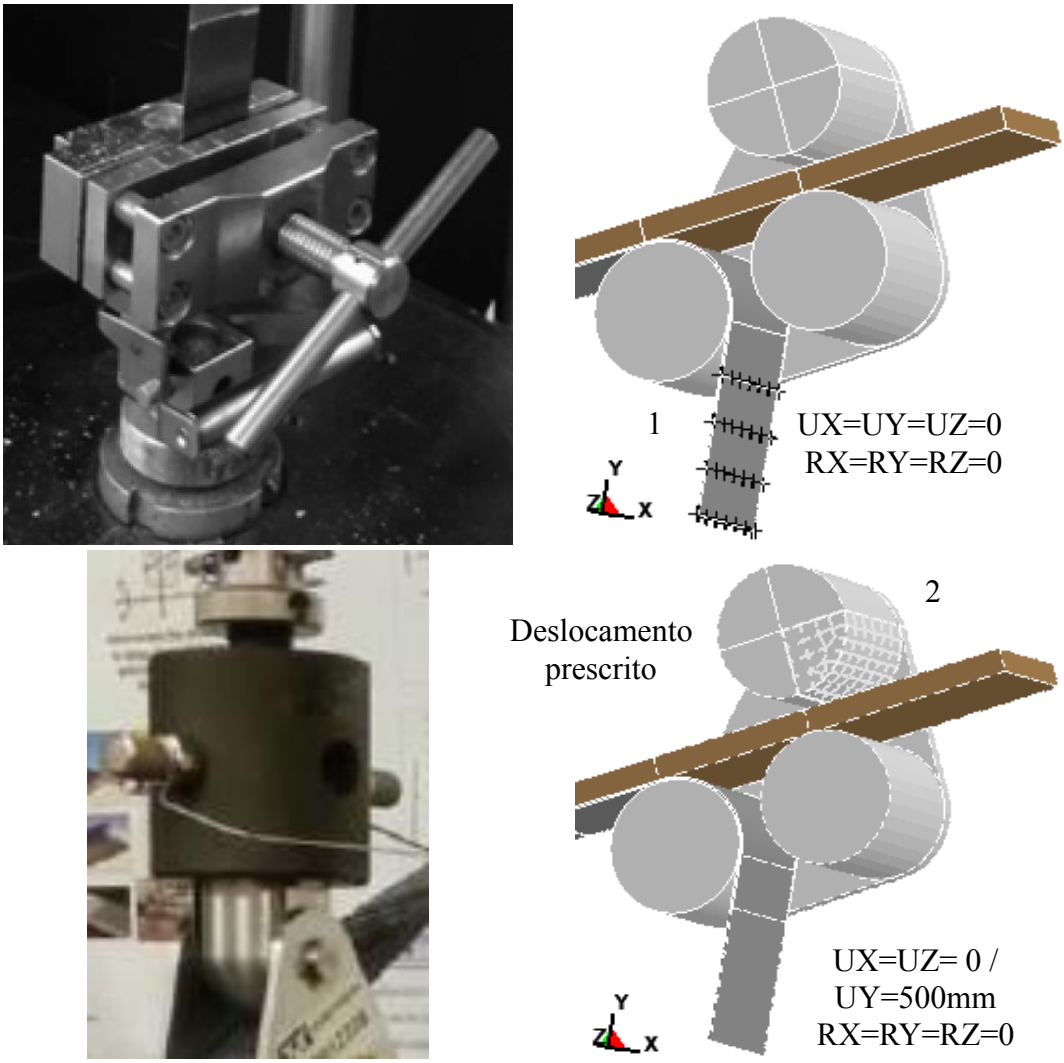


Figura 31 – Condições de contorno do FEA, com detalhe, à esquerda, para as regiões que são representadas no FEA.

No dispositivo de teste, os dois roletes inferiores estão conectados ao rolete superior pelas duas placas laterais das extremidades. A rotação das placas em torno do rolete superior é permitida através de pinos que não oferecem resistência a esta movimentação. O ângulo de arrancamento pode variar ao longo do teste de acordo com o tipo de junta colada, material dos substratos, favorecendo o modo I ou II de falha, dependendo da resistência do adesivo. Este movimento relativo foi representado no modelo de elementos finitos através de duas juntas cilíndricas entre o rolete superior e as placas laterais de fixação, em ambas extremidades, conforme ilustrado na Figura 32. O comando CONSTRAINED_JOINT_CYLINDRICAL foi aplicado no LS-DYNA® [11] para representar a interação entre estes três componentes (rolete superior e placas lateriais), sem considerar resistência ao movimento relativo.

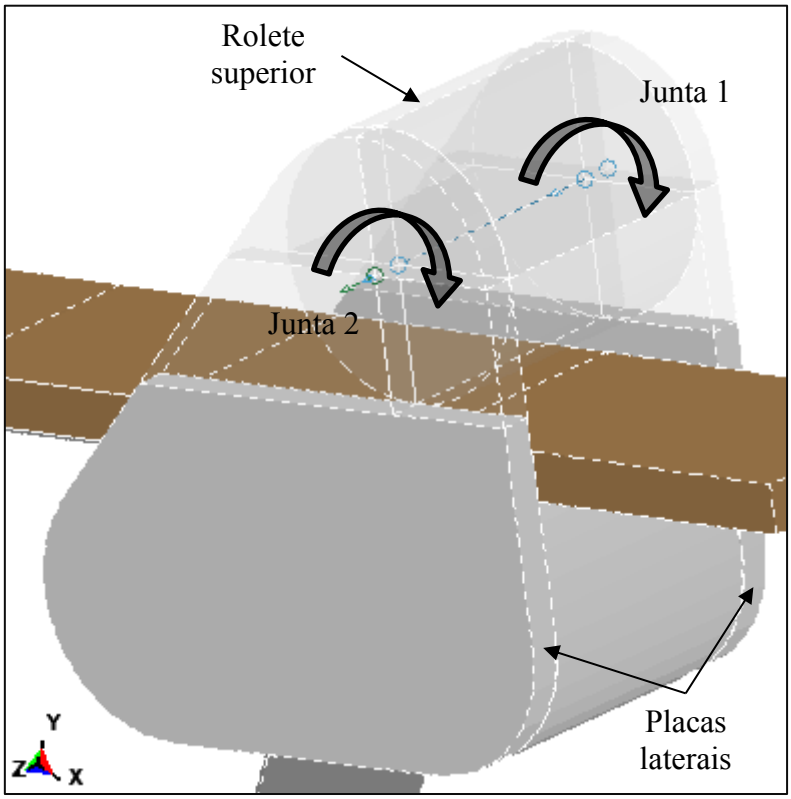


Figura 32 – Junta cilíndrica considerada no FEA.

A interação entre os substratos rígido e flexível é representada através de um contato do tipo colado com critério de falha, conforme apresentado na seção 1.4.2, através

do comando CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK no LS-DYNA® [11], conforme mostrado na Figura 33. O contato do tipo colado tem a capacidade de restringir as rotações e translações entre os componentes em contato. A formulação TIEBREAK associada ao contato colado permite que o acoplamento total dos graus de liberdade seja quebrado quando os valores limites são atingidos, conforme os parâmetros do modelo coesivo. Os parâmetros do modelo coesivo (NFLS, SFLS e CCRIT) serão calibrados com os resultados experimentais.

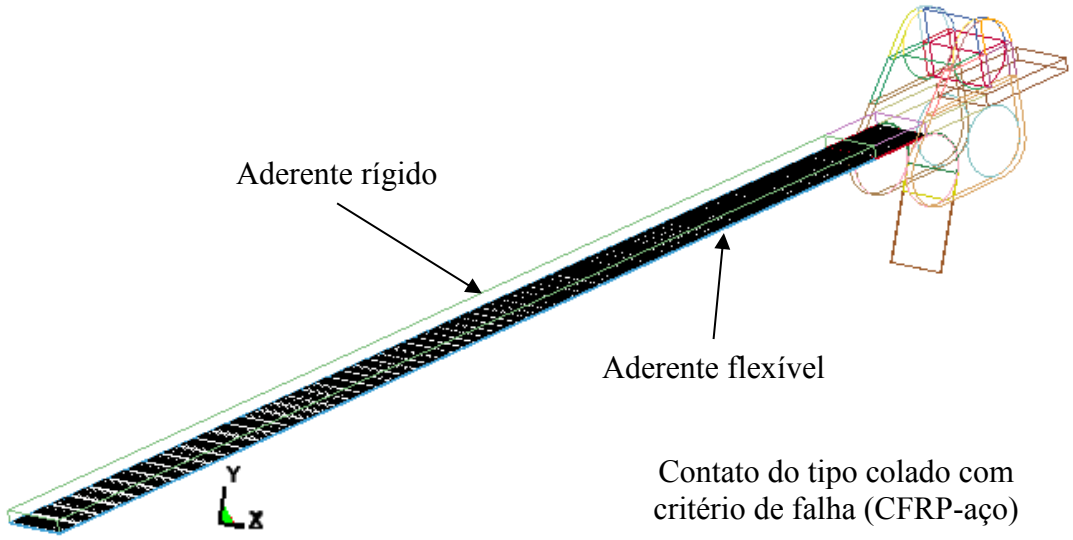
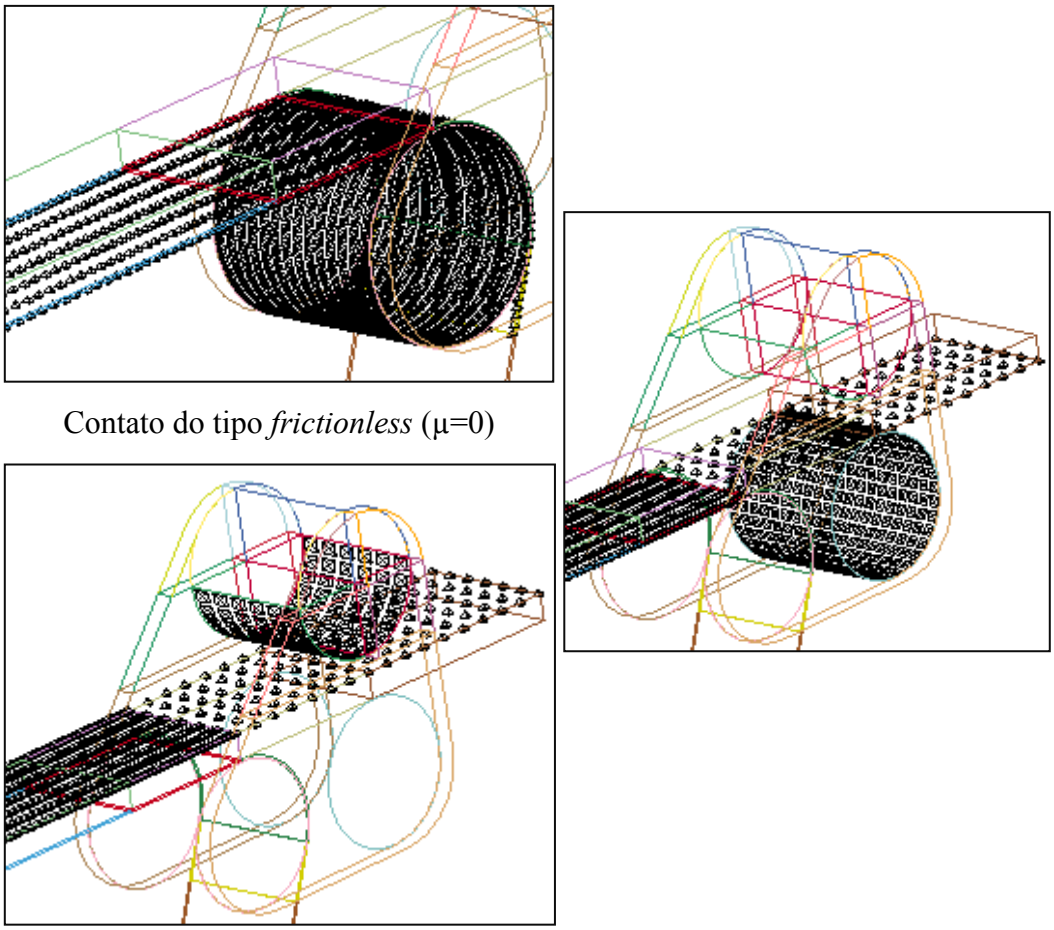


Figura 33 – Contato do tipo colado considerado no FEA.

Um contato do tipo colado, sem critério de falha, também foi considerado para representar a interação entre os roletes inferiores e as placas laterais, acoplando-se todos os graus de liberdade.

A interação entre os substratos rígido e flexível e os componentes rígidos (dispositivo de teste) foram declarados como do tipo sem atrito (*frictionless*), permitindo a separação e deslizamento sem resistência (atrito nulo) ao movimento, porém limitando a penetração entre os componentes, conforme ilustrado na Figura 34. O comando CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE foi utilizado para representar este tipo de interação entre os componentes.



Contato do tipo *frictionless* (μ=0)

Figura 34 – Contato do tipo sem atrito considerado no FEA.

A velocidade de arrancamento está totalmente associada ao deslocamento prescrito no rolete superior (500 mm em UY) e ao tempo total de análise. Como o passo de tempo é dependente de parâmetros de rigidez de contato e tamanho de malha, à medida que o tempo total de análise aumenta, o tempo de processamento de máquina aumenta também pois o passo de tempo se mantém inalterado com a variação deste parâmetro. A velocidade considerada foi 5000 mm/s^2, superior ao especificado pela norma ASTM [7]. O passo de tempo calculado pelo software ANSYS LS-DYNA® [11] é de 5,5 E-08 segundos.

3. Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados numéricos para os modelos dos ensaios de tração do CFRP e de arrancamento da junta colada CFRP-aço. Inicialmente é realizada uma comparação entre os resultados FEA e do ensaio de tração para caracterização das propriedades mecânicas em tração do compósito. Em seguida, são mostrados os resultados numéricos para o *peel test*, com detalhe para a avaliação da influência das propriedades coesivas no comportamento da junta colada e comparação da força de arrancamento com os resultados experimentais.

3.1 Ensaio de Tração

As propriedades mecânicas do compósito foram calibradas numericamente ao nível da camada de fibras, através de um processo iterativo, para representar a região elástica obtida experimentalmente pelos quatro corpos de prova CFRP ensaiados. Para tal foi considerada a abordagem com elementos do tipo casca (SOLSH190), como apresentado na seção 2.2.1.

Com o objetivo de obter as propriedades elásticas ortotrópicas do compósito, somente a região elástica das curvas experimentais foi considerada na calibração numérica. Para o laminado 0/90°, a comparação/calibração numérico-experimental foi realizado considerando a curva média entre os ensaios.

A Figura 35 e Figura 36 apresentam uma comparação entre os resultados numéricos e experimentais da curva tensão *versus* deformação obtidos para os corpos de prova com fibras de carbono orientadas a 0/90° e ±45°, respectivamente.

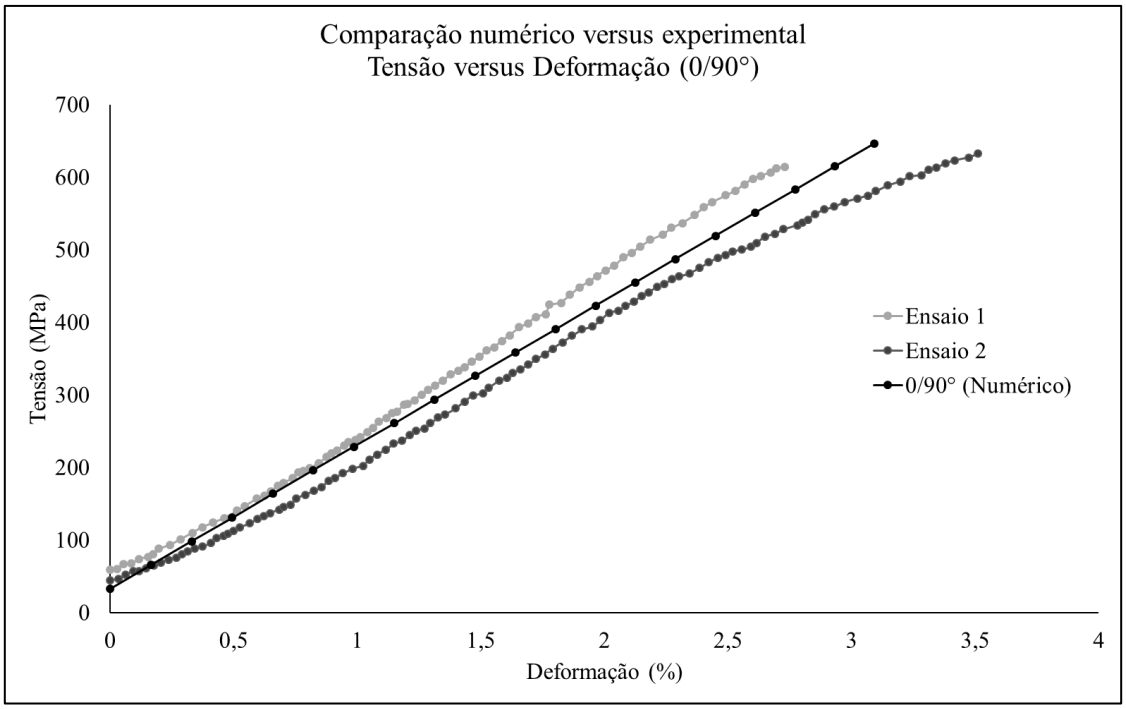


Figura 35 – Comparação numérico *versus* experimenal dos ensaios de tração para o laminado 0/90°.

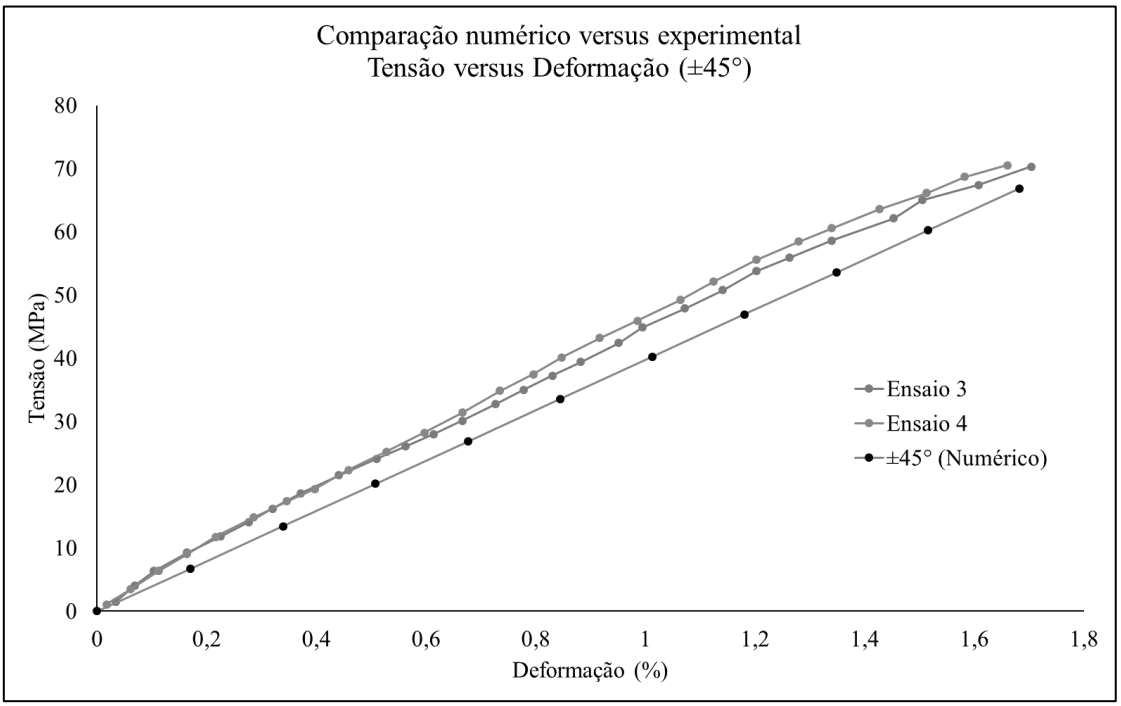


Figura 36 – Comparação numérico *versus* experimenal dos ensaios de tração para o laminado ±45°.

Fica evidente o comportamento frágil no laminado com orientação das fibras 0/90°, com comportamento dominado pela resistência das fibras de carbono, enquanto que o comportamento dúctil é predominante no laminado ±45°, haja vista que à contribuição das fibras na resistência à deformação é menor comparado ao laminado com fibras orientadas à 0/90°.

Nota-se que a curva calibrada representou bem o comportamento à tração para ambas configurações avaliadas, aproximando-se mais dos resultados com laminado ±45°, tendo em vista que não há uma grande diferença entre os resultados dos ensaios 3 e 4.

Vale ressaltar que os possíveis modos de falha observados durante o ensaio experimental (delaminação e falha do fio), bem como as incertezas associadas à interação dos corpos de prova com a bancada de teste não foram contemplados nesta calibração. A mudança de rigidez observada nas curvas experimentais pode ser representada a partir da inclusão de modos de falha no cálculo de elementos finitos, entretanto, não foi o objetivo do presente trabalho.

As propriedades ortotrópicas elásticas, a nível da lâmina do CFRP, são apresentadas na Tabela 2. A partir das propriedades da lâmina é possível, através da macromecânica, obter as propriedades ortotrópicas de um laminado de fibras de carbono com matriz epóxi, como foi realizado para o aderente rígido do ensaio de arrancamento com roletes flutuantes.

3.2 Ensaio de Arrancamento com Roletes Flutuantes

Somente os dados experimentais dos ensaios de arrancamento nos corpos de prova CFRP-aço, na condição sem envelhecimento, serão apresentados para fins de comparação com os resultados numéricos. Os resultados das análises de elementos finitos serão apresentados através de curvas de carga de arrancamento ao longo do comprimento de camada adesiva delaminada entre os aderentes.

Dentre os três resultados dos ensaios com o corpo de prova de 500 mm (CFRP-aço), sem envelhecimento, apresentados em [55], somente o ensaio 5 foi considerado para efeito de calibração das propriedades da junta colada, conforme considerado em [26]. O resultado do ensaio 5, ilustrado na Figura 37, foi escolhido pois apresentou menor irregularidade ao longo do comprimento descolado. Como observado por DE FREITAS

et al. [23], as irregularidades identificadas nas curvas de força *versus* deslocamento são ocasionadas pela predominância de diferentes modos de falha num mesmo ensaio, provocados por vazios, falha coesiva ou falha no adesivo.

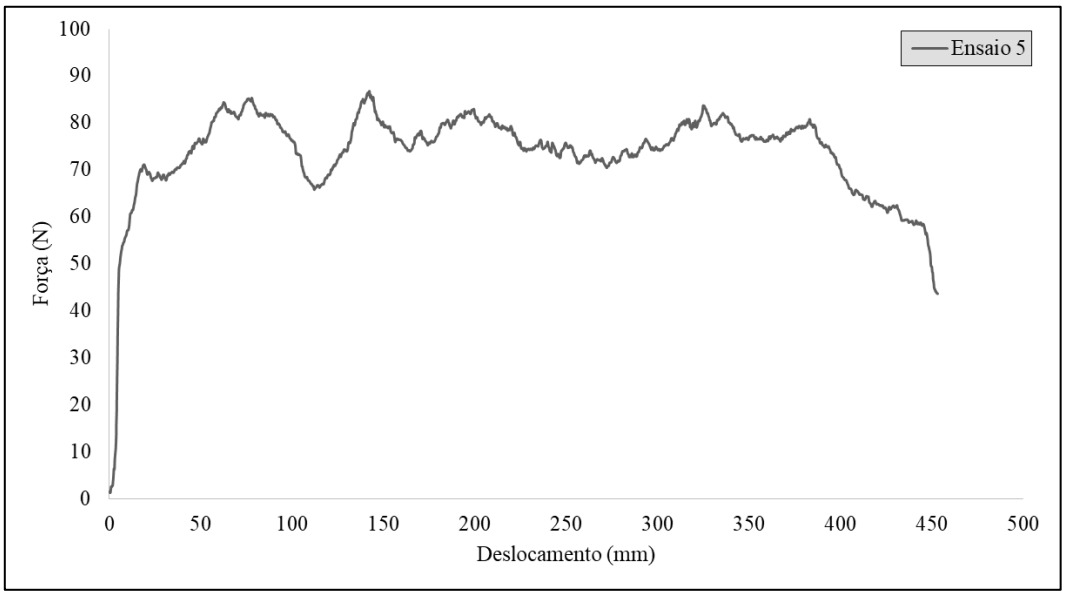


Figura 37 – Curvas de força *versus* deslocamento dos corpos de prova CFRP-aço com 500 mm, sem envelhecimento, adaptada de [26].

Para avaliar os resultados dos ensaios de maneira comparativa, é necessário calcular as médias dos valores de força obtidos ao longo de um mesmo intervalo de comprimento da camada adesiva. Este intervalo é então determinado de forma que não seja incluída o início da aplicação da força, quando ocorrem a acomodação do corpo de prova e início do arrancamento.

A norma ASTM [7] especifica que os primeiros 25,4 mm de deslocamento devem descartados da avaliação e que a força média de arrancamento deve ser avaliada num comprimento mínimo de 76,2 mm.

A calibração das propriedades da junta foi realizada variando os parâmetros da interface (NFLS, SFLS e CCRIT) até que a força média de arrancamento atingisse o valor encontrado no ensaio experimental. A influência de cada parâmetro foi verificada no que tange a variação da força média conforme mostrado na Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6, respectivamente. O intervalo de comprimento de camada adesiva considerado nesta avaliação está compreendido entre 25,4 mm e 400 mm.

Tabela 4 – Influência do NFLS na força média.

$NFLS$ (MPa)	$F_{médio}$ (N)	$NFLS$ (MPa)	$F_{médio}$ (N)
20	80,69	60	79,85
30	80,63	80	79,98
40	79,97	100	80,58
50	80,45	-	-

Tabela 5 – Influência do SFLS na força média.

$SFLS$ (MPa)	$F_{médio}$ (N)	$SFLS$ (MPa)	$F_{médio}$ (N)
5	80,63	30	90,02
20	93,00	40	76,44

Tabela 6 – Influência do CCRIT na força média.

$CCRIT$ (mm)	$F_{médio}$ (N)	$CCRIT$ (mm)	$F_{médio}$ (N)
0,0001	77,38	0,003	78,29
0,0003	80,16	0,005	78,70
0,001	80,63	-	-

A influência dos parâmetros da junta na variação da força média de arrancamento é mostrada graficamente através da Figura 38, Figura 39 e Figura 40.

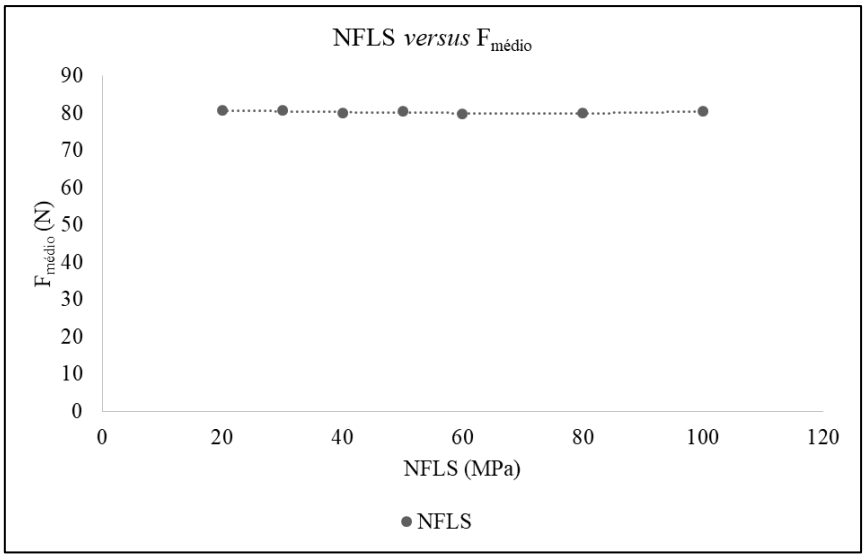


Figura 38 – Variação da força média de arrancamento com o parâmetro NFLS.

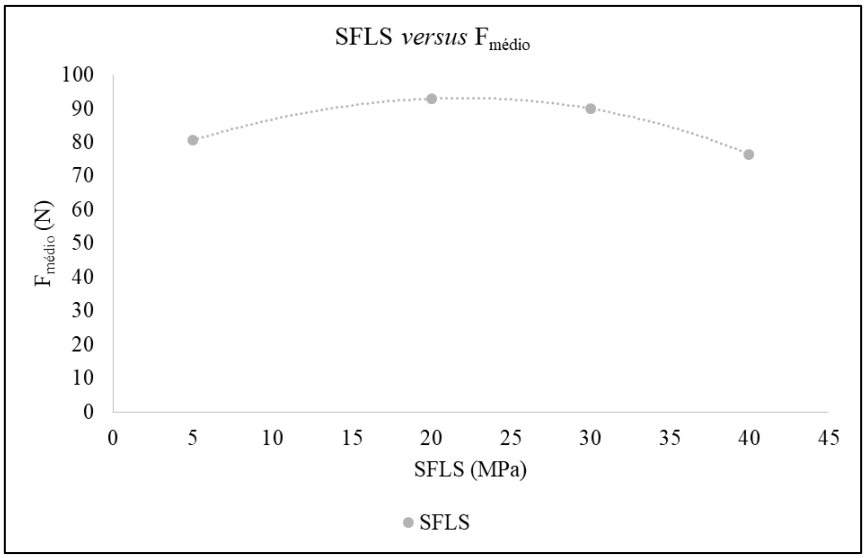


Figura 39 – Variação da força média de arrancamento com o parâmetro SFLS.

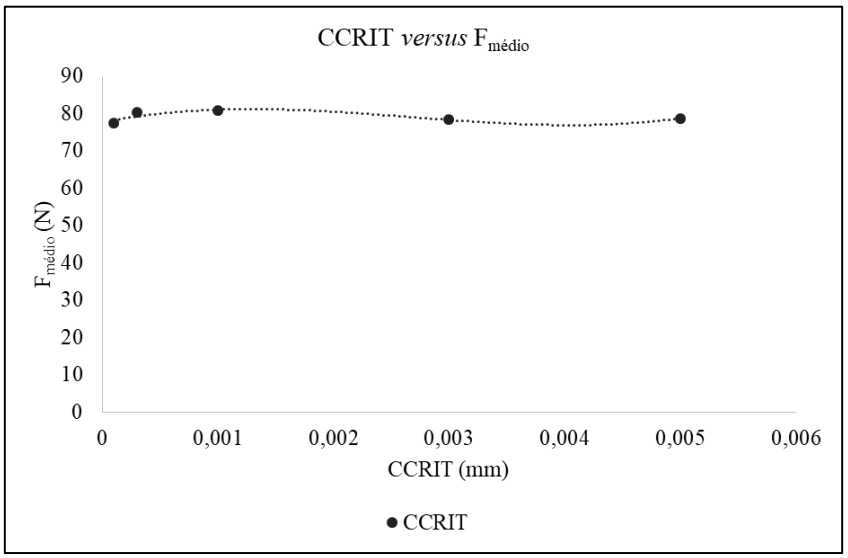


Figura 40 – Variação da força média de arrancamento com o parâmetro CCRIT.

Os dados apresentados nos gráficos acima mostraram que os parâmetros NFLS e CCRIT possuem pequena influência na variação da força média de arrancamento comparado ao parâmetro SFLS, que para uma pequena variação da sua magnitude apresentou maior influência na resposta de força média.

O estudo da influência de cada parâmetro da junta possibilitou, através de um processo iterativo, alcançar uma combinação ótima dos parâmetros que capturam o comportamento da curva força *versus* deslocamento, conforme ilustrado na Figura 41.

Além do comportamento da curva, a força média de arrancamento também foi um resultado utilizado na calibração dos parâmetros da junta que melhor aproximassem o comportamento no ensaio de arrancamento, como mostrado na Figura 42.

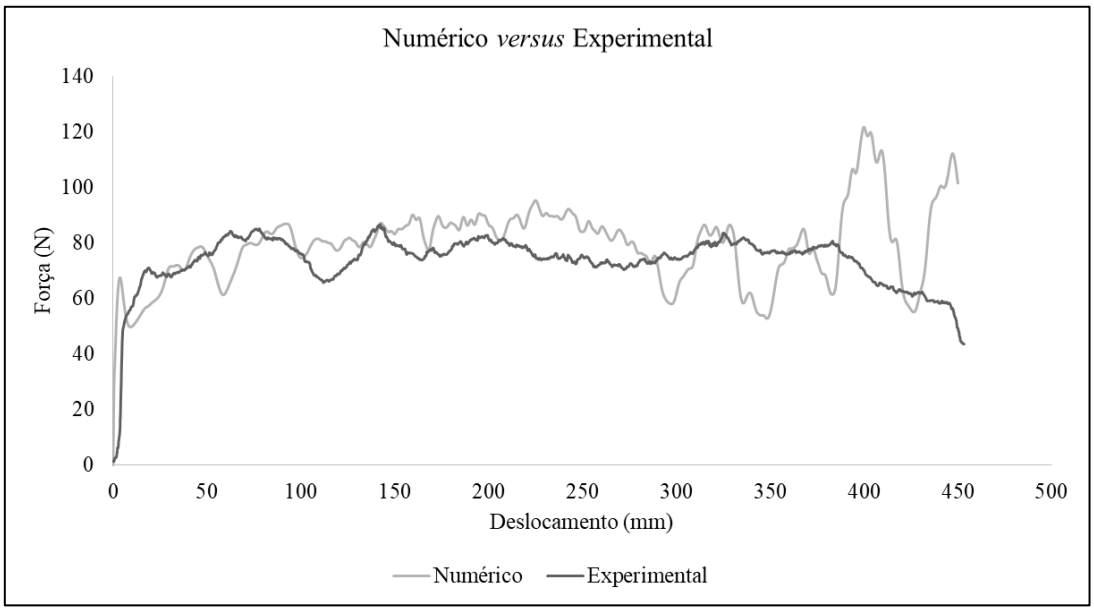


Figura 41 – Comparação numérico-experimental da curva força *versus* deslocamento.

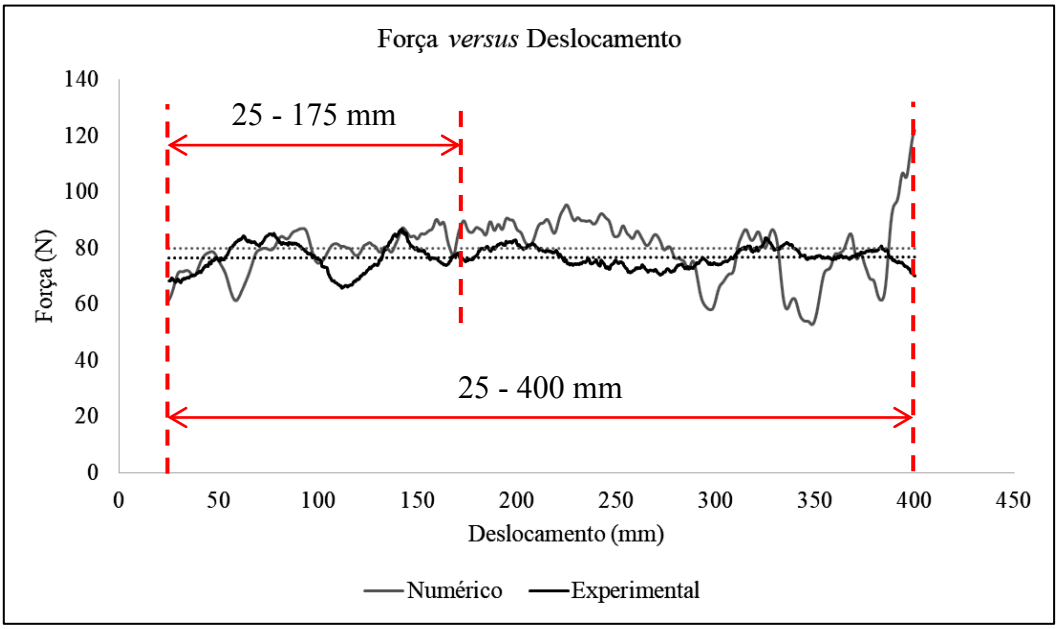


Figura 42 – Comparação numérico-experimental da curva força *versus* deslocamento na região de avaliação da força média.

Os parâmetros que corroboraram na melhor resposta comparativamente aos resultados experimentais estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros da junta colada utilizados no FEA.

NFLS (MPa)	SFLS (MPa)	CCRIT (mm)
60	5	0,001

Os valores de força média obtidos da Figura 42 são apresentados na Tabela 8 para dois intervalos de comprimento de camada adesiva, um intervalo próximo ao mínimo da norma ASTM [7] e o outro considerado neste estudo (25 – 400 mm).

Tabela 8 – Comparação numérico-experimental da força de arrancamento média.

Corpo de prova CFRP-aço (500mm)			
Intervalo de avaliação	$F_{médio}$ (N)		
	Experimental	Numérico	Diferença (%)
25 – 175 mm	76,64	79,00	3,08
25 – 400 mm	76,76	79,85	4,02

Comparando os dois intervalos avaliados, o menor intervalo, próximo ao mínimo proposto pela norma, apresenta uma diferença percentual menor que o intervalo de avaliação considerado no estudo, conforme observado na Figura 42, onde a curva numérica se aproxima mais do ensaio no início do descolamento que no final, apresentando uma maior oscilação da força de arrancamento em torno de um valor médio após os 200 mm de deslocamento. Embora haja uma diferença entre os valores numérico e experimental, as forças médias estão bem próximas em ambos os intervalos de avaliação.

A diferença percentual entre a reposta numérica *versus* experimental é menor que 5%, mostrando que o modelo numérico possui uma boa representatividade do ensaio de arrancamento. Além da resposta de força média de arrancamento, a curva de resposta evidencia esta similaridade com o evento observado experimentalmente, mantendo a

característica da curva de resposta obtida num ensaio de arrancamento com roletes flutuantes.

Com o objetivo de avaliar a robustez do modelo numérico quanto a variação dos seus parâmetros de entrada, foi realizada uma avaliação, puramente numérica, da influência do material do substrato rígido no comportamento da curva força *versus* deslocamento obtida no ensaio de arrancamento com roletes flutuantes. Para tal, foram levantadas curvas de resposta e força média considerando corpos de prova aço-aço e CFRP-aço. Nesta avaliação comparativa foram fixadas as propriedades da junta (Tabela 7), do aderente flexível, às dimensões dos substratos rígidos e flexíveis e os parâmetros da análise. As propriedades mecânicas do substrato rígido metálico são as mesmas utilizadas para o aderente flexível, conforme mostrado na Tabela 1.

A curva força *versus* deslocamento é apresentada na Figura 43 para os dois tipos de juntas coladas (CFRP-aço e aço-aço). É possível observar uma menor variação da força de arrancamento em torno de um valor médio na junta aço-aço ao longo do comprimento descolado, sendo associada ao fato que o substrato rígido metálico possui maior inércia e rigidez comparado ao CFRP.

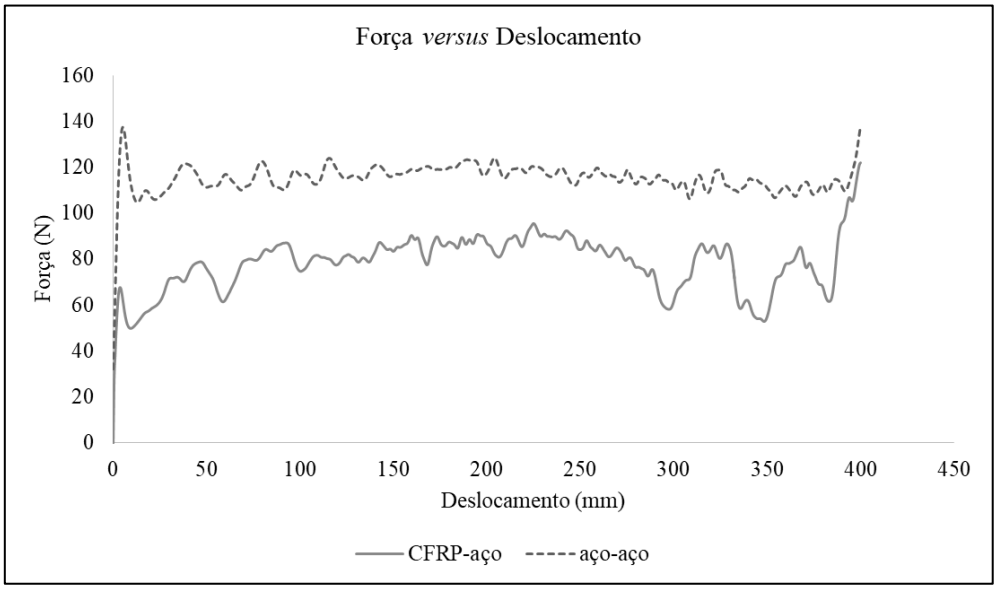


Figura 43 – Influência dos diferentes tipos de substratos (CFRP-aço e aço-aço) na curva força *versus* deslocamento.

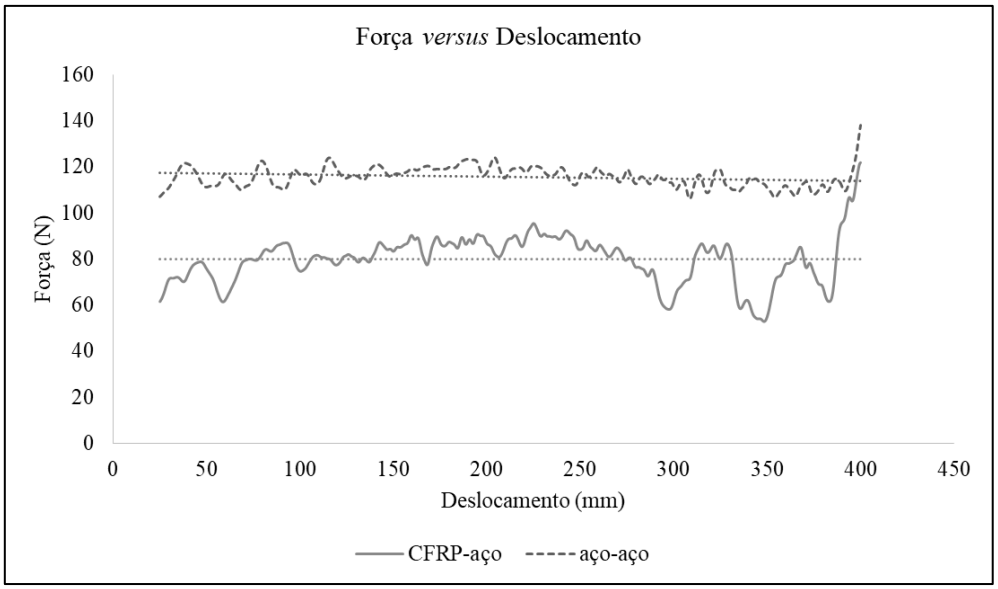


Figura 44 – Influência de diferentes tipos de substratos (CFRP-aço e aço-aço) na força média de arrancamento.

Nota-se também que a junta aço-aço aumenta a força média de arrancamento considerando os mesmos parâmetros para a interface substrato rígido-flexível, o que pode ser explicado pelo aumento da rigidez do aderente rígido. O aumento percentual na força média é de 45% em relação ao resultado para a junta colada CFRP-aço, conforme mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 – Comparação da força de arrancamento média para diferentes tipos de substratos (CFRP-aço e aço-aço).

Tipo de junta	$F_{médio}$ (N)	Diferença (%)
CFRP-aço	79,85	44,84
Aço-aço	115,65	

Esta avaliação comparativa entre os dois tipos de junta possibilita concluir que a mudança do material do substrato rígido influencia diretamente a curva força *versus* deslocamento e força média de arrancamento. O aumento de rigidez do substrato rígido tem uma relação direta com a diminuição das variações da força de arrancamento e o aumento da força média.

Vale ressaltar que o modelo calibrado consegue representar bem o comportamento dos aderentes submetidos ao ensaio de arrancamento com roletes flutuantes, sendo possível identificar a variação de comportamento na curva de resposta mesmo para a mudança de um único parâmetro na análise, como o material do aderente rígido.

Conclusão

O presente trabalho propôs a representação numérica do comportamento mecânico de uma junta colada compósito-metal quando submetida a um ensaio de arrancamento com roletes flutuantes. Para tal, inicialmente, foram realizadas análises de calibração das propriedades do compósito a partir de resultados experimentais de um ensaio de tração. Em seguida foram realizadas diversas análises do teste de arrancamento considerando diferentes parâmetros para a interface compósito-aço até alcançar a combinação que melhor representasse os resultados experimentais do ensaio de *peel*. A fim de checar a representatividade e sensibilidade do modelo em capturar variações na resposta decorrente da mudança de parâmetros de entrada, foi realizada uma avaliação comparativa da influência do material do substrato rígido na curva de resposta e força média obtida no teste de arrancamento. A partir dos resultados, conclui-se:

- O modelo de elementos finitos implementado através de elementos sólidos tipo casca e a utilização da abordagem a nível de camada, apresentou resultados de acordo com o comportamento típico para o compósito CFRP com diferentes orientações de fibra em um ensaio de tração.
- Esta abordagem é vantajosa do ponto de vista computacional, pois não necessita um refino tão grande na malha, principalmente, quando se deseja estudar detalhes na interface entre as camadas, como por exemplo delaminação entre as camadas do compósito.
- A comparação com os ensaios de tração experimentais, na região elástica, mostrou bons resultados para as duas direções de fibras avaliadas (0/90° e ±45°), apresentando uma pequena discrepância no início da aplicação da tração (deformações abaixo de 0,5%) para o corpo de prova 0/90°. Essa discrepância pode ser explicada pela acomadação e um possível deslizamento entre o CFRP e

as garras da bancada de teste. A curva experimental foi corrigida, descartando-se os primeiros 0,5% de deformação, de modo que a comparação fosse melhor representada.

- Para o corpo de prova com fibras orientadas a ±45°, somente a primeira inclinação da curva experimental foi utilizada na calibração das propriedades do CFRP, por representar a região elástica, sendo descartada a segunda inclinação.
- No teste de arrancamento, o modelo de elementos finitos elaborado através de elementos sólidos de primeira ordem apresentou resultados bem próximos aos resultados experimentais, como curva força *versus* deslocamento e força média de arrancamento.
- No ensaio de arrancamento não foi observada falha predominante pela delaminação entre as camadas do compósito, o que torna a escolha do elemento sólido, com propriedade equivalente, válida e representativa do ensaio de *peel*.
- O estudo da influência dos parâmetros da interface na resposta de força média e curva força *versus* deslocamento foi de vital importância para a representação dos resultados experimentais, aumentando a confiança no modelo elaborado.
- Os picos e vales observados na curva experimental foram bem representados pelo modelo de elementos finitos proposto. Foi identificada na curva numérica uma variação na força de arrancamento maior após os 200 mm de deslocamento do dispositivo de teste, que pode ser explicada pela mudança na densidade de malha dos aderentes rígido e flexível ao longo do comprimento colado, abordagem utilizada para diminuir o custo computacional.
- No intervalo entre 25 e 200 mm de deslocamento esta variação é menor, conferindo uma maior proximidade entre o ensaio e o numérico, o que pode ser

evidenciado também quando comparamos a força média nos diferentes intervalos. No menor intervalo, a diferença percentual em termos de força média de arrancamento ficou em 3%, enquanto para o intervalo de 25-400 mm esta diferença ficou em 4%.

- Embora tenha sido identificada uma disparidade no formato da curva numérica após 200 mm de deslocamento, esta diferença não é observada de maneira significativa quando avaliamos as forças médias de arrancamento, que apresentam resultados similares aos experimentais e diferenças percentuais bem pequenas em ambos intervalos de avaliação.
- A avaliação comparativa da influência do material do substrato rígido na curva de resposta permitiu concluir que o aumento da força média é proporcional ao aumento de rigidez do aderente rígido e as variações de força de arrancamento observadas na curva de resposta são também dependentes do material. Foi observado um aumento da força média em 45% quando o substrato rígido é metálico em comparação ao CFRP.
- Esta comparação mostrou a robustez do modelo quanto a sua representatividade, sendo possível identificar a variação de comportamento na curva de resposta mesmo para mudança de um único parâmetro da análise, como o material do aderente rígido.
- De maneira geral as abordagens numéricas propostas neste trabalho mostraram bons resultados e uma correta representação do comportamento mecânico do laminado a tração e da junta colada num teste de arrancamento com roletes flutuantes, fornecendo um bom indicativo de utilização da simulação por elementos finitos na representação destes testes.

Discussão para Trabalhos Futuros

O comportamento dinâmico dos corpos de prova e dispositivo de teste no ensaio de arrancamento com roletes flutuantes permitiu a utilização de uma abordagem explícita para representar o comportamento mecânico da junta colada compósito / metal. Algumas avaliações podem ser realizadas como sugestões de trabalhos futuros, tais como descritas abaixo:

- Utilização de elementos sólidos tipo casca para representar os substratos no teste de arrancamento de roletes flutuantes. Esta abordagem tende a diminuir o tempo de processamento, que foi bem elevado durante a análise considerando elementos sólidos.
- Análise de convergência de malha, considerando as diferentes abordagens de representação dos elementos no ANSYS LD-DYNA® empregadas nesta dissertação.
- Avaliar a influência do parâmetro velocidade de teste na resposta de força média de arrancamento e curva força *versus* deslocamento.
- Comparar os resultados numéricos considerando os substratos metálicos com dados de ensaios experimentais, de forma a validar o modelo numérico proposto.
- Representação do ensaio de arrancamento com roletes flutuantes através de uma metodologia numérica implícita, considerando o comportamento quase-estático que os corpos de prova assumem devido a velocidade proposta pela norma ASTM D 3167.

Referencias Bibliográficas

[1] DE FREITAS, S. T.; SINKE, J.: "Failure analysis of adhesively-bonded skin-to-stiffener joints: Metal–metal vs. composite-metal". Engineering Failure Analysis, 56: 2-13, 2015.

[2] BANEA, M. D.; DA SILVA, L. M.: "Adhesively bonded joints in composite materials – An Overview". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 223: 1-18, 2009.

[3] CAMPILHO, R. D.; BANEA, M. D.; NETO, J. A.; DA SILVA, L. F.: "Modelling adhesive joints with cohesive zone models: Effect of the cohesive law shape of the adhesive layer". International Journal of Adhesion & Adhesives, 44: 48-56, 2013.

[4] MADELPECH, P.; JUANEDA, S.; PRADELS, M.: "Bonded composite patch to repair metallic structures: Fatigue behaviour of a disbond". 17th ICCM-Central, 2009 (p. 13).

[5] ADAMS, D. R.; COMVN, J. C.; WAKE, W. C.: "Structural Adhesive Joints in Engineering". London, UK: Chapman & Hall, 1997.

[6] CARBAS, R. J.: *Estudo Paramétrico de Juntas Adesivas pelo Método de Taguchi*. Dissertação de Mestrado, FEUP, Engenharia Mecânica, Porto, 2008.

[7] ASTM D 3167: "Standard Test Method for Floating Roller Peel Resistance of Adhesives". 1997.

[8] DE FREITAS, S. T.; SINKE, J.: "Test method to assess interface adhesion in composite bonding". Applied Adhesion Science, 3:9, 2015 (p. 13).

[9] ADMET: "Performing an ASTM D3167 Adhesive Floating Roller Peel Test". Fonte: ADMET: Materials Testing System Manufacturer, 2016.

[10] DE FREITAS, S. T.; BANEA, M. D.; BUDHE, S.; DE BARROS, S.: "Interface adhesion assessment of composite-to-metal bonded joints under salt spray conditions using peel tests". Composite Structures, 164: 68-75, 2017.

[11] ANSYS/LS-DYNA: *Solver explícito de Elementos Finitos*. Livermore Software Technology Corporation, 2013.

[12] NETO, F. L.; PARDINI, L. C.: *Compósitos Estruturais - Ciência e Tecnologia*, 1ª ed., São Paulo, Blucher, 2006.

[13] HULL, D.; CLYNE, T. W.: *An Introduction to Composite Material*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996.

[14] DANIEL, I. M.; ISHAI, O.: *Engineering Mechanics of Composite Materials*, 2nd ed., New York, Oxford, 2006.

[15] LYNCH, T.: "Thermoplastic/graphite fiber hybrid fabric". Sample Journal, 25: 17-22, 1989.

[16] MARINUCCI, G.: *Materiais Compósitos Polimérico: Fundamentos, Tecnologia e Aplicações*. Apostila do Curso TNM 5796, IPEN/São Paulo, 2007.

[17] CAMPILHO, R. D.; BANEA, M. D.; NETO, J. B.; DA SILVA, L. M.: "Modelling of single-lap joints using cohesive zone models: effect of the cohesive parameters on the output of the simulations". International Journal of Adhesion & Adhesives, 88: 513-533, 2012.

[18] SKEIST, I.: *Handbook of Adhesives*, 4th ed., New York, USA: Reinhold Publishing Corporation, 1965.

[19] PINTO, A. M.: *Ligações Adesivas entre Materiais Poliméricos com e sem Alteração Superficial dos Substratos*. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2007.

[20] ADHESIVES.ORG, SEALANTS.ORG.: *Joint Testing*. Fonte: Adhesives & Sealants, 2016.

[21] BRÜGEMANN, V. P.; SINKE, J.; DE BOER, H.: *Fracture toughness testing in FML*, 25th ed., Society for Experimental Mechanics, 2007.

[22] CALDEIRA, L.; NUNES, L.: "Estudo de fratura em um adesivo flexível usando teste DCB através do método de correlação de imagens digitais". 21º CBECIMAT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2014.

[23] DE FREITAS, S. T.; SINKE, J.: "Adhesion Properties of Bonded Composite-to-Aluminium Joints Using Peel Tests". The Journal of Adhesion, 90: 511-525, 2014.

[24] PELFRENE, J.; VAN DAM, S.; VAN PAEPEGEM, W.: "Numerical analysis of the peel test for characterisation of interfacial debonding in laminated glass". International Journal of Adhesion & Adhesives, 62: 146-153, 2015.

[25] JANG, J.; SUNG, M.; HAN, S.; YU, W.-R.: "Prediction of delamination of steel-polymer composites using cohesive zone model and peeling tests". Composites Structures, 160: 118-127, 2016.

[26] AROUCHE, M. M.; BUDHE, S.; ALVES, L. A.; DE FREITAS, S. T.; BANEA, M. D.; DE BARROS, S.: "Effect of moisture on the adhesion of CFRP-to-steel bonded joints using peel tests". Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 40, 2018.

[27] ALMEIDA, H. B.: *Avaliação do comportamento em tração e de parâmetros da mecânica da fratura em laminados fibra-metal tipo glare via Método dos Elementos Finitos*. Dissertação de Mestrado, COPPE UFRJ, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Rio de Janeiro, 2016.

[28] ZIENKIEWICZ, O.; TAYLOR, R.; ZHU, J.: *The Standard Discrete System and Origins of Finite Element Method*, 7th ed., United States, Elsevier, 2013.

[29] RIBEIRO, F. L. B.: *Introdução ao Método dos Elementos Finitos*. Notas de aula do professor Fernando L. B. Ribeiro. RJ, Brasil, PEC/COPPE/UFRJ, 2004.

[30] COOK, R.: *Introduction*, 1st ed., United States, John Willey and Sons, 1995.

[31] SUGIMAN, S.; CROCOMBE, A. D.; ASCHROFT, I. A.: "Modelling the static response of unaged adhesively bonded structures". Engineering Fracture Mechanics, 98: 296-314, 2013.

[32] CASTAGNETTI, D., A., S.; DRAGONI, E.: "Effect of bondline thickness on the static strength of structural adhesives under nearly-homogeneous shear stresses". The Journal of Adhesion, 87: 780-803, 2011.

[33] CAMPILHO, R. D.; BANEA, M. D.; PINTO, A. M.; DA SILVA, L. F.; DE JESUS, A. M.: "Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling. International Journal of Adhesion and Adhesives", 31(5): 363-372, 2011.

[34] LAI, Y.; RAKESTRAW, M.; DILLARD, D.: "The cracked lap shear specimen revisited – A closed form solution". International Journal of Solids and Structures, 33: 1725-1743, 1996.

[35] MORADI, A.; LEGUILLON, D.; CARRÈRE, N.: "Influence of the adhesive thickness on a debonding - An asymptotic model". Engineering Fracture Mechanics, 114: 55-68, 2013.

[36] WOOLEY, G. R.; CARVER, D. R.: "Stress concentration factors for bonded lap joint". Journal of Aircraft, 8: 817-820, 1971.

[37] TSAI, M. Y.; MORTON, J.: "An evaluation of analytical and numerical solutions to the single-lap joint". International Journal of Solids and Structures, 31: 2537-2563, 1994.

[38] BARBERO, E. J.: *Finite Element Analysis of Composite Materials using ANSYS*, 2nd ed., CRC Press, 2013.

[39] DA SILVA, L. F.; CAMPILHO, R. D.: "Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints". Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.

[40] FERAREN, P.; JENSEN, H. M.: "Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints". Engineering Fracture Mechanics, 71: 2125-2142, 2004.

[41] MI, Y.; CRISFIELD, M. A.; DAVIES, G. A.; HELLWEG, H. B.: "Progressive delamination using interface elements". Journal of Composite Materials, 32(14): 1246-1272, 1998.

[42] ALFANO, G.; CRISFIELD, M. A.: "Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: Mechanical and computational issues". International Journal for Numerical Methods in Engineering, 50(7): 1701-1736, 2001.

[43] HILLERBORG, A.; MODÉER, M.; PETERSSON, P.-E.: "Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements". Cement and Concrete Research, 6(6): 773-781, 1976.

[44] ALLIX, O.; LADEVÉZE, P.; CORIGLIANO, A.: "Damage analysis of interlaminar fracture specimens". Composite Structures, 31(1): 61-74, 1995.

[45] XU, X.-P.; NEEDLEMAN, A.: "Numerical simulations of fast crack growth in brittle solids". Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 42(9): 1397-1434, 1994.

[46] CHANDRA, N.; LI, H.; SHET, C.; GHONEM, H.: "Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces". International Journal of Solids and Structures, 39(10): 2827-2855, 2002.

[47] TVERGAARD, V.; HUTCHINSON, J. W.: "The influence of plasticity on mixed mode interface toughness". Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 41(6): 1119-1135, 1993.

[48] TVERGAARD, V.; HUTCHINSON, J. W.: "On the toughness of ductile adhesive joints". Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 44(5): 789-800, 1996.

[49] ALFANO, G.: "On the influence of the shape of the interface law on the application of cohesive-zone models". Composites Science and Technology, 66(6): 723-730, 2006.

[50] DE MOURA, M.; GONÇALVES, J.: "Cohesive zone model for high-cycle fatigue of adhesively bonded joints under mode I loading". International Journal of Solids and Structures, 51(5): 1123-1131, 2014.

[51] XIAO, X. R.; FOSS, P. H.; SCHROEDER, J. A.: "Stiffness prediction of the double lap shear joint. Part2: Finite Element Modeling". International Journal of Adhesion & Adhesives, 24: 239-246, 2004.

[52] AROUCHE, M. M.: *Estudo Numérico-Experimental de Materiais Compósitos utilizados no Reparo de Estruturas Navais*. Projeto final para bacharel em Engenharia Mecância, CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2015.

[53] ISO 527: *Plastics - Determination of tensile properties*, 2012.

[54] ANSYS, INC.: *Software de Elementos Finitos*, versão 15.0, 2013.

[55] AROUCHE, M. M.: *Efeito da umidade na adesão de juntas coladas CFRP-aço*. Dissertação de Mestrado, CEFET/RJ, PPEMM, Rio de Janeiro, 2016.

[56] ANSYS® Help: *ANSYS Help Viewer*, version: 15.0, 2013.