



NOVA
NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL

JOÃO MANUEL NUNES FARIA BORDA

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

PERSPETIVA TEÓRICA DE DIFERENTES TIPOS DE LIGAÇÕES COLADAS SUJEITAS A AÇÕES MONOTÓNICAS

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2022



PERSPETIVA TEÓRICA DE DIFERENTES TIPOS DE LI- GAÇÕES COLADAS SUJEITAS A AÇÕES MONOTÓNI- CAS

JOÃO MANUEL NUNES FARIA BORDA

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Doutor Hugo Emanuel Charrinho da Costa Biscaia,
Professor Auxiliar Convidado, DEMI, Universidade NOVA de Lisboa

Coorientador: Prof. Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo,
Professor Associado, DEC, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Marta Isabel Pimenta Verdete da Silva Carvalho,
Professora Auxiliar, DEMI, Universidade NOVA de Lisboa

Arguentes: Prof. Doutor João Mário Burguete Botelho Cardoso,
Professor Auxiliar, DEMI, Universidade NOVA de Lisboa

Prof. Doutor Hugo Emanuel Charrinho da Costa Biscaia,
Professor Auxiliar Convidado, DEMI, Universidade NOVA de Lisboa

Perspetiva Teórica de Diferentes Tipos de Ligações Coladas Sujeitas a Ações Monotónicas

Copyright © João Manuel Nunes Faria Borda, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, é com enorme felicidade que concluo esta exigente caminhada da qual me orgulho e que contou com a ajuda de várias pessoas às quais quero deixar um agradecimento especial.

Ao Professor Hugo Biscaia, meu orientador da dissertação, agradeço pelo apoio, incentivo e disponibilidade prestada em todo o processo. A ele agradeço pela exigência e pelos vários desafios lançados aos quais conduziram ao enriquecimento deste trabalho.

Ao Professor Rui Micaelo, meu coorientador, agradeço a sua disponibilidade, os conhecimentos transmitidos pela sua experiência e toda a bibliografia facultada.

Aos meus pais agradeço por me proporcionarem e tornarem possível o meu percurso académico, por serem o meu pilar de motivação e por todo o carinho.

À minha irmã agradeço a sua presença em todos os momentos que precisei sempre com uma palavra de aconchego e por toda a motivação que me transmite.

Aos meus amigos, Bernardo Beirão, Francisco Correia, Gonçalo Mestre, Guilherme Piedade, Henrique Fernandes, João Oliveira, Luís Costa, Luís Fernandes, Manuel Baptista, Manuel Carvalho, Tiago Farinha, Tomás Branco e Tomaz Barreiro, agradeço por todos os incentivos, por toda a compreensão nos momentos em que não consegui estar presente e por toda a amizade.

Aos meus colegas de curso, Daniel Castro, Francisco Xara, Guilherme Sousa, Gonçalo Pereira, João Medeiros, Mariana Vinhas, Manuel Filipe, Miguel Batista, Pedro Vaz, Raquel Rodrigues, Ricardo Nunes e Vasco Martins que me acompanharam ao longo desta jornada agradeço pela amizade e pelos conhecimentos adquiridos na realização dos diversos trabalhos de grupo ao longo de todo o curso.

À Patrícia Andrade agradeço pela sua disponibilidade, preocupação, cuidado e motivação em todos os momentos que precisei.

A todos um obrigado pela vossa contribuição à realização desta investigação.

RESUMO

O presente trabalho aborda um estudo paramétrico sobre a caracterização do comportamento de descolamento em três tipos de ligações coladas quando sujeitas a um carregamento monotónico.

A motivação para a realização deste estudo surgiu da necessidade de aprofundar trabalhos já realizados por vários investigadores, para um conhecimento mais detalhado sobre o comportamento da ligação híbrida colada quando sujeita a carregamento puramente monotónico.

Nesta dissertação é realizada uma análise com recurso ao Método dos Elementos Discretos para analisar a interface entre dois materiais colados. O comportamento na interface é discretizado através de molas axiais e de corte, e é definido utilizando um modelo analítico bilinear força-deslizamento.

Três geometrias de ligação colada foram selecionadas e estudadas permitindo realizar comparações entre os resultados obtidos: ligação colada em sobreposição dupla, em degrau duplo e degrau triplo. Foram também selecionados dois materiais estruturais para os aderentes, polímeros reforçados com fibras de carbono (da literatura internacional *Carbon Fiber Reinforced Polymers* - CFRP) e a liga de alumínio 7050, comtemplando-se, ainda diferentes rácios de rigidez axial. No total, foram realizadas 36 simulações.

Com base numa avaliação das respostas carga-deslizamento, slip-comprimento colado, distribuição de tensões e análise do dano ao longo da ligação, este trabalho permitiu identificar qual a ligação colada com melhor desempenho face a um carregamento monotónico e consistente com o 2º modo de fratura.

Palavas chave: Ligação colada, rácio de rigidez axial, MED, deslizamento, CFRP

ABSTRACT

The present paper is devoted to a parametric study on the characterization of the debonding behavior of three types of bonded joints when subjected to monotonic loading consistent with fracture mode II.

The motivation of this study arose from the need to study, in more detail, the work developed so far by other researchers and provide more detailed knowledge about the behavior of hybrid bonded connections when subjected to a purely mode II monotonic loading.

In this dissertation an analysis using the Discrete Element Method (DEM) is performed to analyze the interfacial bond behavior of hybrid bonded joints with different geometries. The behavior at the interface is discretized using axial and shear springs and is defined using a bilinear force-slip analytical model.

Three types of bonded joints with different geometries were selected and studied which also allowed the comparison of the results obtained from the: double overlap, double step, and triple step bonded joints. Two structural materials for the adherends, Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) and aluminum alloy 7050, were selected, and a set of axial stiffness ratios were chosen. A total of 36 simulations were carried out.

Based on the assessment of the load-slip responses, bonded slip-length, stress distribution and damage analysis throughout the bonded length of the most advantageous CFRP bonded connection was identified.

Keywords: Bonded joint, axial stiffness ratio, DEM, slip, CFRP

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XV
ÍNDICE DE TABELAS.....	XIX
SIGLAS	XXI
SÍMBOLOS	XXIII
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento do tema.....	1
1.2 Motivação e Objetivos	3
1.3 Metodologia.....	4
1.4 Organização do documento.....	4
2 ESTADO DE ARTE.....	7
2.1 Ligações coladas	7
2.1.1 Evolução dos adesivos e processos de ligações coladas.....	8
2.1.2 Aplicações	10
2.1.3 Tipos de Ligações Adesivas.....	11
2.1.4 Modos de Carregamento.....	12
2.1.5 Tipos de Fratura em Ligações Adesivas	14
2.1.6 Modos de rotura.....	15
2.1.7 Vantagens das ligações coladas	17

2.1.8	Desvantagens das ligações coladas	17
2.2	Polímeros reforçados com fibras.....	18
2.3	Parâmetros que influenciam o desempenho das ligações coladas	20
2.3.1	Tratamento superficial	20
2.3.2	Agentes Atmosféricos.....	22
2.3.3	Comprimento da sobreposição	23
2.3.4	Espessura do adesivo.....	24
2.4	Métodos numéricos.....	25
2.4.1	Método dos elementos finitos	25
2.4.2	Método dos elementos discretos.....	26
2.5	Previsão da resistência de uma ligação.....	33
2.5.1	Mecânica dos meios contínuos.....	33
2.5.2	Mecânica da fratura	34
2.5.3	Mecânica do dano	34
2.6	Determinação do dano na ligação	37
3	MODELOS NUMÉRICOS.....	39
3.1	Materiais considerados.....	39
3.2	Programa de ensaios.....	40
3.3	Modelo coesivo adotado	42
3.4	Considerações gerais na modelação.....	44
3.5	Metodologia dos ensaios.....	45
4	APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS	47
4.1	Comprimento efetivo e força máxima de rotura	47
4.2	Resposta Força- Deslizamento	49
4.2.1	Ligação Sobreposição Simples	50
4.2.2	Ligação em Degrau Duplo.....	51
4.2.3	Ligação em Degrau Triplo	52
4.3	Distribuição do <i>slip</i> ao longo do comprimento colado.....	53
4.3.1	Ligação Sobreposição Simples	53

4.3.2	Ligação em Degrau Duplo.....	56
4.3.3	Ligação em Degrau Triplo.....	58
4.4	Distribuição de Tensões.....	60
4.4.1	Ligação Sobreposição Simples.....	60
4.4.2	Ligação em Degrau Duplo.....	66
4.4.3	Ligação em Degrau Triplo.....	68
5	CONCLUSÕES E TRABALHO DE FUTURO.....	73
5.1	Conclusões.....	73
5.2	Desenvolvimentos para trabalho futuro.....	74
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ligações coladas na indústria automóveis: (i) ligações estruturais; (ii) ligações anti vibração, adaptado Lotus [15]	10
Figura 2.2 - Representação das ligações coladas num perfil de uma pá de turbina eólica, adaptado de Droubi <i>et al.</i> [14].	11
Figura 2.3 -Diferentes tipos de ligação na fuselagem de um avião, adaptado de Sameer Shaikh <i>et al.</i> [15]	11
Figura 2.4 - Tipos de ligações adesivas, adaptado de [18]	12
Figura 2.5 - Modos de carregamento mais comuns em ligações adesivas.....	13
Figura 2.6 - Modos de fratura: (a) Modo I (<i>opening</i>); (b) Modo II (<i>In-plane shear</i>); e (c) Modo III (<i>Out-of-plane shear</i>). Adaptado de [28].....	14
Figura 2.7 - Resposta bilinear em Modo I, Modo II e misto.....	15
Figura 2.8 - Modos de rotura em Ligações Adesivas.....	15
Figura 2.9 - Concentração de tensões em ligações rebitadas e coladas, adaptado de [16]	17
Figura 2.10 - Evolução de utilização dos diferentes tipos de materiais	19
Figura 2.11 - Processo de cálculo	28
Figura 2.12 - Discretização de duas partículas em contacto	29
Figura 2.13 - Elementos coesivos para simular uma espessura nula de material - a) Aproximação local; Elementos coesivos para modelar uma espessura finita de material entre dois substratos - b) Aproximação contínua, adaptado de [1].....	35
Figura 2.14 - Modelos de <i>bond-slip</i> , adaptado de [69]	37
Figura 3.1 - Comparação das propriedades mecânicas dos materiais dos substratos	40
Figura 3.2 - Esquema das ligações: (a) Ligação Sobreposição Simples; (b) Ligação em Degrau Duplo e (c) Ligação em Degrau Triplo.....	41
Figura 3.3 - Ilustração do cálculo da rigidez axial, na ligação de degrau triplo.	41
Figura 3.4 – Lei bilinear Força-Separação sob carregamento monotónico, adaptado de [59]..	44
Figura 3.5 - Representação do modelo na LSD	45
Figura 3.6 - Representação do modelo na ligação de múltiplos degraus	45
Figura 4.1 - Comparação comprimento efetivo e força máxima de ligação colada sobreposição simples	48

Figura 4.2 - Força Interfacial <i>vs.</i> <i>Slip</i> _Monotónico.....	50
Figura 4.3 - Força Interfacial <i>vs.</i> <i>Slip</i> _Lb150_Duplo	51
Figura 4.4 - Força Interfacial <i>vs.</i> <i>Slip</i> _Lb150_Triplo	52
Figura 4.5 - <i>Slip vs.</i> Comprimento colado_CFRP-CFRP	54
Figura 4.6 - <i>Slip vs.</i> Comprimento colado_CFRP-AI	56
Figura 4.7 - <i>Slip vs.</i> Comprimento colado_Lb150_Duplo	57
Figura 4.8 - <i>Slip vs.</i> Comprimento colado_Lb150_Triplo	59
Figura 4.9 - Tensão de aderência <i>vs.</i> Comprimento colado_r129.....	62
Figura 4.10 - Tensão de aderência <i>vs.</i> Comprimento colado_r514.....	63
Figura 4.11 - Tensão de aderência <i>vs.</i> Comprimento colado_r100	65
Figura 4.12 - Tensão de aderência <i>vs.</i> Comprimento colado_r100_r019.....	66
Figura 4.13 - Tensão de aderência <i>vs.</i> Comprimento colado_r514_r019.....	67
Figura 4.14 - Tensão de aderência <i>vs.</i> Comprimento colado_r514_r100	68
Figura 4.15 - Tensão de aderência e Dano <i>vs.</i> Comprimento colado_r129_r100_r078.....	69
Figura 4.16 - Tensão de aderência e Dano <i>vs.</i> Comprimento colado_r514_r100_r019.....	69
Figura 4.17 - Tensão de aderência e Dano <i>vs.</i> Comprimento colado_514_r129_r100.....	70

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas de adesivos estruturais, adaptado de [10]	9
Tabela 2.2 - Propriedade mecânicas das fibras mais utilizadas em FRP	18
Tabela 2.3 - Efeitos da preparação superficial em aderentes de alumínio com adesivo epoxídico, adaptado de [39].....	21
Tabela 3.1 - Propriedade mecânicas do alumínio e CFRP	39
Tabela 3.2 - Listagem de ensaios de modelos numéricos	43
Tabela 4.1 - Valores de comprimento efetivo e força máxima de rotura nos diferentes rácios de rigidez axial.....	49
Tabela 4.2 - Identificação do início do descolamento dos aderentes nas diferentes ligações ..	71

SIGLAS

2D	Duas Dimensões
AFRP	<i>Aramid Fiber Reinforced Polymer</i>
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>
EDP	Equações Diferenciais Parciais
FCT	Faculdade Ciências e Tecnologia
FRP	<i>Fiber Reinforced Polymer</i>
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>
HDT	<i>Heat Deflection Temperature</i>
LDD	Ligação em Degrau Duplo
LDT	Ligação em Degrau Triplo
LSS	Ligação Sobreposição Simples
MCC	Mecânica dos Meios Contínuos
MDC	Modelo Dano Coesivo
MED	Método dos Elementos Discretos
MEF	Método dos Elementos Finitos
MF	Mecânica da Fratura
MFL	Mecânica da Fratura Linear
UNL	Universidade Nova Lisboa

SÍMBOLOS

\dot{w}_i	Aceleração angular da partícula
\ddot{x}_i	Aceleração da partícula
Lb	Comprimento de ligação colada
L_{eff}	Comprimento efetivo de ligação
β_L	Constante adimensional
β	Constante coeficiente de amortecimento local não viscoso
D_n	Dano local
δ_E	Deslizamento elástico
δ_p	Deslizamento em regime amolecimento
S_1	Deslizamento no substrato 1
δ	Deslizamento relativo
δ_F	Deslizamento total
d	Distância entre os centros de massa das partículas
G_c	Energia de tenacidade
α_i	Entidade genérica
t	Espessura
ϵ_y	Extensão de cedência
ϵ_r	Extensão de rotura
K	Fator de intensidade de tensões

$F_n^{C, Anterior}$	Força contacto anterior, componente normal
$F_t^{C, Anterior}$	Força contacto anterior, componente tangencial
F_n^C	Força contacto, componente normal
F_t^C	Força contacto, componente tangencial
$F_{deb,i}$	Força de deslocamento
$F_{max,i}$	Força de rotura
$F_{i,d}^t$	Força que caracteriza o amortecimento
F_i^C	Força resultante no contacto
ΔF_n^C	Incremento da força, componente normal
ΔF_t^C	Incremento da força, componente tangencial
Δx_i^C	Incremento do deslocamento em cada contacto
Δx_n^C	Incremento do deslocamento, componente escalar
Δx_t^C	Incremento do deslocamento, componente tangencial
$t \pm n(\Delta t_2)$	Intervalo de tempo médio
$t \pm n\Delta t$	Intervalo de tempo primário
\mathbf{b}	Largura
ξ	Minimização do comprimento efetivo
\mathbf{E}	Módulo de elasticidade
$M_{3,d}^t$	Momento que caracteriza o amortecimento
\mathbf{n}_i	Plano de contacto das partículas
\mathbf{x}_i^A	Posição do centro de massa da partícula A
x_i^C	Posição do ponto de contacto
\mathbf{R}	Rácio de rigidez axial
r^A	Raio da partícula genérica A

k_n	Rigidez do contacto, componente normal
k_t	Rigidez do contacto, componente tangencial
K_e	Rigidez elástica
K_s	Rigidez no amolecimento
ϵ_{ijk}	Símbolo de permutação
Tg	Temperatura de transição vítrea
$\tau_{\text{máx}}$	Tensão de corte máxima
σ_R	Tensão de rotura
U_n	Valor de sobreposição no contacto
Δt	Variação de tempo
$\dot{x}_i^{[C],B}$	Velocidade da partícula B no ponto de contacto
$\omega_3^{\alpha i}$	Velocidade de rotação da partícula genérica
$\dot{x}_i^{\alpha i}$	Velocidade de translação da partícula genérica
$\dot{x}_i^{[C]}$	Velocidade no ponto de contacto

INTRODUÇÃO

O presente capítulo inicia-se com uma breve contextualização do tema a ser estudado e, seguidamente, detalha os principais objetivos aos quais a dissertação se propõe responder. Adicionalmente, o capítulo compreende a metodologia aplicada no desenvolvimento da dissertação e a estrutura do documento.

1.1 Enquadramento do tema

Desde sempre que o ser humano procurou obter produtos de melhor qualidade, mais económicos e com maior rapidez de produção, o que promoveu nos últimos anos, e em conjunto com uma evolução tecnológica exponencial, uma grande inovação no que diz respeito a materiais e métodos construtivos. A união de estruturas e materiais estruturais requer a realização de diversos estudos elaborados por cientistas e engenheiros e, conseqüente, ponderação entre as vantagens e desvantagens associadas a cada tipo de ligação.

Com a crescente procura por estruturas mais leves e ecológicas, os métodos de ligação de aperto mecânico, como rebitagem e aparafusamento, não são os mais favoráveis dado que promovem estruturas mais pesadas e cujo processo de fabrico é mais poluente. Apesar deste tipo de ligação apresentar diversas vantagens, como a facilidade de produção e a capacidade de desmontagem, também apresenta algumas desvantagens dado que não revela o desempenho desejado quando sujeito a cargas. Isto porque são criadas concentrações de tensão nos orifícios de fixação, conduzindo ao aparecimento de falhas e que, conseqüentemente, promovem a degradação do material. Por este motivo, têm vindo a ser estudados e testados outro tipo de ligações como uma alternativa aos métodos de ligação mais convencionais, nomeadamente, ligações adesivas.

De acordo com a Markets and Markets [1], estima-se que o atual mercado global para adesivos cresça de 63.2 Mil Milhões de dólares em 2020 para 80 Mil Milhões em 2025, com uma taxa de crescimento anual composta (TCAC) de 4,8%. Os principais impulsionadores de mercado são

as indústrias automível e aeronáutica que se têm dedicado à evolução deste tipo de ligações, na procura por automóveis e aviões com elevada resistência mecânica e menor peso possível. Atualmente, esta procura tem-se alastrado a outros sectores e indústrias como é o caso da indústria médica e de eletrodomésticos.

A eficiência de uma ligação colada depende, entre outros fatores, da configuração de geometria da ligação colada sendo necessário, consoante a aplicação a que se destina, determinar qual o melhor tipo de ligação. Embora o campo das ligações coladas já se encontre em desenvolvimento ao longo dos últimos 70 anos, a sua crescente popularidade promoveu uma nova abordagem, no que diz respeito a técnicas de análise, com a implementação de métodos numéricos [2]. Para uma melhor compreensão e previsão da evolução dos mecanismos de descolamento e rotura foram desenvolvidos por diversos autores na literatura científica, ensaios experimentais e numéricos de modo a estudar a influência de parâmetros como: temperatura de operação, comprimento e largura de ligação, espessura de substratos, espessura de adesivo, tipos de adesivo, configuração de ligação, entre outros.

Numa ligação adesiva, espera-se que esta seja capaz de suportar cargas estáticas ou cíclicas durante períodos consideráveis, sem qualquer efeito adverso sobre a capacidade de carga da estrutura. Verifica-se, no entanto, uma falta de modelos de materiais adequados e de critérios de falha apropriados, o que resultou numa tendência para "conceção excessiva" de ligações adesivas [1]. Existe, assim, uma necessidade em obter modelos precisos para a previsão da resistência em ligações coladas por forma a evitar testes de qualidade dispendiosos na fase de conceção. Embora a resistência dos diferentes tipos de ligações coladas possa ser determinada e avaliada com base em ensaios com carga monotónica, ainda não é possível ter uma compreensão completa do desempenho da ligação. Ao longo dos anos, têm vindo a ser desenvolvidos estudos em ligações coladas e a influência de parâmetros como: condições ambientais, tratamento de superfície, geometria de ligação, cargas mecânicas aplicadas e composição dos componentes de ligação.

A utilização de materiais compósitos, especialmente o Polímeros Reforçado com Fibras (*FRP*), têm aumentado exponencialmente desde o século XX. Na maioria das aplicações em vida real, a *FRP* requer a união com estruturas metálicas para formar estruturas complexas. O desenvolvimento de ligações coladas híbridas, isto é, ligações cujos materiais entre substratos são diferentes, é um processo crescente de ligação entre compósitos e metais com propriedades mecânicas desejáveis tais como: rigidez e resistência elevada, uma boa resistência à fadiga, combinada com um peso extremamente baixo, são características fundamentais para a indústria dos transportes.

No que diz respeito a ligações coladas híbridas, a ligação entre Polímeros Reforçados a Fibra de Carbono (CFRP) e ligas de alumínio tem sido o método convencional mais utilizado nas diversas aplicações de mercado [2]. Este pode ser encontrado, por exemplo, em capotas de turbinas, painéis de asas de avião, lâminas de helicóptero, cascos de navios e na carenagem de veículos.

1.2 Motivação e Objetivos

Embora a resistência de cada configuração de uma ligação colada possa ser facilmente calculada com a realização de testes com carga monotônica até à rotura, até aos dias de hoje, ainda não foi adquirida uma compreensão completa do desempenho de ligações coladas híbridas. Adicionalmente, uma vez que se espera que os diferentes tipos de carga atuem sobre a ligação durante o seu ciclo de vida útil, as condições de conceção destas ligações são da maior importância, e por esta razão, diversos autores têm vindo a realizar análises analíticas, experimentais e numérica, para uma melhor compreensão do comportamento da ligação colada híbrida.

A realização deste trabalho surge devido à necessidade de aprofundar estudos já realizados para um conhecimento mais detalhado sobre o comportamento da ligação híbrida colada quando sujeita a carregamento puramente monotónico.

A deterioração da força interfacial devido a ações monotónicas é ainda uma questão relevante para a qual não existe consenso entre os investigadores para a sua ampla diversidade de aplicações, tais como a delaminação de materiais compósitos utilizados na engenharia aeronáutica ou, de um modo geral, a previsão do tempo de vida de uma ligação colada.

O principal objetivo desta dissertação é a análise com recurso ao Método dos Elementos Discretos de diferentes tipos de ligações coladas, entre dois materiais estruturais, CFRP e a liga de alumínio 7050, quando sujeito a ações monotónicas. Para o seu desenvolvimento foram traçados os seguintes objetivos intermédios:

- (i) Pesquisar a bibliografia, sintetizar os principais temas de investigação elaborados por diversos autores e elaborar um resumo dedicado exclusivamente ao estado atual da arte;
- (ii) Desenvolver vários modelos discretos capazes de simular, o mais próximo da realidade possível, o comportamento de diferentes tipos de ligações coladas;
- (iii) Desenvolver uma análise onde sejam estudados a influência de determinadas variáveis.
- (iv) Interpretar o comportamento obtido nas diferentes ligações selecionadas e determinar daquela que oferece melhor resposta, tendo em conta os parâmetros estudados.

- (v) Face aos resultados obtidos, apresentar as conclusões mais relevantes e alcançadas durante a dissertação.

O Método dos Elementos Discretos (MED) possibilita estudar o início e a evolução da falha a nível macroscópico. Desta forma, serão estudados os mecanismos de falha deste tipo de ligações bem como determinar o seu tipo de rotura. Por fim, este trabalho permitirá também estudar a configuração da ligação colada mais vantajosa com CFRP com base numa análise na resposta de carga-deslizamento, *slip*- comprimento colado, distribuição de tensões ao longo da ligação e análise do dano.

1.3 Metodologia

Para simular o comportamento dos diferentes tipos de ligação realizou-se um estudo de modelos numéricos de ensaios mecânico com base no MED. Nesta dissertação, o estudo de diferentes tipos de ligações coladas implica a definição de diferentes geometrias de modelos e condições fronteira.

Efetuuou-se, em seguida, um estudo paramétrico com o intuito de avaliar a influência de cada parâmetro na resposta do material. Os parâmetros que se fizeram variar, na realização dos ensaios em cada tipo de ligação foram: o tipo de material de substrato, a razão entre rigidez axial dos materiais utilizados e o comprimento de ligação colado.

Na ligação de sobreposição simples, esta será modelada com dois conjuntos de materiais diferentes (CFRP-CFRP e CFRP- Alumínio), com três rácios de rigidez axial distintos ($R=1,00$ - $R=1,29$ - $R=5,14$) e dois comprimentos de ligação ($L_b=50\text{mm}$ e $L_b=150\text{mm}$). A ligação de degrau duplo e triplo, será modelada com os dois conjuntos de materiais (CFRP-CFRP e CFRP- Alumínio), com os três conjuntos de rácios de rigidez axial e apenas com um comprimento de ligação ($L_b=150\text{mm}$).

1.4 Organização do documento

A presente dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos, incluindo a introdução e conclusões. No primeiro capítulo é apresentado o tema da dissertação bem como um breve enquadramento do mesmo. São ainda delineados os objetivos a alcançar e a metodologia a proceder.

No **Capítulo 2** é elaborado um estado de arte sobre as ligações coladas, onde é detalhada o que consiste, aplicações onde se pode encontrar, os diferentes tipos de ligações coladas, os

modos de carregamento mais comuns, bem como, os tipos de fratura e modos de rotura que são observados neste tipo de ligação. Uma breve descrição das vantagens e limitações das ligações coladas face a outro tipo de ligações também é explorado.

Os parâmetros que influenciam o desempenho de ligações coladas também são descritos, nomeadamente, tratamento superficial, agentes atmosféricos como temperatura e humidade, comprimento de sobreposição e espessura do adesivo. São ainda abordados os principais métodos numéricos utilizados para a previsão do comportamento de ligações coladas, sendo o método dos elementos discretos aprofundado. Adicionalmente, também são referenciadas três metodologias de previsão de resistência de uma ligação colada.

No **Capítulo 3** é definido o modelo numérico utilizado na modelação das ligações. As características dos materiais utilizados como aderentes são enumeradas bem como todo o programa de ensaios e sua metodologia. O modelo coesivo é definido com base nas características dos materiais e tipo de esforço aplicado e as limitações do estudo são apresentadas.

No **Capítulo 4** os resultados obtidos das simulações realizadas são apresentados. São determinados o comprimento efetivo e a força de rotura na ligação de sobreposição simples. Uma interpretação detalhada é feita para a distribuição de tensões e dano na ligação. Adicionalmente são descritas as respostas força- deslizamento e deslizamento- comprimento colado.

No **Capítulo 5**, é realizada uma análise global ao trabalho efetuado e são apresentadas as principais conclusões derivadas do estudo. Para além disto, são apuradas perspectivas e sugestões para possíveis desenvolvimentos de trabalhos complementares no estudo do comportamento em ligações coladas híbridas.

ESTADO DE ARTE

Neste capítulo os conceitos mais relevantes ao tema em estudo serão destacados e detalhados. Uma breve apresentação do conceito de ligações coladas é descrita, bem como o material por elas constituído. Alguns dos parâmetros que mais impactam o desempenho destas ligações são abordados, nomeadamente: a influência do tratamento superficial, de agentes atmosféricos, comprimento de ligação, espessura do adesivo e tipo de adesivo.

Por fim, é realizada uma descrição teórica dos principais modelos numéricos utilizados em estudos de previsão do comportamento de ligações coladas: método dos elementos finitos e método dos elementos discretos, assim como dos métodos de previsão de resistência de uma ligação.

2.1 Ligações coladas

Uma ligação adesiva é, por definição, a união entre duas superfícies que podem ser do mesmo material ou de materiais diferentes, denominados aderentes, e uma substância de um material diferente a que se dá o nome de adesivo. O adesivo tem como funcionalidade a adesão das duas superfícies dos aderentes, transferindo as forças de um aderente para o outro.

Atualmente, a tecnologia das ligações adesivas encontra-se fortemente disseminada no mercado, oferecendo assim uma grande flexibilidade ao nível de conceção e projeto de ligações coladas. Em termos de processo de fabrico, é aplicável tanto nas produções em série, como nas produções peça a peça.

No que diz respeito à resistência e deformação admissíveis dos adesivos, a indústria tem evoluído bastante, sendo que, hoje-em-dia, existe uma grande variedade de adesivos com as propriedades mecânicas capazes de proporcionar ligações de elevada resistência e com tempos de cura bastante reduzidos. Deste modo, o ceticismo que anteriormente existia a nível da du-

rabilidade e resistência das ligações adesivas a longo termo, e em condições ambientais adversas, já não se justifica, desde que as ligações sejam bem concebidas de acordo com as especificações dos fabricantes.

2.1.1 Evolução dos adesivos e processos de ligações coladas

Este processo de ligação de materiais já remonta ao período Neolítico, cerca de 10.000 a.C. onde o ser humano utilizava resina de árvores de Bétula para a ligação de pontas de setas ou machados. Outros exemplos de produtos utilizados como adesivo foram sangue de animal, proteínas, resinas vegetais e asfalto que foram usados na construção de casas e templos na Babilónia [3]. Anos mais tarde, os egípcios aperfeiçoaram esta técnica, produzindo as primeiras colas a partir da cozedura de peles e cartilagens de animais, cascos e tecidos animais [4]. Estas estariam depois presentes em reforço de pergaminhos e produção de mobiliário, como é o exemplo do caixão de Tutankhamun que foi construído com recurso a esta tecnologia. Os gregos e os romanos desenvolveram mais a tecnologia. Os antigos gregos utilizavam adesivos na carpintaria. As colas eram geralmente feitas de claras de ovo, sangue, ossos, leite, queijo, vegetais e grãos. O alcatrão e a cera de abelhas foram implementados mais tarde pelos romanos [3].

A área moderna dos adesivos começa no século XIX com a utilização de borracha natural como adesivo em 1830. Dez anos mais tarde, a vulcanização da borracha foi descoberta por Charles Goodyear e utilizada para fins adesivos [5], seguida pelo celuloide em 1862 por John Wesley Hyatt [6]. A maioria dos materiais naturais de ligação têm vindo a ser substituídos por adesivos sintéticos, como é o caso das resinas fenólicas introduzidas nos anos 20. Com a Segunda Guerra Mundial, ocorreram grandes desenvolvimentos na área dos adesivos, incluindo o polibutadieno (1935), resina epóxi (1938), cianoacrilato (1942-1951, Eastman), e cola termoplástica (Procter & Gamble, 1940) [7]. De facto, atualmente, são conhecidos vários tipos de adesivos que, de um modo geral, podem agrupar-se de acordo com a sua composição química, natureza, forma física, função ou método de reação.

Os principais grupos de adesivos são: epoxídicos, poliuretano e acrílicos. As resinas epoxídicas têm como principais vantagens a sua capacidade de preenchimento de espaços, uma resistência mecânica elevada, boa adaptabilidade em diferentes tipos de aderentes, rigidez e durabilidade. O processo de cura destes adesivos não necessita da aplicação de pressão, pelo que basta o simples posicionamento das peças a serem coladas. Para além disto, possuem ainda boa resistência a agentes atmosféricos bem como um largo intervalo de valores de temperatura de aplicação. O seu custo também é relativamente reduzido quando comparado com as restantes [8, 9].

Quanto aos adesivos de poliuretano, estes resultam da reação de um polioliol (ou poliéster-polioliol) com um isocianato e o seu processo de cura efetua-se lentamente à temperatura ambiente. Os adesivos de poliuretano possuem uma boa durabilidade dada a sua resistência à água e químicos. Em comparação com as resinas epoxídicas, são ligeiramente mais dúcteis e menos resistentes à fadiga e efeitos da humidade. Não obstante, apresentam ainda vários tempos de cura disponíveis e má resistência ao calor [8, 9]. As limitações principais incluem a elevada sensibilidade às proporções da mistura e a toxicidade do isocianato.

Por fim, os adesivos acrílicos têm como principal aplicação as estruturas endurecidas. Este tipo de adesivo requer uma preparação superficial mínima e, assim como o poliuretano, apresenta diversos tempos de cura [8].

A Tabela 2.1 resume as principais propriedades mecânicas de cada tipo de adesivo anteriormente mencionado. Devido à elevada oferta de adesivos atualmente no mercado, é possível obter uma vasta gama de valores nas propriedades dos mesmos.

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas de adesivos estruturais, adaptado de [10]

Propriedades (a 20°C)	Epoxídico	Poliuretano	Acrílico
Deformação na rotura por corte (%)	5 - 50	50 - 200	50 - 200
Deformação na rotura por tração (%)	1 - 4	10	50
Módulo de Distorção (GPa)	0,5 - 2,0	0,1 - 0,2	0,01 - 0,02
Módulo de elasticidade à tração (GPa)	1 - 10	≤ 0,5	≤ 0,5
Resistência à tração (MPa)	20 - 40	15 - 25	15 - 35
Resistência ao corte (MPa)	15 - 35	15 - 25	15 - 25

Nos últimos anos, as ligações coladas têm vindo a obter reconhecimento pela sua eficácia, elevado rendimento e segurança de utilização. Com os avanços na ciência química, foram criados adesivos de alto rendimento capazes de aderir substratos de material orgânico e inorgânico, pelo que a utilização deste tipo de ligação torna-se cada vez mais atrativa devido à maior resistência a esforços de arrancamento e corte, bem como a ductilidade permitida até a falha em certos adesivos [10]. Para garantir a qualidade de uma ligação adesiva, é crucial que o adesivo apresente uma coesão e adesão adequada à superfície de cada material que compõe os aderentes. A adesão, está relacionada com a força de ligação entre o adesivo e o aderente, enquanto a coesão refere-se à interação entre moléculas que permite a formação de um só material [11].

2.1.2 Aplicações

Com o evoluir da tecnologia, tem-se desenvolvido uma grande variedade de adesivos, o que faz com que, atualmente, existam vários tipos de ligações coladas, com propriedades específicas consoante a aplicação que se pretende. No mercado, as ligações coladas estão presentes nas seguintes indústrias: automóvel, aeroespacial, construção, náutica, eólica e calçado [12]. Em seguida, serão apresentados vários exemplos onde se podem encontrar ligações adesivas.

Na indústria automóvel, as ligações coladas estão em grande expansão, nomeadamente em carros de alta gama e carrinhas. Numa perspetiva quantitativa, o novo modelo Classe S Coupé da Mercedes possui mais de 100 metros de ligações coladas em toda a carroçaria, e o BMW série 7 conta com mais de 10 kg de adesivo estrutural. Na estrutura do automóvel, as ligações coladas têm duas funções: (i) diminuir as vibrações entre material e compensar as tolerâncias; e (ii) ligações estruturais [13]. Na Figura 2.1 pode-se observar diferentes exemplos da utilização de ligações coladas na indústria automóvel.

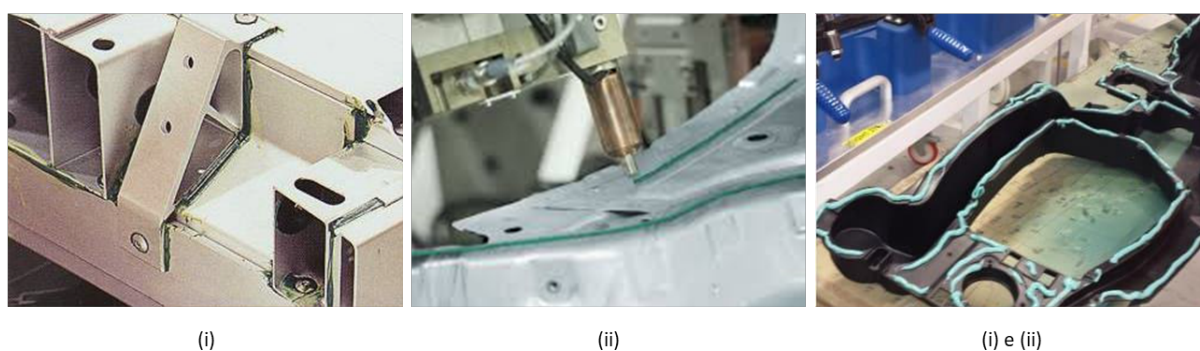


Figura 2.1 - Ligações coladas na indústria automóveis: (i) ligações estruturais; (ii) ligações anti vibração, adaptado Lotus [15]

Outra indústria onde se verifica a utilização de ligações coladas é a eólica, nomeadamente, na produção de pás das turbinas eólicas, Figura 2.2. Estas, são produzidas a partir de duas cascas que, de seguida, são coladas. Droubi *et al.* [14], realizou um estudo onde se avaliou a resistência ao impacto utilizando diferentes configurações de ligação na vanguarda de uma turbina eólica. Neste estudo, foi possível concluir que uma ligação colada descentrada é desejável, visto que é capaz de suportar entre 49% a 96% mais carga comparativamente a ligações centradas.

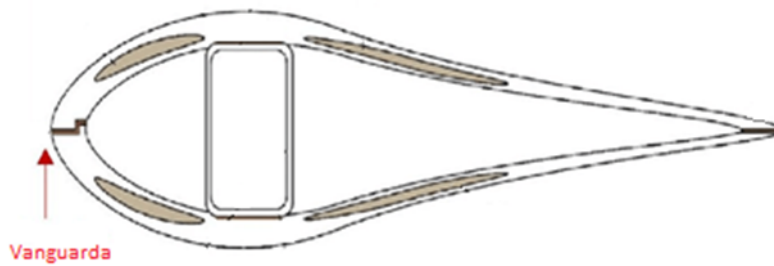


Figura 2.2 - Representação das ligações coladas num perfil de uma pá de turbina eólica, adaptado de Droubi *et al.* [14].

A modernização dos adesivos encontra-se diretamente relacionada com o desenvolvimento das indústrias aeronáuticas e aeroespaciais, pioneiras na utilização de ligações coladas. Desde o princípio, o peso dos materiais usados neste tipo de indústria é um fator preponderante para a eficiência e funcionamento de um avião. Um dos grandes exemplos práticos de ligações adesivas encontra-se nas fuselagens dos aviões, Figura 2.3. A utilização de ligações adesivas nestas estruturas tem vindo a permitir uma redução gradual do peso total da estrutura bem como torná-la mais flexível.

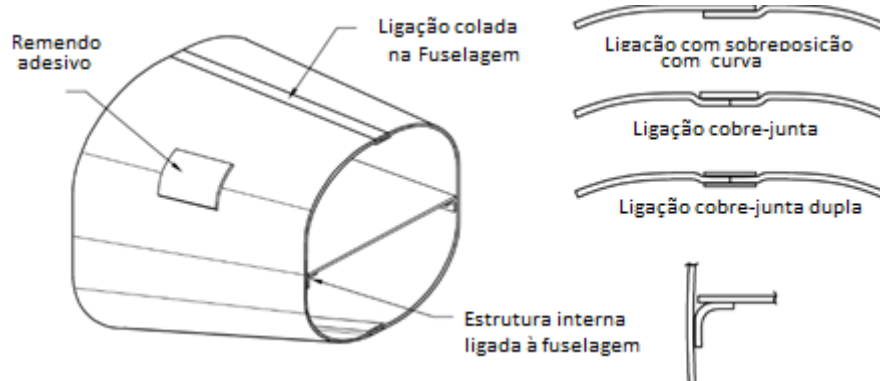


Figura 2.3 -Diferentes tipos de ligação na fuselagem de um avião, adaptado de Sameer Shaikh *et al.* [15]

Na indústria náutica, a utilização de materiais plásticos e compósitos ligados por adesivos estruturais tem aumentado, principalmente em embarcações de luxo. É de referir que para esta aplicação é preciso ter em consideração que o adesivo deverá apresentar uma elevada resistência à humidade e à corrosão, uma vez que os meios marinhos são bastante abrasivos para a ligação [16].

2.1.3 Tipos de Ligações Adesivas

As ligações adesivas (LA) podem ter diversas configurações consoante as aplicações a que se destinam. As LA mais comuns são: ligações de sobreposição simples (*single lap joint*), ligações de sobreposição dupla (*double lap joint*), ligações em chanfro (*scarf joints*) e ligações em degraus

(stepped joint). Cada configuração tem as suas vantagens e desvantagens. As principais diferenças entre cada uma delas estão na facilidade de fabrico e na introdução de concentrações de tensões. Há dois grandes grupos: os inicialmente concebidos para ligar componentes estruturais e os utilizados para reparar defeitos como fissuras.

Devido à sua facilidade de fabricação, a ligação adesiva mais frequente em testes na literatura é a ligação de sobreposição simples. No entanto, esta configuração apresenta o pior desempenho quando comparado com as restantes geometrias com igual comprimento de colagem, isto porque o carregamento não é colinear o que induz flexão nos substratos. Deste modo, o adesivo fica sujeito a forças de corte, bem como, arrancamento na extremidade da ligação [17].

A Figura 2.4 apresenta quais os tipos de ligações coladas mais presentes no dia-a-dia, bem como quais são os que apresentam melhor resistência mecânica quando submetidos a esforços de tração. Para além destes tipos de ligações adesivas, existem ainda outros tipos de geometrias mais complexas, nomeadamente, ligações tubulares ou ligações em T, que são utilizadas em diversas aplicações.

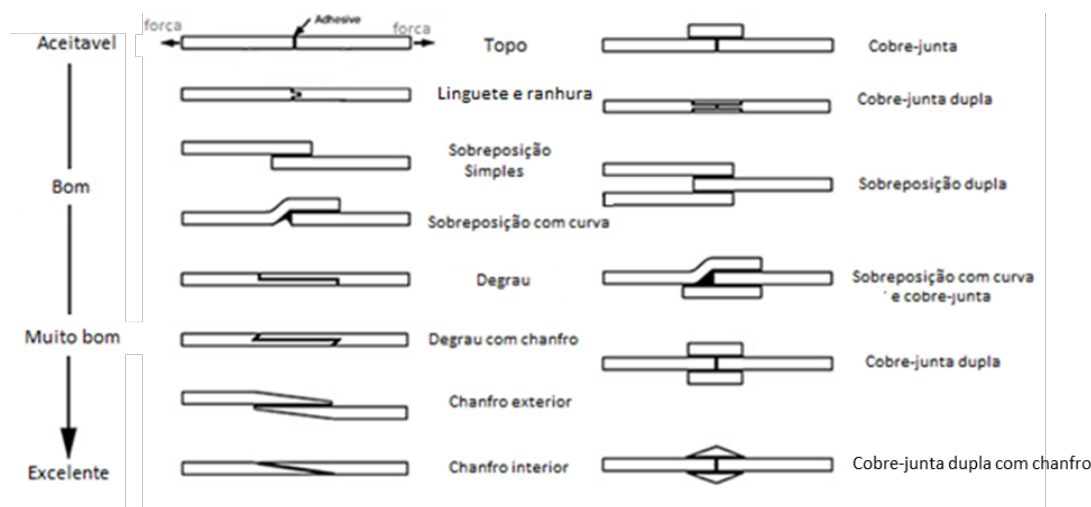


Figura 2.4 - Tipos de ligações adesivas, adaptado de [18]

2.1.4 Modos de Carregamento

As possíveis configurações onde é possível aplicar ligações coladas podem ser tão vastas quanto os modos de carregamento possíveis. No entanto, existem modos de carregamento mais comuns, que podem ser identificados na seguinte Figura 2.5.

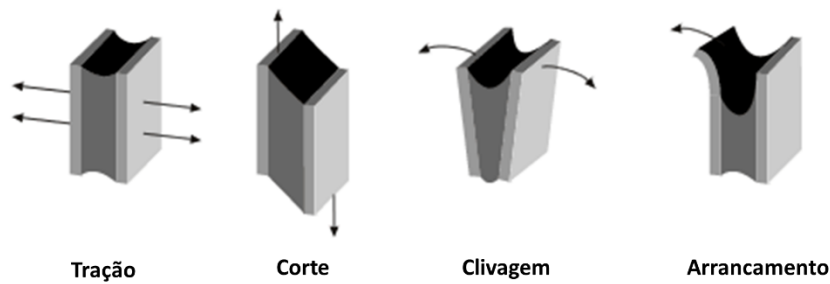


Figura 2.5 - Modos de carregamento mais comuns em ligações adesivas

Esforços de Tração

Os esforços de tração ocorrem quando se aplicam forças de sentidos opostos e perpendiculares ao plano da ligação, resultando numa distribuição de forças uniforme ao longo da região colada. Quando sujeito a este tipo de esforços, as extremidades do material são os pontos mais sujeitos ao início do dano devido à concentração de tensões nesta área. Por este motivo, uma pequena fissura nesta zona irá propagar-se ao longo da ligação, levando à sua total fratura. Uma ligação colada bem projetada demonstrará boa resistência à tração devido à distribuição de carga paralela aos substratos, e cargas alinhadas axialmente [7]. No entanto, é comum em aplicações práticas, a tolerância da espessura do adesivo ser difícil de controlar, o que compromete a total axialidade de cargas, levando ao aparecimento indesejável de esforços de clivagem ou de arrancamento.

Esforços de Corte

Os esforços de corte surgem quando são aplicadas forças de sentidos opostos e que atuam no plano do adesivo. Verifica-se que os adesivos são geralmente mais resistentes quando solicitados a esforços de corte, uma vez que, toda a área colada contribui para a resistência da ligação [7]. Para além disso, os substratos mantêm-se facilmente alinhados. As ligações fabricadas para operarem em condições de carregamento de corte são relativamente fáceis de produzir e apresentam o melhor desempenho, pelo que, naturalmente, são as mais utilizadas.

Esforços de Clivagem e Arrancamento

A clivagem define-se como o tipo de esforço que surge quando existem forças aplicadas perpendicularmente ao plano da ligação e na extremidade dos substratos rígidos. O esforço por arrancamento é igual ao esforço de clivagem, no entanto, a força apenas é aplicada a um substrato. As ligações carregadas sob clivagem ou arrancamento oferecem uma resistência muito menor quando comparado com ligações carregadas em corte ou tração, porque apenas uma

pequena área da ligação está a ser solicitada [7]. Por este motivo, a clivagem e o arrancamento são esforços indesejáveis quando se pretende utilizar ligações adesivas.

2.1.5 Tipos de Fratura em Ligações Adesivas

A fratura das ligações adesivas pode ocorrer devido a diferentes razões que dependem da preparação da ligação e das condições de serviço. Identificando os modos de carregamento aplicados é importante conhecer os principais modos de fratura de uma ligação, para que se consiga obter um bom entendimento dos possíveis mecanismos de falha:

1. **Modo I – Abertura (*Opening*):** Interface da ligação separa-se perpendicularmente ao plano de fratura, como se pode aferir na Figura 2.6 a);
2. **Modo II – Deslizamento (*In-plane shear*):** Ocorrem deslocamentos relativos entre as interfaces no plano de fratura, como é possível verificar na Figura 26 b);
3. **Modo III – Deslizamento (*Out-of-plane shear*):** Ocorrem deslocamentos relativos entre as interfaces, num plano perpendicular ao plano de fratura, como ilustra a Figura 2.6 c).

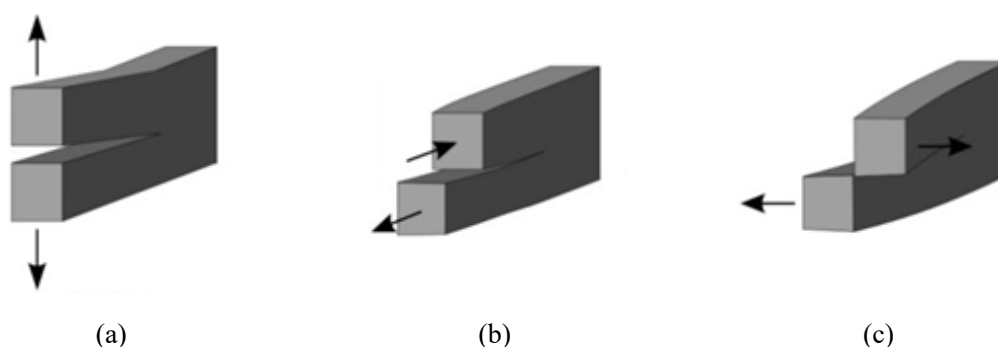


Figura 2.6 - Modos de fratura: (a) Modo I (*opening*); (b) Modo II (*In-plane shear*); e (c) Modo III (*Out-of-plane shear*). Adaptado de [28].

Na presente dissertação irá utilizar-se um Modelo de Dano Coesivo (MDC) com resposta bilinear de tração-separação, para modelar o dano progressivo da ligação adesiva. Na Figura 2.7, encontra-se representada a resposta bilinear que será adotada para a modelação (Modo II). A falha de ligação associada ao fenómeno de descolamento do Modo II é o caso mais estudado devido à sua relevância mais prática quando comparado com os outros dois modos de fratura, ou seja, os Modos I e III [19]. No Subcapítulo 3.3, será abordado em maior detalhe o MDC escolhido.

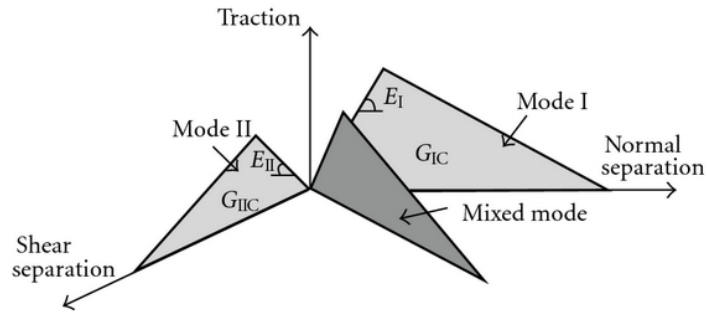


Figura 2.7 - Resposta bilinear em Modo I, Modo II e misto.

2.1.6 Modos de rotura

A ligação adesiva tem como propósito transmitir a carga entre dois substratos, mantendo a integridade da ligação sob solicitações estáticas e/ou cíclicas. Quando uma ligação adesiva é projetada, existem diversos aspetos que são tidos em conta por forma a evitar a rotura precoce da ligação, principalmente pelo adesivo. Em ligações cujo substrato seja compósito, há que ter em consideração os seguintes parâmetros: a contaminação da superfície, o acabamento do adesivo, a espessura do adesivo, a sequência de empilhamento, a orientação das camadas e as condições ambientais (humidade e temperatura) [20]. Porém, ainda é difícil de prever o modo de rotura numa ligação adesiva devido à complexidade na correlação destes parâmetros. De um modo geral, podem distinguir-se quatro tipos de rotura em ligações adesivas, como se observa na Figura 2.8. **Erro! A origem da referência não foi encontrada..**

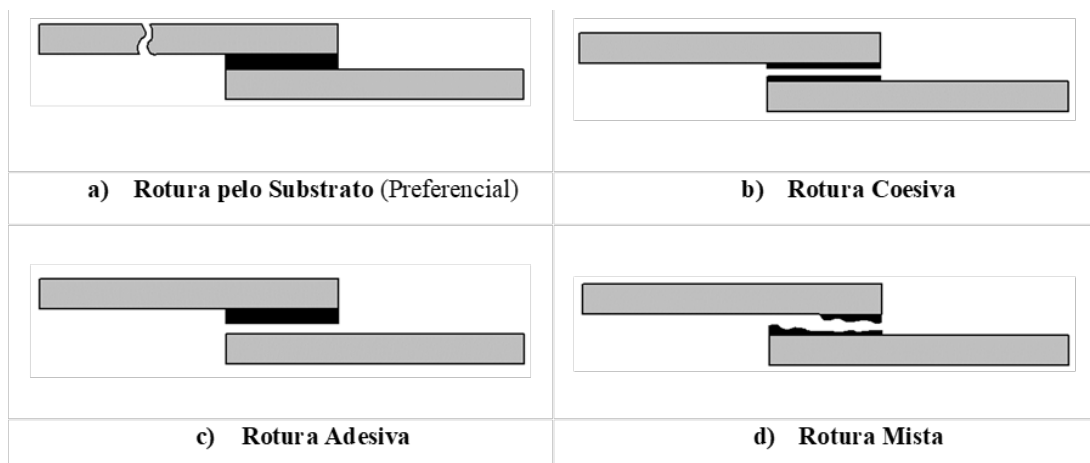


Figura 2.8 - Modos de rotura em Ligações Adesivas

Rotura Coesiva

Este tipo de rotura ocorre quando a força de ligação é maior do que a força interna do material (adesivo ou substrato). Quando a rotura é no substrato, obtém-se o modo de rotura coesiva

pelo substrato. Possíveis causas da rotura coesiva são: tensões de trabalho superiores às projetadas; tempo de cura insuficiente; defeitos adesivos (porosidades, bolhas) [21].

Rotura pelo Substrato

Ocorre quando as forças de ligação do substrato são menores às forças na interface entre adesivo/substrato e que as forças coesivas do adesivo. Este tipo de rotura é o ideal dado que a ligação é comprometida pela rigidez do substrato e não pela ligação adesiva. Apesar de ser o tipo de rotura preferível, não é o mais comum. Esta situação deve-se a fatores como: mau dimensionamento do substrato; tensão de rotura do material do substrato é menor que a da ligação adesiva; danificação da ligação por agentes químicos, condições ambientais ou corrosões que comprometem as propriedades mecânicas do material [21].

Rotura Adesiva

Ocorre na interface, isto é, na zona de ligação entre o adesivo e o substrato. A rotura total ou parcial pode ocorrer em um ou ambos os substratos. Para evitar este tipo de rotura, quando se realizam testes experimentais é fundamental efetuar um tratamento de superfície antes de realizar a colagem. Tem como causas: má preparação superficial; má seleção de adesivo; uso inadequado de solventes; espessura inadequada; aplicação incorreta do adesivo [21]. Nas ligações coladas com alumínio, a rotura acontece quando o óxido de alumínio se converte naturalmente na forma hidratada, levando a ligação química inicial adesivo/substrato a dissolver-se resultando assim na separação e, conseqüente, início de rotura [22].

Rotura Mista

Por vezes a rotura ocorre com uma combinação dos modos anteriormente referidos (adesivo e coesivo), ao que se dá o nome de rotura mista. Nas zonas onde o dano é adesivo, pode ocorrer por duas razões: ou a superfície está degradada e/ou o tratamento superficial foi mal efetuado, resultando em forças na interface menores comparativamente às forças internas do adesivo [21]. Quando o dano é coesivo, tem-se a situação inversa, logo, as forças na interface são maiores do que as forças internas do adesivo.

2.1.7 Vantagens das ligações coladas

A utilização de ligações coladas tem ganho, ao longo dos anos, grande relevância em diversas indústrias em relação a outros tipos de ligações convencionais como soldadura, rebiteagem, brasagem ou ligações aparafusadas.

As ligações coladas são mais eficientes que as ligações mecânicas tradicionais, na medida que estas conseguem distribuir a carga aplicada sobre uma maior área. As ligações com adesivos não requerem furos nos aderentes ou fecho mecânicos que necessitem aperto, e por essa razão, não se criam concentrações de tensão local [23]. Na Figura 2.9 é possível aferir que as ligações mecânicas (neste caso, por rebiteagem), estão sujeitas a maiores valores de tensão.

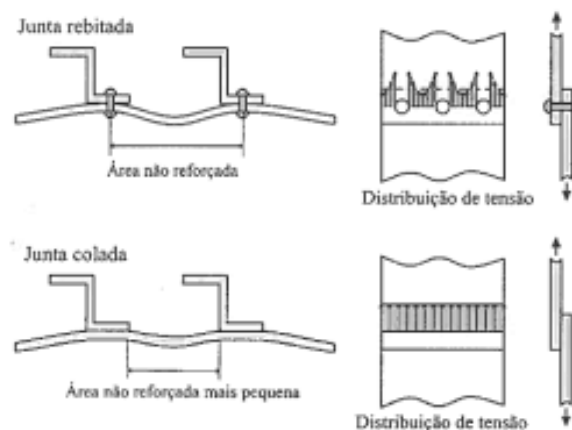


Figura 2.9 - Concentração de tensões em ligações rebiteadas e coladas, adaptado de [16]

Existem outras vantagens neste tipo de ligação, entre as quais se destacam as seguintes [8, 24]:

- (i) Capacidade de obter estruturas mais leves e rígidas;
- (ii) Capacidade de unir materiais distintos;
- (iii) Capacidade de unir eficientemente materiais de espessuras finas;
- (iv) Melhor distribuição de tensões, o que leva a uma melhor resistência à fadiga;
- (v) Fabrico de geometrias complexas;
- (vi) Boa capacidade de vedação e amortecimento de vibrações, permitindo a absorção parcial de tensões;
- (vii) A automação do processo com recurso a robôs minimiza a necessidade de ação humana, permitindo que este tipo de ligações possa fazer parte de uma linha de montagem;
- (viii) Evitam furos (parafusos, rebites) e marcas de soldadura.

2.1.8 Desvantagens das ligações coladas

A nível de limitações nas ligações coladas, destacam-se as seguintes [7- 8]:

- (i) As ligações coladas não permitem desmontagem;
- (ii) Necessidade de preparação de superfície, com diversos tratamentos de modo a permitir a melhor adesão possível entre adesivo e substrato;
- (iii) Dependendo do adesivo, os tempos de cura podem ser elevados;
- (iv) Limitação de operação em modo contínuo a temperaturas superiores a aproximadamente 175 °C;
- (v) Como a ligação não é instantânea, por vezes tem de se recorrer a acessórios de fixação para imobilizar os componentes da ligação durante a cura, acrescentando ligeiramente o custo de produção;
- (vi) A inspeção da ligação é de difícil execução e requer conhecimento especializado;
- (vii) A durabilidade da ligação dependerá das condições ambientais, uma vez que a resistência da ligação a condições extremas é limitada. O calor e a humidade em excesso são os principais fatores de degradação dos adesivos;
- (viii) É importante usar geometrias que evitem tensões localizadas e que garantam uma distribuição uniforme de tensões. Se as tensões não estiverem perfeitamente perpendiculares ao adesivo, podem surgir forças de arrancamento ou de clivagem;
- (ix) Um dos grandes problemas da utilização dos adesivos estruturais é o facto de não haver um critério de dimensionamento universal que permita projetar qualquer estrutura.

2.2 Polímeros reforçados com fibras

Os Polímeros reforçados a fibras, *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) na literatura internacional, são um material compósito composto por uma matriz polimérica cujo reforço são fibras. Estes tipos de materiais são geralmente compostos por fibras unidireccionais, normalmente feitas de vidro, carbono ou aramida, que reforçam uma matriz. Esta pode ser cerâmica, polimérica ou metálica. As principais propriedades mecânicas dos diferentes tipos de fibra encontram-se listadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Propriedade mecânicas das fibras mais utilizadas em FRP

Propriedades	Fibras de carbono	Fibras de vidro	Fibras aramida
Densidade [g/cm ³]	1,7 – 1,9	2,6	1,4
Diâmetro [µm]	6 – 7	3 – 13	12
Resistência à tração [MPa]	2600 – 4600	2350 – 4600	2800 – 4100
Módulo Young [GPa]	200 – 400	73 – 88	70 – 190
Extensão máxima (%)	0,5 – 1,5	2,5 – 4,5	2 – 4

Os materiais compósitos são materiais artificiais ou naturais feitos de dois ou mais materiais constituintes com propriedades físicas ou químicas significativamente diferentes dos que permanecem separados e distintos dentro da estrutura acabada [25]. A maioria dos compósitos tem fibras resistentes e rígidas numa matriz que é menos resistente e menos rígida. Devido às suas propriedades, a sua utilização tem aumentado exponencialmente desde o início do séc. XX, Figura 2.10.

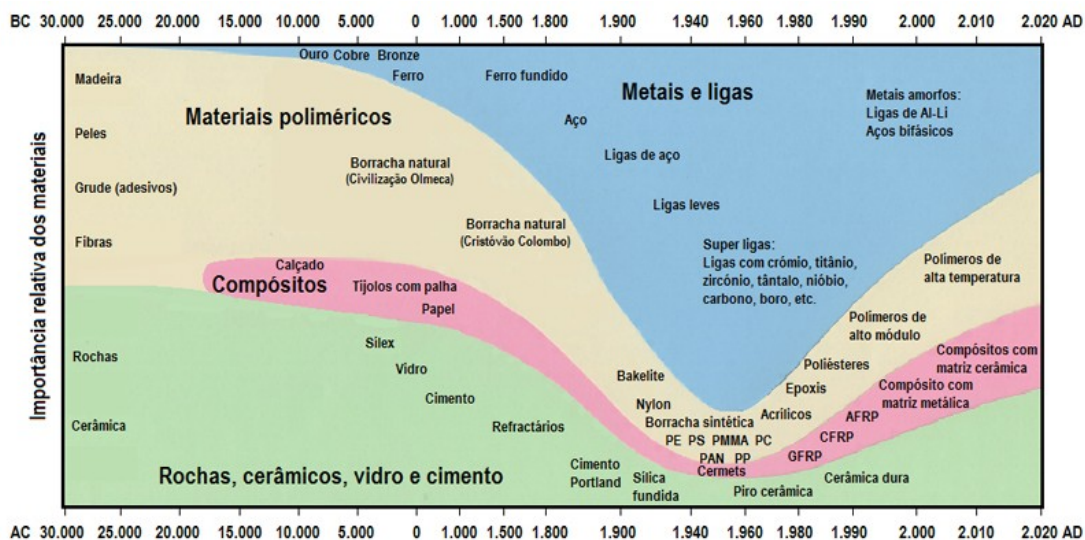


Figura 2.10 - Evolução de utilização dos diferentes tipos de materiais

O principal objetivo é obter uma estrutura resistente e rígida, muitas vezes, com uma baixa densidade. Em geral, as fibras são os principais membros portadores de carga, enquanto a matriz circundante as mantém no local e na orientação desejada, atuando como um meio de transferência de carga entre elas, e protegendo-as de danos ambientais devido a temperatura e humidade elevadas. Os compósitos de FRP são leves, não corrosivos, apresentam elevada resistência específica e rigidez específica, são facilmente produzidos, e podem ser adaptados para satisfazer requisitos de desempenho. Devido a estas características vantajosas, os compósitos FRP foram incluídos na construção e reabilitação de estruturas através da sua utilização como reforço em betão, tabuleiros de pontes, estruturas modulares, cofragem, e reforço externo para reforço e melhoramento sísmico [26]. A aplicação de ligações adesivas em componentes estruturais feitos de compósitos reforçados com fibras aumentou significativamente nos últimos anos [1].

As propriedades dos compósitos dependem não só das propriedades mecânicas das fibras e resina, mas também do rácio entre o comprimento e orientação das fibras. Estes materiais apresentam um comportamento anisotrópico, pelo que, as propriedades ao longo das fibras apre-

sentam valores de rigidez e resistência ao corte superiores quando comparadas com as propriedades na direção transversa. Outra limitação deste material, são ainda uma fraca resistência ao fogo e quando expostos a temperaturas elevadas. Além disso, o seu custo, quer seja considerado por peso unitário ou com base na capacidade de carga de força, é elevado em comparação com os varões convencionais de reforço de aço, o que faz com que a sua utilização seja restrita. Do ponto de vista da engenharia estrutural, os problemas mais graves com os reforços de FRP são a falta de comportamento do plástico e a baixa resistência ao corte na direção transversal.

Como descrito no Subcapítulo 2.1.7, uma das grandes vantagens das ligações coladas é o facto de permitir a união de diferentes tipos de materiais. Por este motivo, diversos autores têm visto a estudar a ligação colada numa grande variedade de materiais, como: CFRP-alumínio [29– 31], CFRP-aço [30– 33], CFRP-GFRP [33], FRP-betão [34], FRP-madeira [35], entre outros.

2.3 Parâmetros que influenciam o desempenho das ligações coladas

Como foi explicado anteriormente, a geometria da ligação e o tipo de carregamento nela aplicado são dois fatores que contribuem para o desempenho e eficiência de uma ligação colada. Na literatura científica têm sido vários os autores a estudar a influência de outros fatores como:

- (i) Tratamento superficial
- (ii) Espessura de adesivos
- (iii) Tipos de adesivos
- (iv) Ambientais: temperatura, humidade, radiação, entre outros.
- (v) Geometria da ligação: comprimento de sobreposição, espessura adesivo, filete, espessura do substrato

2.3.1 Tratamento superficial

Os tratamentos de superfície são considerados, essencialmente, para fins de durabilidade e aumento da resistência da ligação, tendo um grande impacto no comportamento da mesma a longo prazo. O pré-tratamento adequado pode, por vezes, conferir propriedades adicionais para as superfícies [37]. A resistência da ligação pode ser significativamente melhorada pelo tratamento de superfície nos aderentes. Geralmente, a preparação superficial da ligação implica a remoção das camadas externas que podem estar contaminadas e não promover a ligação entre o adesivo e os aderentes. Vários autores [31- 37] têm estudado o efeito de diversos

tratamentos superficiais com o propósito de aumentar a tensão superficial, aumentar a rugosidade superficial ou alterar a composição química da superfície do substrato e, deste modo, melhorar a resistência e durabilidade de ligações adesivas poliméricas.

O alumínio é um dos materiais mais utilizados como aderente dada a sua vasta aplicabilidade nas diversas indústrias. No entanto, encontrar um tratamento superficial universal adequado para o alumínio e estudar a sua influência na durabilidade de ligações coladas tem sido uma preocupação para investigadores. Critchlow e Brewis [38] conduziram uma revisão extensiva sobre os diferentes tratamentos superficiais em ligações coladas cujo aderente é alumínio, combinando vários artigos e estudos relativos ao seu efeito na durabilidade da ligação. A Tabela 2.3, enumera a influência do tratamento superficial na tensão de corte, numa ligação com alumínio como aderente e resina epoxídica como adesivo. É possível observar-se o aumento significativo da tensão de corte quando existe tratamentos superficiais.

Tabela 2.3 - Efeitos da preparação superficial em aderentes de alumínio com adesivo epoxídico, adaptado de [39]

Tratamento superficial	Tensão de corte [MPa]
Sem tratamento	3,06
Desengordurante (<i>degreasing</i>)	5,77
Mecânico	12,0
Químico	19,0

Tratamentos mecânicos com o jato de granalha ou o jato de areia, combinado com um desengorduramento prévio, são os tratamentos superficiais mais comuns capazes de aumentar a rugosidade a nível macroscópico. Para aumentar as rugosidades a nível microscópico nos aderentes é necessário um tratamento químico ou eletroquímico após o tratamento mecânico. Normalmente, a anodização, isto é um processo de fazer uma camada de óxidos sobre a superfície de um material por meio de imersão em um banho eletrolítico é um dos métodos mais eficazes de tratamento superficial para o alumínio. Durante muitos anos, o tipo de anodização realizada era uma anodização com ácido crômico (*Chromic- Acid Anodizing*), porém, este método leva à produção de resíduos tóxicos o que levou a União Europeia a banir este tipo de prática. Em vez disso, hoje este método é realizado com ácido fosfórico que produz resíduos que podem ser tratados, mantendo uma elevada eficiência [39].

No que diz respeito a tratamentos mecânicos, De Barros *et al.* [40] investigou a influência de diferentes tratamentos de superfície: jato de areia (*sand blasting*), jato de granalha (*grit blasting*) e jato de cerdas (*bristle blasting*), no tempo de vida de ligações coladas sujeitas a carregamento monotónico e cíclico de modo II. Foi observado que o comportamento em testes monotónicos

é semelhante, independentemente do tratamento de superfície aplicado sobre os substratos. Por outro lado, constatou-se que este tratamento desempenha um papel significativo no comportamento de fadiga das ligações adesivas. Este estudo permitiu ainda concluir que a rugosidade de um substrato é muito mais relevante em testes cíclicos, quando comparados com testes monotónicos.

2.3.2 Agentes Atmosféricos

As ligações adesivas podem ser expostas a diversas condições ambientais durante a sua vida útil, sendo a temperatura e a humidade os agentes atmosféricos que mais influenciam a ligação [36]. A prolongada ou mesmo curta exposição de ligações coladas a temperaturas elevadas, produz uma alteração irreversível da composição física e química do adesivo. Com o aumento da temperatura, verifica-se uma diminuição da resistência da ligação. Tal foi verificado por Zhang *et al.* [40] ao estudarem a influência da temperatura e da humidade na resistência de uma ligação de sobreposição dupla de GFRP com adesivo epoxídico. Este estudo comprovou que o aumento da temperatura promove o amolecimento do adesivo, levando à sua degradação e conseqüente rotura adesiva. Por outro lado, a humidade por si só não provocou diferença significativa na resistência da ligação, porém, este agente acelerou a influência do aumento de temperatura, o que conduziu a uma rotura na interface adesivo/substrato em vez de uma rotura do adesivo.

Também Mu *et al.* [42] conduziram uma investigação para determinar a influência da temperatura em ligações híbridas CFRP-alumínio. A resistência à rotura da ligação diminui notavelmente com o aumento da temperatura, especialmente quando a temperatura de teste é próxima ou superior ao valor de transição vítrea¹, T_g , diminuindo a capacidade de transmissão de força entre os materiais colados. Os modos de rotura também são influenciados pela temperatura de operação, verificando-se a temperatura de -10°C e -40°C a rotura de fibras do CFRP, enquanto a 50°C e 80°C a ligação apresenta rotura coesiva.

A presença de humidade nas ligações adesivas poderá não só enfraquecer as propriedades físicas e químicas do adesivo em si, mas também a interface entre o adesivo e o substrato. No entanto, ao contrário do que acontece com ligações metálicas, caso a ligação seja compósito-epóxi, a adesão é favorecida com a presença de água [43-44].

Também Zhou *et al.* [45] estudou a ligação adesiva CFRP-aço quando exposta a elevadas temperaturas (25°C até 55°C). Neste estudo, os autores verificaram que quer a rigidez inicial da

¹ **Temperatura de transição vítrea** - valor à qual os polímeros amorfos mudam de duros para suaves.

ligação, quer a tensão máxima de corte diminuíram com o aumento de temperatura. No entanto, a energia de fratura na interface aumentou até atingir a temperatura de deflexão térmica² (HDT). Verificou-se ainda que a rigidez elástica inicial e o pico de tensão de corte diminuíram à medida que a temperatura aumenta. Por fim, observou-se que a energia da fratura aumentava a temperaturas abaixo da HDT, mas depois diminuem drasticamente quando as temperaturas excedem o HDT.

2.3.3 Comprimento da sobreposição

A influência do comprimento de sobreposição é dos parâmetros mais estudados na literatura científica, uma vez que é facilmente utilizado para estudar outros parâmetros em simultâneo. De um modo geral, com o aumento do comprimento colado, existe um aumento da resistência da ligação.

Keller e Vallée [46- 47] estudaram experimental e numericamente a influência do comprimento de sobreposição em ensaios de sobreposição dupla e simples, com ligações coladas com um adesivo epoxídico (Sikadur 330). Os autores concluíram que com o incremento do comprimento de sobreposição (de 50 mm até 200 mm) a força de rotura aumenta, até convergir para um determinado valor constante. O valor do comprimento de ligação correspondente ao momento em que a força se torna constante dá-se o nome de comprimento efetivo. Um aumento adicional no comprimento da ligação não resulta num aumento da sua resistência. Este é um parâmetro de ligação bastante útil pois indica o comprimento a partir do qual não existe aumento da resistência da ligação. A avaliação correta do comprimento efetivo de ligação é um fator importante no design do reforço pois permite evitar desperdício de material e consequentemente peso desnecessário.

Biscaia *et al.* [48] verificaram experimentalmente os efeitos do comprimento de sobreposição (entre 10mm e 200mm), numa ligação dupla de sobreposição de CFRP-aço onde se observou um aumento da resistência da ligação até ao comprimento efetivo de 136mm. Foi possível ainda constatar que, para comprimentos de ligação superiores ao comprimento efetivo, existe uma diminuição da rigidez.

Também Campilho *et al.* [49] realizaram ensaios de sobreposição simples em FRP, para estudar a influência do tipo de adesivo. Deste modo, utilizaram um adesivo dúctil de poliuretano (SikaForce®7888) e um adesivo frágil epoxídico (Araldite® AV138). Foram utilizadas amostras com um comprimento colado entre 10mm e 80mm. Nestes ensaios, verificou-se, em ambos

² *Heat Deflection Temperature* - temperatura a partir da qual o material começa a amolecer quando exposto a uma carga fixa.

os adesivos, que o aumento do comprimento colado conduziu a um aumento na força de ruptura.

2.3.4 Espessura do adesivo

A espessura da camada de adesivo é um fator de extrema importância quando se trata de adesivos estruturais. Por norma, é preferível uma espessura de camada adesiva fina em vez de uma camada espessa, uma vez que a concentração de tensão nos cantos da ligação é menor numa espessura de camada adesiva mais fina. As espessuras inferiores a 0,1mm não são recomendadas, uma vez que o risco da criação de falhas de ligação é elevado dado que não existe adesivo suficiente. De acordo com a empresa Huntsman® [50], deve-se garantir uma espessura ótima entre 0,1mm – 0,3mm no adesivo. Desta forma, o desempenho da ligação será melhor. No entanto, adesivos dúcteis podem ter um melhor desempenho com camadas adesivas ligeiramente mais espessas. Isto porque o aumento da espessura do adesivo pode aumentar o volume de material dentro do qual a energia é dissipada, aproveitando assim a ductilidade do adesivo. Por este motivo, esta observação não deve ser generalizada pois existem outros fatores envolvidos, tais como o modo de carregamento (modo I, modo II, ou misto), o comportamento do aderente (elástico ou plástico), e o tipo de adesivo (dúctil ou frágil), que podem modificar o comportamento das ligações, uma vez que a sua espessura é variada [51].

As análises analíticas clássicas tais como as de Goland e Reissner [52], baseada unicamente numa análise elástica, preveem a diminuição das tensões arrancamento e de corte com o aumento de espessura. Porém, estes resultados não estão de acordo com os resultados experimentais disponíveis. Adams e Peppiatt [53] propuseram três justificações possíveis para explicar a diminuição da resistência com o aumento de espessura, tais como: maiores concentrações de tensões, maior probabilidade da presença de defeitos internos (porosidades, vazios e microfissuras devido às tensões residuais induzidas pelo processo de cura) e de maiores dimensões, e taxa de deformação inferior.

No que diz respeito ao tipo de adesivo, Keller *et al.* [46] investigaram a influência da espessura em adesivos epoxídicos e poliuretano e verificou-se que a diminuição da espessura de adesivo produz um maior incremento de resistência em adesivos poliuretanos do que em adesivos epóxidos. Sugerindo deste modo que adesivos dúcteis são mais influenciados pela espessura de adesivo em relação aos adesivos rígidos, embora ambos apresentem um melhor resultado com espessuras menores (espessuras entre 1 e 3 mm).

A nível de modo de carregamento, Carlberger e Stigh [54] averiguaram a influência da espessura de adesivo e constataram que tanto o modo de arrancamento como o de corte mostram pouca dependência da espessura, embora seja de notar uma ligeira diminuição da resistência

com o aumento da espessura. A energia da fratura em arrancamento (Modo I) aumenta proporcionalmente à medida que a espessura aumenta de 0,1 para cerca de 1,0 mm. A 1,6 mm, a energia da fratura é ligeiramente inferior à de 1,0 mm, indicando que a energia da fratura tem um máximo entre 1,0 e 1,6 mm. No modo de corte (Modo II), a dependência da espessura não é tão acentuada, mas é evidente uma tendência crescente na energia da fratura com o aumento da espessura do adesivo.

2.4 Métodos numéricos

Até meados dos anos sessenta, o desenvolvimento científico e tecnológico, assentava apenas numa correlação entre conhecimentos teóricos que eram comprovados através de estudos experimentais. Os primeiros trabalhos de previsão de comportamentos de ligações coladas com recurso a modelos analíticos foram realizados por Volkersen [55] e Goland e Reissner [52] onde foi possível obter estados de tensão em estruturas coladas, assumindo pressupostos simplificados em termos de geometria de ligações, carregamento e condições fronteiras, possibilitando assim a obtenção do comportamento da ligação em domínio elástico. Nestes modelos, a previsão da resistência era normalmente realizada através de critérios baseados em valores de tensão ou deformação crítico. Com o evoluir da tecnologia e o aparecimento dos computadores, houve um aumento exponencial na capacidade de cálculo e armazenamento de dados, o que motivou o aparecimento de modelos numéricos e de modelos matemáticos teóricos mais complexos.

Atualmente, uma possível distinção em modelos numéricos tem em conta a sua base, podendo estes ser de base contínua ou discreta. Os modelos de base contínua simulam a resposta macroscópica dos materiais, aplicando modelos constitutivos globais. O método dos elementos finitos (MEF) é preferencialmente utilizado nos casos em que os estudos não envolvam roturas localizadas e que possam ser desenvolvidos através de modelos contínuos ou contínuos equivalentes. Por outro lado, os modelos de base discreta, permitem simular as propriedades individuais de cada elemento constituinte do material e a suas interações, prevendo as propriedades fundamentais das matérias. Um dos modelos de base discreto mais utilizado é o método de elementos discretos (MED).

2.4.1 Método dos elementos finitos

O MEF tem como objetivo a análise de estados de tensão e deformação de um dado material ou estrutura, que se encontre sujeito a ações exteriores [56]. Atualmente, o MEF é utilizado em praticamente todos os campos da engenharia para realizar análises estruturais, de transferência de calor, de transporte de materiais, de dinâmica dos fluidos e ainda de eletromagnetismo.

O método dos elementos finitos usa uma discretização de domínio do problema em vários elementos (subdomínios), para resolver equações diferenciais, substituindo um número infinito de variáveis por um número limitado de elementos de comportamento conhecido. Os elementos são de dimensões finitas, originando o nome do método. Os elementos finitos (EF) são conectados entre si por pontos denominados nós ou pontos nodais. O conjunto de todos os nós, tem o nome de malha.

A precisão do MEF está relacionada com a quantidade e o tamanho dos nós bem como os elementos utilizados. Os resultados serão mais precisos quanto menor for a área do elemento, a quantidade de nós e os elementos na malha for maior. Porém, este pode representar uma das limitações deste método, pois quanto maior o número de elementos que o modelo acarreta, maior o erro de arredondamento, o que pode prejudicar a precisão do resultado. Para a modelação de ligações adesivas, uma vez que a camada adesiva tem uma espessura fina em comparação com a espessura dos aderentes, para a sua modelação é necessária uma malha bastante fina com um elevado número de graus de liberdade. O que, conseqüentemente, implica um elevado consumo de potência computacional necessário para resolver as equações matemáticas.

O método dos elementos discretos (MED) surgiu como uma alternativa ao MEF, para tratar inicialmente de problemas relacionados com a Mecânica das Rochas. O modelo proposto consistia na assemblagem de blocos rígidos, que posteriormente passou a admitir blocos deformáveis [57] através da discretização com elementos finitos triangulares.

Na modelação de problemas de fratura, esta abordagem é considerada conceitualmente mais simples do que abordagens contínuas como o MEF, que geralmente não permitem simular o crescimento de fendas individuais e a separação de superfícies sem uma atualização contínua da malha [59].

2.4.2 Método dos elementos discretos

No presente estudo, foi adotado um modelo de partículas, com base no Método de Elementos Discretos (MED). O MED foi introduzido por Cundall [57] na realização de uma análise de problemas de mecânica em rochas, com o objetivo de modelar de forma explícita as descontinuidades, mesmo que de forma idealizada, sendo depois aplicado a materiais granulares.

Conhecendo as propriedades mecânicas de um dado material, o MED permite a modelação do comportamento macroscópico através do estudo das interações entre as partículas do material, permitindo assim que respostas micromecânicas sejam analisadas em detalhe. Este método consiste na discretização de um conjunto de pequenas partículas rígidas, que interagem através de contactos deformáveis, permitindo que durante o carregamento sejam quebrados e

formados contactos sucessivos. Apesar do modelo apresentar partículas circulares, a modelação de diferentes geometrias é possível com a aglomeração de várias partículas. A utilização deste método tem ganho visibilidade na investigação de materiais compósitos, apesar da sua limitada utilização devido à complexidade da evolução do dano e mecanismos de falha em materiais como os polímeros reforçados com fibras (FRP). O estudo do comportamento da ligação entre FRP's e outros materiais ainda se encontra num estado inicial segundo o MED.

2.4.2.1 Formulação do método elementos discretos

A modelação do movimento e interação de partículas circulares é feita pelo MED a duas dimensões. Apesar de ser, geralmente, utilizado em materiais granulares, o comportamento de um corpo contínuo também pode ser estudado através da aglomeração de várias partículas. Os ensaios serão modelados utilizando um modelo bidimensional onde cada partícula apresenta três graus de liberdade. Considera-se apenas duas componentes da força no plano de análise e um de momento, que é representado no plano perpendicular ao plano de análise. Para a modelação das ligações coladas estudadas, foram assumidos determinados pressupostos ao longo da sua análise, tais como [60]:

- (i) As partículas comportam-se como corpos rígidos;
- (ii) Os contactos entre partículas ocorrem num ponto;
- (iii) As partículas podem sobrepor-se nos pontos de contacto;
- (iv) A lei de força-deslocamento determina a magnitude da sobreposição;
- (v) Todas as sobreposições de partículas são pequenas quando comparadas com o tamanho da partícula;
- (vi) Podem existir ligações nos contactos entre partículas;
- (vii) Todas as partículas são circulares, havendo a possibilidade de formar um conjunto de partículas sobrepostas que se comportam como um corpo rígido.

Adicionalmente, o modelo computacional permite a modelação de elementos parede, o que possibilita a implementação de condições fronteira num ensaio, como deslocamentos, forças ou velocidades. A nível de interações, é possível simular o contacto partícula-partícula e partícula-parede, no entanto, a interação parede-parede não é possível. A interação partícula-parede difere do outro tipo uma vez que a normal do contacto é dada pela normal ao segmento da parede em contacto com a partícula.

2.4.2.2 Ciclo de cálculo

O processo de cálculo consiste na aplicação consecutiva da lei do movimento em cada partícula e da lei força-deslocamento em cada contacto, originando desta forma o ciclo de cálculo demonstrado na Figura 2.11.

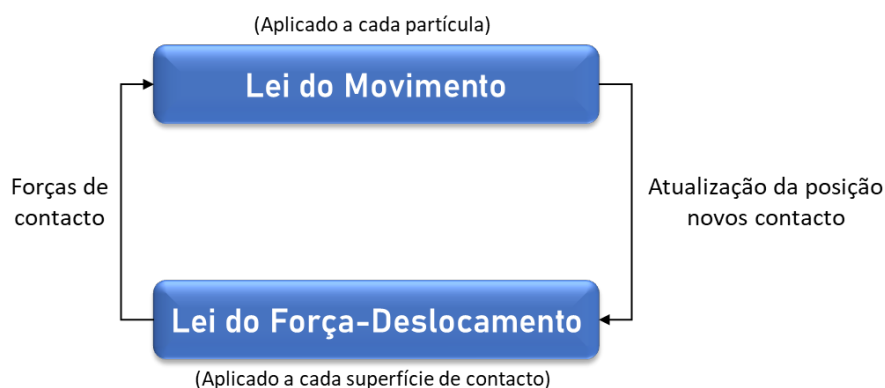


Figura 2.11 - Processo de cálculo

Num instante inicial, o conjunto de contactos é atualizado a partir das posições das partículas e paredes. Com recurso à lei Força-Deslocamento, são calculadas as novas forças de contacto baseadas no deslocamento relativo entre as duas entidades e no modelo constitutivo do contacto. Por fim, a 2ª Lei de Newton (Lei do Movimento) permite atualizar a posição e velocidade com base nas forças e momentos resultantes das forças de contacto a atuar na partícula ou parede.

2.4.2.3 Lei força-deslocamento

As Leis Força-Deslocamento são responsáveis por estabelecer uma relação entre as forças de contacto em duas entidades com o movimento relativo entre elas.

Como foi referido anteriormente, o contacto pode ser feito entre uma partícula e uma parede ou entre duas partículas. O vetor n_i define o plano onde é estabelecido o contacto, como é demonstrado na Figura 2.12 .

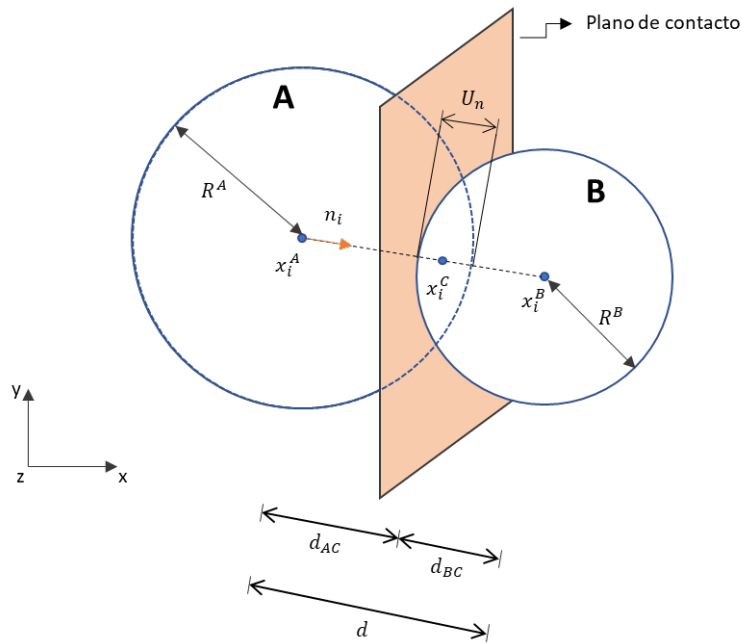


Figura 2.12 - Discretização de duas partículas em contacto

Este vetor determina-se a partir dos vetores de posição do centro de gravidade das partículas genéricas (x_i^A e x_i^B) que estão em contacto e a distância (d) entre os centros de massa de cada partícula, de acordo com:

$$n_i = \frac{x_i^B - x_i^A}{d} \quad (2.1)$$

onde a distância d é calculada pela equação:

$$d = \sqrt{(x_i^B - x_i^A)^2} \quad (2.2)$$

O deslocamento relativo do contacto, na direcção normal (n_i) denomina-se o valor da sobreposição, U_n , cujo valor vem em função dos raios das partículas genéricas A e B é calculado através da equação:

$$U_n = R^A + R^B - d \quad (2.3)$$

Para o cálculo do incremento de deslocamento é necessário determinar a posição no ponto de contacto, $x_i^{[C]}$, e correspondente velocidade no mesmo ponto, $\dot{x}_i^{[C]}$, através, respetivamente, das equações:

$$x_i^C = x_i^A + n_i(R^A - \frac{1}{2} U_n) \quad (2.4)$$

$$\dot{x}_i^{[C]} = \dot{x}_i^{[C],B} - \dot{x}_i^{[C],A} \quad (2.5)$$

onde $\dot{x}_i^{[C],B}$ é a velocidade da entidade B, no ponto de contacto e $\dot{x}_i^{[C],A}$ a velocidade da entidade A, no ponto de contacto.

Uma vez que a velocidade no ponto de contacto é dada pela diferença de velocidades relativas das partículas genéricas A e B, tem-se que a velocidade relativa é dada por:

$$\dot{x}_i^{[C],\alpha_i} = \dot{x}_i^{\alpha_i} + \epsilon_{i3k} \omega_3^{\alpha_i} (x_k^C - x_k^{\alpha_i}) \quad (2.6)$$

Sendo que, α_i , corresponde a uma entidade genérica e os valores de $\dot{x}_i^{\alpha_i}$ e $\omega_3^{\alpha_i}$ representam a velocidade de translação e velocidade angular da entidade. Para um determinado intervalo de tempo, o incremento do deslocamento, em cada contacto é obtido pela equação:

$$\Delta x_i^C = \dot{x}_i^{[C]} \Delta t \quad (2.7)$$

Por sua vez, este incremento de deslocamento pode ser decomposto numa componente normal, Δx_n^C , de grandeza escalar e uma componente tangencial, Δx_t^C , de grandeza vetorial. Os valores da componente normal e tangencial são, respetivamente:

$$\Delta x_n^C = \Delta x_i^C n_i \quad (2.8)$$

$$\Delta x_t^C = \Delta x_i^C - \Delta x_n^C n_i \quad (2.9)$$

Os incrementos de força também são decompostos em componente normal e tangencial. Estes são calculados com recurso a uma lei força-deslocamento linear em função das rigidezes de contacto normal, k_n , e tangencial, k_t , como anunciadas nas equações:

$$\Delta F_n^C = \Delta x_n^C k_n \quad (2.10)$$

$$\Delta F_t^C = -\Delta x_t^C k_t \quad (2.11)$$

A rigidez normal, de grandeza escalar, está relacionada com os deslocamentos e forças totais aplicadas, calculada pelo modelo de rigidez de contacto. Por outro lado, a rigidez tangencial,

relaciona-se com os valores de deslocamento e força incrementais pelo que esta componente é uma grandeza vetorial.

A força resultante de contacto é decomposta em: componente normal, F_n^C , que atua na mesma direção do vetor normal e componente de corte, F_t^C , que atua num plano perpendicular ao plano normal denominado plano de corte, i.e:

$$F_i^C = F_n^C n_i + F_t^C \quad (2.12)$$

Em cada intervalo de tempo, Δt , a atualização dos novos valores de força de contacto normal e de corte, é dada, respetivamente, por:

$$F_n^C = F_n^{C, Anterior} + \Delta F_n^C \quad (2.13)$$

$$F_t^C = F_t^{C, Anterior} + \Delta F_t^C \quad (2.14)$$

2.4.2.4 Lei do movimento

Como descrito no Subcapítulo 2.4.2.2, após o cálculo das forças exercidas no centro de gravidade das partículas, o próximo passo consiste na aplicação da segunda lei de Newton para que seja atualizado os valores de deslocamento e velocidade das partículas.

O movimento de uma partícula é calculado através da força e do momento resultantes que atuam numa partícula. Este caracteriza-se por um movimento de translação de um ponto da partícula e de um movimento de rotação da partícula. Enquanto o movimento de translação é descrito pela posição x_i , velocidade \dot{x}_i e aceleração \ddot{x}_i da partícula, o movimento angular é caracterizado pela velocidade angular w_i e aceleração angular \dot{w}_i .

O movimento de translação sem amortecimento é dado, na forma vetorial, pela equação:

$$F_i^t + F_{i,d}^t = m \ddot{x}_i^t \quad (2.15)$$

O movimento de rotação total M_3^t , por sua vez, é descrito em função do momento de rotação devido ao amortecimento não viscoso local $M_{3,d}^t$, da inércia da partícula I e da aceleração angular \dot{w}_3^t , anunciada na expressão seguinte:

$$M_3^t + M_{3,d}^t = I \dot{w}_3^t \quad (2.16)$$

Os valores de força e momento que caracterizam o amortecimento, $F_{i,d}^t$ e $M_{3,d}^t$ são proporcionais à magnitude da força total a atuante desequilibrada e não à sua velocidade como é tradicional no caso de amortecimento do tipo viscoso. As equações (2.17) e (2.18), caracterizam estes valores:

$$F_{i,d}^t = -\beta |F_i^t| \text{ sinal}(\ddot{x}_i^t) \quad (2.17)$$

$$M_{3,d}^t = -\beta |M_3^t| \text{ sinal}(\dot{\omega}_3^t) \quad (2.18)$$

O valor do coeficiente de amortecimento local não viscoso β é obtido em função do valor dado por $\text{sinal}(x)$, como descrito abaixo na expressão:

$$\text{sinal}(x) = \begin{cases} -1 & \text{se } x < 0 \\ 0 & \text{se } x = 0 \\ 1 & \text{se } x > 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

As equações do movimento (2.17) e (2.18), são integradas utilizando o método das diferenças finitas centradas, cujo passo de cálculo é Δt . As velocidades \dot{x}_i e ω_3 são calculadas para cada intervalo de $t \pm n \frac{\Delta t}{2}$ e os parâmetros: x_i , \ddot{x}_i , $\dot{\omega}_3$, F_i e M_3 são calculados nos instantes de intervalo $t \pm n\Delta t$, onde n representa o número de passos de cálculo.

As acelerações \ddot{x}_i^t e $\dot{\omega}_3^t$ no tempo t , são calculadas através das expressões (2.20) e (2.21), em termos de velocidades nos intervalos médios.

$$\ddot{x}_i^t = \frac{\dot{x}_i^{(t+(\frac{\Delta t}{2}))} - \dot{x}_i^{(t-(\frac{\Delta t}{2}))}}{\Delta t} \quad (2.20)$$

$$\dot{\omega}_3^t = \frac{\omega_3^{(t+(\frac{\Delta t}{2}))} - \omega_3^{(t-(\frac{\Delta t}{2}))}}{\Delta t} \quad (2.21)$$

Resolvendo as equações (2.17) e (2.18) em ordem às velocidades e substituindo as acelerações indicadas em (2.20) e (2.21) obtém-se as equações:

$$\dot{x}_i^{(t+(\frac{\Delta t}{2}))} = \dot{x}_i^{(t-(\frac{\Delta t}{2}))} + \left(\frac{F_{i,d}^t + F_i^t}{m} \right) \Delta t \quad (2.22)$$

$$\omega_3^{(t+(\frac{\Delta t}{2}))} = \omega_3^{(t-(\frac{\Delta t}{2}))} + \left(\frac{M_{3,d}^t + M_3^t}{I} \right) \Delta t \quad (2.23)$$

Por fim, das velocidades obtidas, é atualizada a posição do centro de partícula, obtendo:

$$x_i^{(t+\Delta t)} = x_i^{(t)} + \dot{x}_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} \Delta t \quad (2.24)$$

2.5 Previsão da resistência de uma ligação

No passado, a inexistência de modelos de materiais complexos e critérios de rotura adequados conduziam geralmente ao sobredimensionamento das ligações adesivas, o que resultava em estruturas pesadas e dispendiosas. Com o surgimento de métodos de previsão e de projeto fiáveis, apareceram também novas possibilidades para o aumento da eficiência de ligações adesivas.

Como demonstrado no Subcapítulo 2.1, a resistência à rotura de ligações adesivas depende de vários fatores e das suas combinações. No entanto, ainda existe uma falta de critérios de falha fiáveis, limitando desta forma uma aplicação mais generalizada de ligações adesivas em aplicações estruturais [36].

As abordagens atualmente utilizadas para prever a resistência das ligações adesivas são: a abordagem mecânica contínua (baseada na tensão), fratura mecânica, e abordagem da mecânica de dano.

2.5.1 Mecânica dos meios contínuos

A abordagem da mecânica contínua tem sido utilizada por muitos investigadores para prever a força da ligação. O adesivo e os aderentes são modelados através da utilização de elementos contínuos, assumindo que o adesivo está perfeitamente ligado aos aderentes [62]. Ao assumir uma ligação perfeita implica que a análise de elementos finitos não tenha em conta as propriedades de aderência da interface.

A Mecânica dos Meios Contínuos (MMC), por norma combina uma análise de EF para a determinação dos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação, que são utilizados na determinação do critério de rotura, para estimar a resistência de uma ligação, comparando-os com as propriedades do material. Esta metodologia tem como principal vantagem a possibilidade de estudar uma ligação colada, com ou sem dano inicial, sob um carregamento arbitrário. Porém, este método apresenta uma limitação inerente quando aplicado ao estudo de ligações coladas ao qual não consegue dar resposta. Isto porque, este tipo de ligações pode apresentar singularidades de tensão, principalmente, em geometrias complexas e nas extremidades da sobreposição.

2.5.2 Mecânica da fratura

A Mecânica da Fratura (MF) é utilizada para estudar o comportamento mecânico de materiais na presença de descontinuidades internas e/ou superficiais, em solicitações monotônicas. A MF divide-se em Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE), Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP) e Mecânica da Fratura Não Linear (MFNL)[62]. Na MFNL está incorporado o estudo da mecânica da fratura dinâmica (MFD), que trata a tenacidade da fratura sob carregamento dinâmico. Este ramo contempla o tempo como uma variável.

Na abordagem da mecânica da fratura, o parâmetro tenacidade é utilizado como critério de falha. A tenacidade à fratura é uma propriedade de qualquer material sólido que indica a magnitude da resistência à fratura ou a sua capacidade para resistir à propagação de fissuras. Esta pode ser calculada com recurso a um fator de intensidade de tensões (K) ou através de métodos energéticos, calculando a energia de tenacidade (G_c).

Cada vez mais, o uso mais generalizado da Mecânica da Fratura deve-se ao fato de esta permitir quantificar, de uma forma bastante precisa, os valores admissíveis em que uma estrutura com fissuras pode operar, sem que propague para a rotura. Este parâmetro é extremamente importante em peças de elevado custo de fabricação, que estão sujeitas à ocorrência de defeitos, como por exemplo, reservatórios de pressão e oleodutos [62].

Em ligações coladas também se têm desenvolvidos alguns estudos com base no método da MF [63]. No entanto, neste tipo de ligação, o início de criação e propagação da fissura muitas vezes encontra-se na interface ou perto da mesma, o que pode tornar impossível a determinação de parâmetros como: tenacidade à fratura (G_c) ou fator de intensidade de tensões (K) [64].

Deste modo, conclui-se que a abordagem por MCC é utilizada para prever o início de uma fissura enquanto a abordagem pela MF permite prever a vida de crescimento da fissura [65].

2.5.3 Mecânica do dano

Atualmente, estão disponíveis técnicas avançadas de modelação que asseguram resultados precisos na previsão de resistência. A Mecânica do Dano (MD) combina as abordagens acima descritas e permite ultrapassar as limitações de aproximações realizadas, quer pela Mecânica dos Meios Contínuos (MMC), quer pela Mecânica da Fratura (MF). De um modo geral, os danos estruturais podem ocorrer por microfissuras, num volume finito ou numa zona de interface, reduzindo a capacidade transferência de esforços.

A MD permite a simulação passo a passo do dano ou fratura num determinado componente, partindo de uma fissura pré-definida ou arbitraria dentro de uma região finita, até à rotura

completa da estrutura [66]. Este é um campo que ainda se encontra em desenvolvimento e aperfeiçoamento, procurando novas técnicas de modulação e métodos de determinação de parâmetros mais simples, bem como a eliminação de problemas de convergência [67].

Atualmente, existem duas abordagens disponíveis para a modelação com base em modelos de dano coesivo: locais e contínuas. Na abordagem local, o dano é limitado a uma linha de espessura nula ou a uma superfície, o que permite simular rotura interfacial entre adesivo e substrato ou rotura interlaminar em compósitos. Na abordagem contínua, o dano é modelado sobre uma região finita, no interior de sólidos para modelar roturas coesivas do material, ou então ao longo de uma camada fina de adesivo de espessura constante para simulação da rotura coesiva da camada como um todo [1]. A Figura 2.13 ilustra os elementos coesivos em cada uma das abordagens.

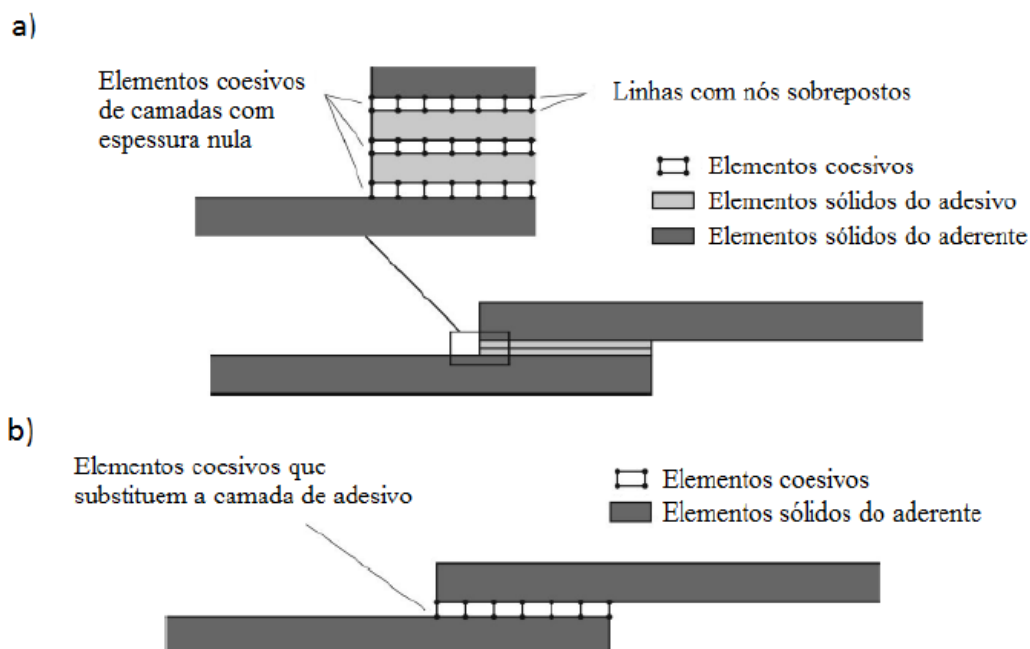


Figura 2.13 - Elementos coesivos para simular uma espessura nula de material - a) Aproximação local; Elementos coesivos para modelar uma espessura finita de material entre dois substratos - b) Aproximação contínua, adaptado de [1]

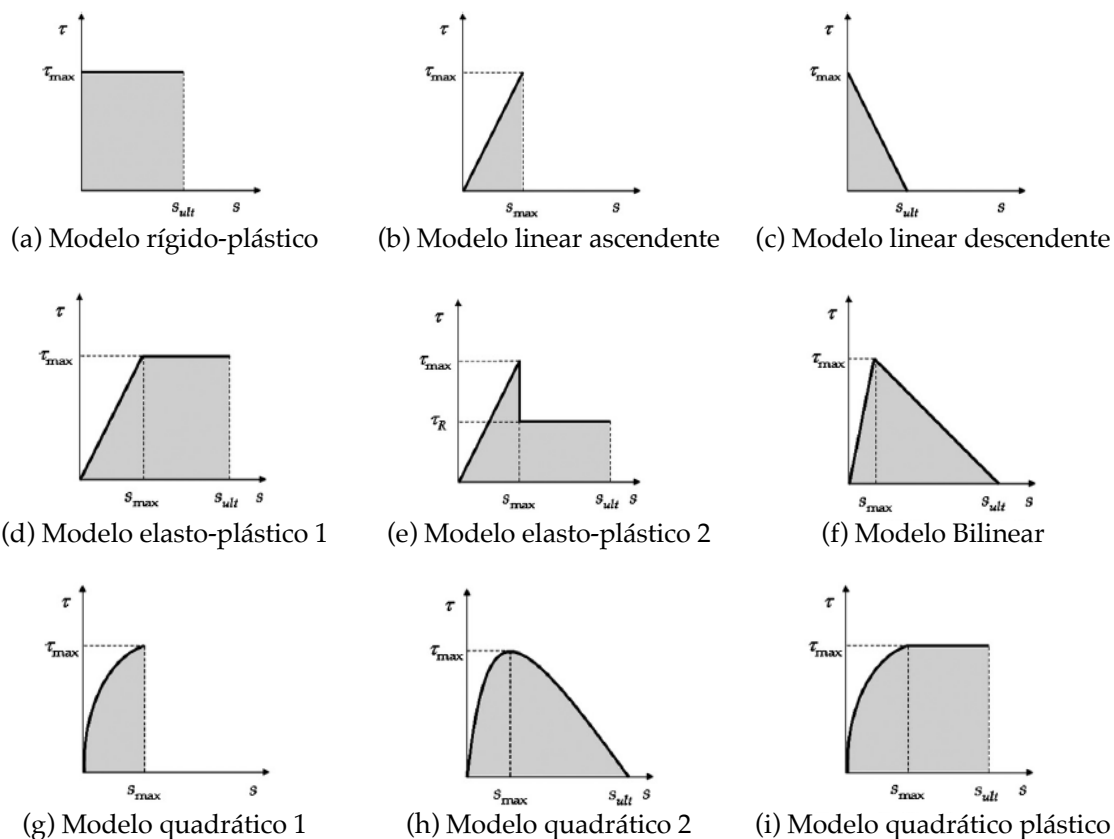
2.5.3.1 Modelos de dano coesivo (MDC)

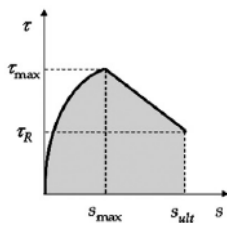
O conceito de zona coesiva foi inicialmente proposto por Barenblatt [68] para descrever os danos sob carga estática na zona coesiva à frente da ponta da fissura da fratura, e deste modo, obter uma solução promissora na previsão do dano em estruturas ligadas. Desde então, os MDC têm sido largamente aperfeiçoados e utilizados para simular o início e propagação de fissuras, em problema de roturas interfaciais, roturas coesivas ou delaminações em compósitos.

O MDC baseia-se no conceito que uma ou múltiplas interfaces (regiões da fratura) podem ser introduzidas na estrutura, na qual a propagação do dano é permitida pela introdução de uma possível descontinuidade. Tal fenómeno é possível pela definição de leis de tração-separação (*bond-slip*) para modelar interfaces ou regiões finitas.

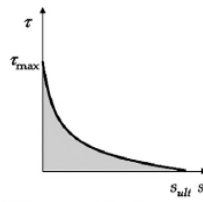
Estas leis *bond-slip* são estabelecidas entre pares de nós de elementos coesivos, e podem ser utilizadas para conectar nós sobrepostos, de elementos que representam diferentes materiais de camadas diferentes em compósitos, para simular uma interface de espessura zero (abordagem local). Para além disto, ainda podem ser aplicadas diretamente entre dois materiais sem contacto para simular uma fina faixa de espessura finita entre eles, por exemplo para simular uma ligação adesiva (abordagem contínua).

Os diferentes modelos *bond-slip* existentes tentam caracterizar o comportamento local de uma ligação de forma simples e a mais próxima à realidade possível, relacionando as tensões de aderência envolvidas na ligação em função dos deslocamentos entre os materiais que concebem a ligação [58]. Na literatura, consoante as propriedades dos materiais da ligação, podem ser encontradas diversas leis locais *bond-slip*. A Figura 2.14 ilustra os exemplos de modelos força-deslizamento utilizados por diversos autores [69].

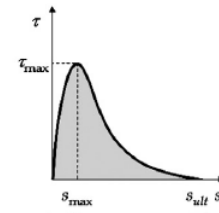




(j) Modelo quadrático-linear



(k) Modelo exponencial decrescente



(l) Modelo quadrático com decrescimento exponencial

Figura 2.14 - Modelos de *bond-slip*, adaptado de [69]

2.6 Determinação do dano na ligação

A avaliação dos danos na interface das ligações com CFRP pode ser determinado em duas escalas diferentes de análise: local ou global. Numa escala local, cada ligação entre substratos é monitorizada no contacto do modelo numérico durante o carregamento. A nível global, os danos para todo o sistema estrutural são determinados com base nas respostas carga-deslizamento na interface colada.

Nesta dissertação, a determinação do dano é calculada a partir da descrição da lei de contacto adotada para modelar a interface entre a CFRP e o substrato. Os danos interfaciais são nulos sempre que a ligação está dentro do regime elástico e aumenta proporcionalmente ao deslocamento na fase de amolecimento acumulado quando a tensão de corte máxima é atingida. Consequentemente, utilizando o mesmo método de quantificação de danos utilizado por Biscaia *et al.* [58] para ligações híbridas, a condição de dano local varia entre 0 e 1 e o dano é dado pela equação:

$$D_n = \frac{\delta_p}{\delta_F - \delta_E} \quad (2.25)$$

onde δ_p corresponde ao deslizamento a partir do deslizamento elástico, δ_F é o deslizamento total dado pelo modelo coesivo descrito na Figura 3.4 e δ_E diz respeito ao deslizamento elástico da ligação.

MODELOS NUMÉRICOS

Neste capítulo será descrito o trabalho numérico realizado. São apontados os aspetos mais relevantes da modelação das ligações de sobreposição dupla e de múltiplos degraus. É realizado uma descrição das propriedades mecânicas dos materiais adotados, seguida da definição do programa de ensaios a realizar em cada geometria de ligação. É ainda apresentado a proposta do modelo coesivo usado para descrever o comportamento local da interface de cada ligação e como será realizado o cálculo do dano. Por fim, são referidas as condições gerais para a modelação dos ensaios, bem como a metodologia dos mesmos.

3.1 Materiais considerados

Para este estudo, optou-se por analisar a ligação entre CFRP e alumínio, uma vez que é das aplicações mais utilizadas no dia-a-dia, e a ligação CFRP-CFRP como meio de comparação. A liga de alumínio escolhida, Al 7050, é uma liga que apresenta ganhos significativos de dureza devido ao seu processo de fabrico e constituintes. Esta é especialmente utilizada na indústria aeronáutica, uma vez que atinge elevados níveis de resistência mecânica face às restantes ligas de alumínio [70]. As propriedades mecânicas do CFRP e da liga de alumínio seleccionado são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Propriedade mecânicas do alumínio e CFRP

	E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_r (MPa)	ϵ_y (%)	ϵ_r (%)
CFRP	180	-	1854	-	1,00
Liga de Alumínio 7050	70	455	515	0,65	11,00

O comportamento de um material pode ser descrito por uma lei constitutiva que relaciona tensão com deformação. O CFRP é um compósito unidirecional pelo que, por norma, este tipo de material apresenta uma relação tensão-deformação linear até à falha. Desta forma, presumiu-se que o compósito CFRP tinha um módulo elástico de $E_1 = 180$ GPa com uma extensão de rotura de $\epsilon_r = 1,00\%$ para uma tensão de rotura de $\sigma_R = 1854$ MPa. Por outro lado, o alumínio

tem, tipicamente, um comportamento constitutivo não linear até à falha [71], porém, para simplificação do processo de modelação, foi assumido um modelo constitutivo elástico-plástico.

Para evitar a cedência do alumínio e subsequente influência nos processos de descolamento das ligações coladas, foi selecionada a liga de alumínio 7050 com um módulo de elasticidade de $E_1 = 70,0 \text{ GPa}$, cuja extensão de cedência é de $\epsilon_y = 0,65\%$ e tensão de rotura de $\sigma_R = 515 \text{ MPa}$. Na Figura 3.1 encontra-se representado os comportamentos constitutivos da liga de alumínio 7050 e do CFRP.

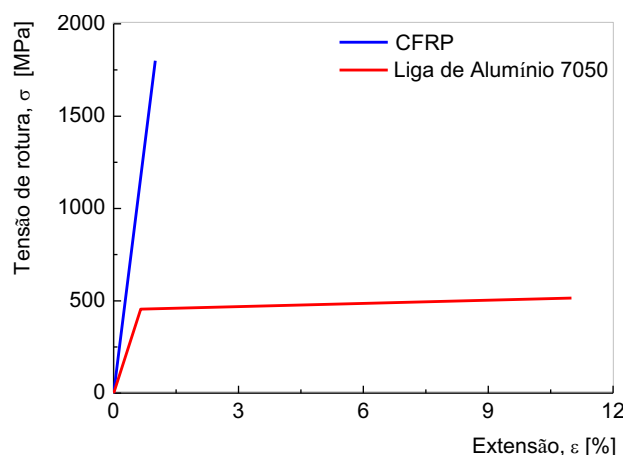


Figura 3.1 - Comparação das propriedades mecânicas dos materiais dos substratos

3.2 Programa de ensaios

O rácio de rigidez axial entre materiais foi um dos parâmetros a analisar neste estudo. A largura das amostras consideradas é de 50mm em todos os modelos. Na quarta coluna da Tabela 3.2 encontra-se discriminados os rácios determinados com base nas características dos materiais dos substratos. Estes valores são determinados com base na equação:

$$R = \frac{E_1 \times t_1 \times b_1}{E_2 \times t_2 \times b_2} \quad (3.1)$$

Onde E_1 corresponde ao módulo de elasticidade do material 1, t_1 à espessura do substrato 1 e b a largura da amostra que é igual em qualquer substrato. E_2 e t_2 representam as mesmas propriedades para o substrato 2.

Na Figura 3.2 estão representadas as ligações selecionadas para estudar nesta dissertação. Há que ter atenção que, uma vez que a ligação é simétrica e visto que cada modelação exige um esforço computacional exigente, optou-se por simular um dos lados de simetria da ligação.

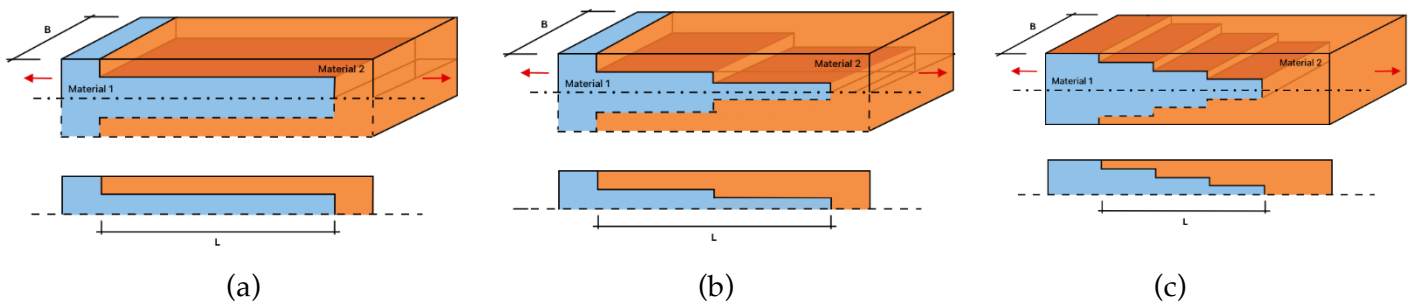


Figura 3.2 - Esquema das ligações: (a) Ligação Sobreposição Simples; (b) Ligação em Degrau Duplo e (c) Ligação em Degrau Triplo

Na Figura 3.3, é exemplificado o cálculo do coeficiente de rigidez axial, na ligação de degrau triplo. Para os outros tipos de ligação, degrau duplo e sobreposição simples, o método é calculado de forma homóloga.

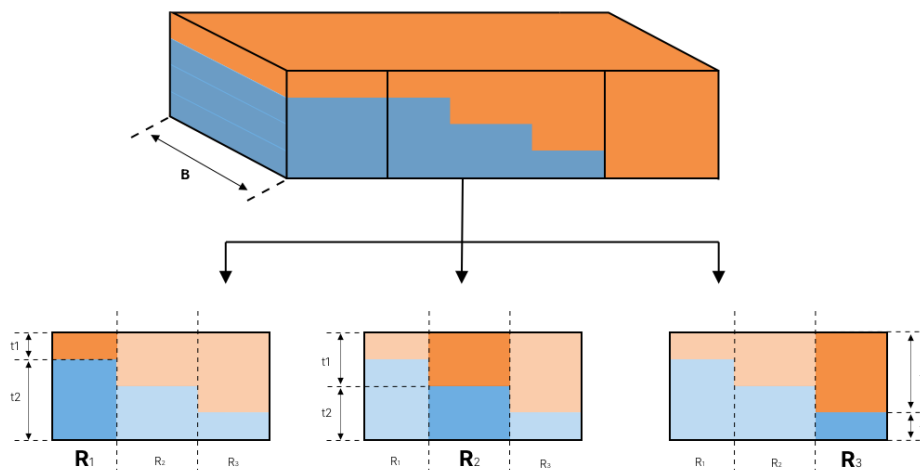


Figura 3.3 - Ilustração do cálculo da rigidez axial, na ligação de degrau triplo.

Para cobrir uma vasta gama de situações diferentes, foram selecionadas três relações de rigidez axial, com $R = 5,14$, $R = 1,29$ e $R = 1,00$. Tendo como referência a Figura 3.3, observa-se que $R_3 = 5,14$, o que significa que a rigidez axial do substrato 1 é cinco vezes superior à rigidez axial do substrato 2. Na ligação de degrau dupla e triplo, os rácios axiais $R = 0,19$, $R = 0,78$ são o inverso dos rácios $R = 5,14$, $R = 1,29$, respetivamente.

Neste estudo foram realizadas simulações em três tipos de ligações: ligação de sobreposição simples (amostras 1 a 12), ligação de degrau duplo (amostras 13 e 18) e ligação de degrau triplo (amostras 19 e 24). Na ligação sobreposição simples, serão modelados com um comprimento de ligação de 50mm e outro de 150mm. Destes, os seis modelos iniciais correspondem à ligação CFRP-CFRP, onde um substrato tem uma espessura de 2,8mm e o outro substrato terá uma espessura variável, de modo que o coeficiente de rigidez axial adote os valores 1,00, 1,29 e 5,14. Os modelos 7 a 12 dizem respeito à ligação CFRP – Alumínio cujo programa é igual ao anteriormente descrito.

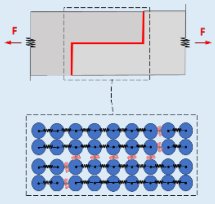
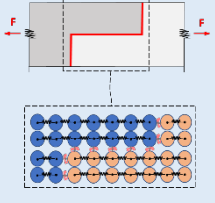
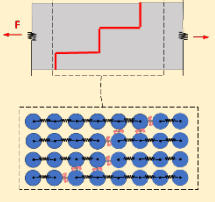
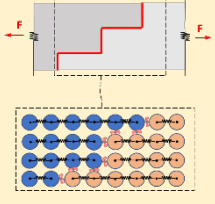
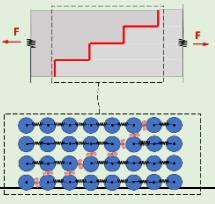
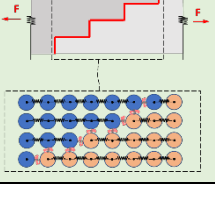
A ligação em degrau duplo (amostra 13 e 18) será modelada apenas com o comprimento de ligação de 150mm, assim como a ligação de degrau triplo (amostras 19 e 24). Novamente nestas ligações, os primeiros três ensaios são modelados com CFRP_CFRP e os restantes três com CFRP_Al. Adicionalmente, fez-se variar a espessura dos substratos por forma a obter rácios de rigidez axial iguais aos obtidos com a ligação de sobreposição simples, de modo a ser possível compará-los. A Tabela 3.2 identifica cada uma das 18 simulações numéricas realizadas neste estudo.

3.3 Modelo coesivo adotado

No presente trabalho, a ligação colada entre o CFRP e o alumínio é modelado com base no modelo de dano coesivo (MDC) onde a relação entre as tensões de ligação num determinado ponto e o deslizamento nesse mesmo ponto têm forma bilinear. Simulações com base nesta resposta, já foram anteriormente realizadas por Biscaia *et al.* [58] ao estudar o comportamento cíclico de ligações CFRP-alumínio e CFRP-CFRP. Sob carregamento monotónico, os deslocamentos locais em cada ponto da ligação sobreposta seguem uma relação de *bond-slip*, como indicado na

Figura 3.4 – Lei bilinear Força-Separação Nesta relação, três fases são observadas. Na primeira fase Elástica (E) a rigidez elástica, K_e , é cresce linearmente até atingir a tensão de corte máxima, $\tau_{máx}$ seguida da segunda fase, Amolecimento (A) onde existe uma diminuição linear da rigidez, K_s , até $\tau = 0$. A partir deste ponto, os aderentes descolam-se fisicamente uns dos outros e, portanto, a transferência de tensões entre eles é nula, sendo esta a fase de Descolamento (D).

Tabela 3.2 - Listagem de ensaios de modelos numéricos

Ilustração	Módulo Elasti- cidade (GPa)	Espessura (mm)	Rácio rigidez axial R (-) / Se- quência	Tipo Ligação	Comprimento colado	
	Mat. 1 Mat.2	Mat. 1 Mat.2				
	180 180	2,80 2,80	1,00	LSS	50	
		2,80 2,17	1,29		150	
		2,80 0,54	5,14		50	
		180 70	1,08 2,80		1,00	50
			1,40 2,80		1,29	150
			2,80 1,40		5,14	50
		180 180	2,80 & 4,69 2,80 & 0,91	1,00 5,14	LDD	150
			2,80 & 0,91 2,80 & 4,69	1,00 0,19		
			4,69 & 0,91 0,91 & 4,69	5,14 0,19		
		180 70	3,73 & 1,57 1,87 & 4,03	1,00 5,14		
			1,57 & 0,39 4,03 & 5,21	1,00 0,19		
			3,73 & 0,39 1,87 & 5,21	5,14 0,19		
	180 180	4,69 & 3,15 & 2,80 0,91 & 2,45 & 2,80	5,14 1,29 1,00	LDT	150	
		4,69 & 2,80 & 0,91 0,91 & 2,80 & 4,69	5,14 1,00 0,19			
		3,15 & 2,80 & 2,45 2,45 & 2,80 & 3,15	1,29 1,00 0,78			
		180 70	3,73 & 1,87 & 1,57 1,87 & 3,73 & 4,03			5,14 1,29 1,00
			3,73 & 1,57 & 0,39 1,87 & 4,03 & 5,21			5,14 1,00 0,19
			1,87 & 1,57 & 1,30 3,73 & 4,03 & 4,30			1,29 1,00 0,78

Para limitar o número de variantes neste estudo foi utilizada a mesma relação bilinear *bond-slip* em todos os modelos numéricos em que a tensão de ligação máxima foi definida igual a

15,0 MPa, a rigidez elástica (K_e) foi definida igual a $5,769 \times 10^5 \text{ MN/m}^3$ (que corresponde a $\delta_{\text{max}} = 0,026 \text{ mm}$) e um deslize final interfacial de $\delta_f = 0,12 \text{ mm}$.

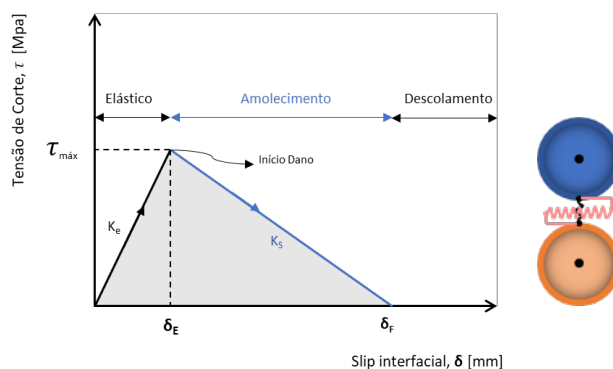


Figura 3.4 – Lei bilinear Força-Separação sob carregamento monotônico, adaptado de [59]

3.4 Considerações gerais na modelação

O modelo discreto proposto é um modelo teórico para simular o comportamento de ligação entre um composto de CFRP e um substrato (CFRP ou Alumínio). Na modelação das ligações foram feitas algumas considerações, de modo a tornar o estudo do problema mais simples de resolver, sendo deste modo, as limitações do trabalho. No presente estudo, o modelo é desenvolvido com os seguintes pressupostos principais:

- (i) As amostras foram sujeitas a um ensaio do tipo *pull-pull*, isto é, o substrato foi ancorado numa extremidade e foi aplicada uma carga na extremidade oposta.
- (ii) Apenas é considerado esforço de corte puro, não existindo outro tipo de esforços na ligação, pelo que o modo de rotura é tipo II.
- (iii) A espessura dos substratos não sofre qualquer alteração durante o processo de descolamento, uma vez que o deslocamento no eixo y foi bloqueado. Adicionalmente a distorção do compósito do CFRP é ignorada.
- (iv) O comportamento da ligação monotónica da interface é definido utilizando um modelo analítico bilinear;
- (v) Cada contacto na interface é modelado de forma coesa utilizando o modelo de força-deslocamento, o que torna possível a criação de ligações coladas híbridas com múltiplos comportamentos de ligação local;
- (vi) A degradação da ligação colada depende da deformação plástica acumulada (dano) desenvolvido em cada ponto da interface.

Todos os pressupostos-chave acima mencionados são normalmente utilizados para definir a equação governativa de uma ligação híbrida colada, tal como as ligações CFRP-Alumínio. Para definir essa equação, são utilizadas condições clássicas de equilíbrio e compatibilidade e assume-se que o compósito CFRP tem uma relação tensão-deformação linear com uma rotura frágil.

3.5 Metodologia dos ensaios

Na modelação por elementos discretos, para definir cada ligação utilizou-se sempre o mesmo número de partículas, variando o raio de cada partícula com comprimentos colados distintos. Para o comprimento colado de 10mm o raio de cada partícula é 0,5mm, sendo os seguintes comprimentos de ligação (50, 100, 150, 200 e 250mm) modelados com um raio de partícula de 0,25; 0,5; 0,75; 1 e 1,25mm respetivamente, o que corresponde a 100 partículas utilizadas para a modelação da interface. O teste de corte puro do tipo *pull-pull* foi aplicado numa ligação de sobreposição simples, Figura 3.5, ligação de degrau duplo, e ligação de degrau triplo, Figura 3.6.

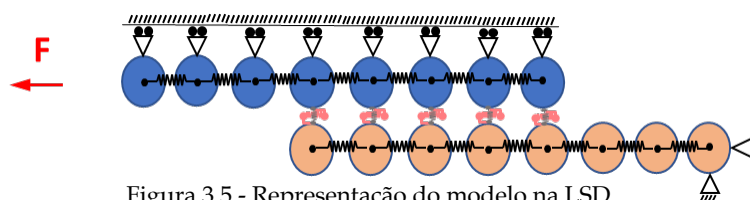


Figura 3.5 - Representação do modelo na LSD

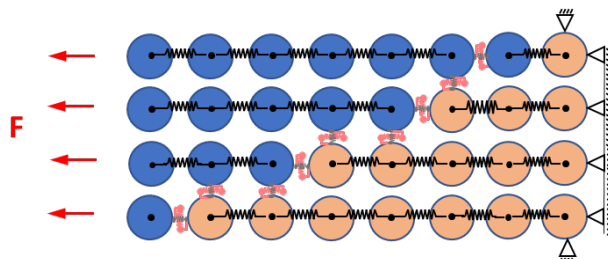


Figura 3.6 - Representação do modelo na ligação de múltiplos degraus

Foi implementado um modo de controlo de deslocamento para protocolos de carregamento monotónico. A extremidade do substrato CFRP puxada, localiza-se no lado oposto ao da ancoragem, e as cargas puxadas foram simuladas com uma velocidade de deslocamento regular de 0,015m/s, com um passo de cálculo de $2,50^{-11}$ segundos, que foi implementada no protocolo de carregamento monotónico. Desta forma, em cada instante da simulação, o deslizamento interfacial entre o CFRP e o substrato na extremidade puxada do CFRP é o mesmo em todas as amostras. Os deslizamentos na interface são os deslocamentos relativos entre os aderentes e é dada por:

$$\delta = S_2 - S_1 \tag{3.2}$$

onde S_1 e S_2 correspondem respectivamente ao deslocamento no material 1 e o deslocamento no material 2.

APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS

O presente Capítulo, tem como objetivo apresentar os resultados obtidos pela simulação numérica descrita no Capítulo anterior. Nos subcapítulos seguintes, todos os parâmetros analisados foram realizados para substratos cujo material é CFRP-CFRP e CFRP-Alumínio. No decorrer do primeiro subcapítulo, é calculado o comprimento efetivo e força máxima de rotura para a ligação de sobreposição. No subcapítulo 4.2 é determinado a resposta força-deslizamento para carregamentos monotônicos nas três ligações. No subcapítulo 4.3 é feita a uma análise da resposta *slip*-comprimento colado. Nos subcapítulos 4.4 e 4.5, o *slip* e a distribuição de tensões ao longo comprimento colado são analisados, respetivamente. Por fim, é estudado o dano ao longo da ligação.

4.1 Comprimento efetivo e força máxima de rotura

A identificação do comprimento efetivo de ligação (L_{eff}), isto é, o comprimento a partir da qual não existe incremento da resistência interfacial, é realizada estudando a relação força-deslizamento (*load-slip*). Para determinar o comprimento efetivo e a força máxima na interface de cada ligação colada de CFRP-alumínio e CFRP-CFRP, foi necessário realizar simulações em amostras, com diferentes comprimentos colados (10, 50, 100, 150, 200, 250mm) e 50 mm de largura. Em seguida, foi aplicada uma carga monotónica até à rotura da ligação, obtendo assim a força máxima de descolamento em cada comprimento colado.

No presente trabalho, a proposta feita por Neubauer e Rostásy, [72] foi utilizada para estimar a carga máxima. Deste modo, foi realizado o seguinte processo de minimização é dado por:

$$\xi = \min_{L_{eff}} \sum_i^n \sqrt{\left((\beta_L \cdot F_{deb,i}) - (F_{max,i})_{num} \right)^2} \quad (4.1)$$

onde, $F_{deb,i}$ e $F_{max,i}$ corresponde à força de descolamento e à força máxima de rotura, respetivamente, e onde o parâmetro adimensional β_L , obtido de [72]:

$$\beta_L = \frac{L_b}{L_{eff}} \cdot \left(2 - \frac{L_b}{L_{eff}} \right) \quad (4.2)$$

em que L_b é o comprimento total da ligação colada e L_{eff} o seu comprimento efetivo.

Com o objetivo que estudar a ligação com maior comprimento efetivo e força máxima, quatro ensaios foram realizados onde se fez variar o parâmetro de rácio de rigidez axial ($R=1,00$, $R=1,29$ e $R=5,14$). Três simulações foram realizadas com substratos CFRP-Al que permitiram perceber a tendência com a variação deste parâmetro. Por fim, para saber a ligação com maior força de rotura realizou-se como comparação uma simulação com $R=1,00$ cujos substratos de ligação são CFRP-CFRP. A Figura 4.1 ilustra os resultados obtidos.

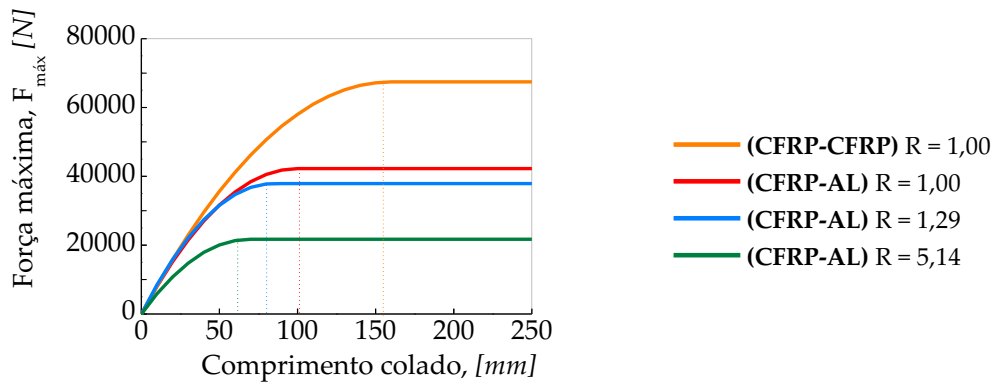


Figura 4.1 - Comparação comprimento efetivo e força máxima de ligação colada sobreposição simples

Na Figura 4.1 dois ramos diferentes podem ser definidos. O primeiro, que define a tendência da resistência interfacial da ligação para comprimentos de ligação colada pequenos (até aproximadamente 50mm para ligações CFRP-Al, e um segundo, que define o mesmo comportamento, mas para comprimentos de ligação maiores. Enquanto o segundo ramo é constante após alcançar o comprimento efetivo (L_{eff}), o primeiro varia não-linearmente com o aumento do comprimento.

A Tabela 4.1 reflete os valores absolutos obtidos da comparação ilustrada na Figura 4.1.

Tabela 4.1 - Valores de comprimento efetivo e força máxima de rotura nos diferentes rácios de rigidez axial

Rácio de rigidez axial	Comprimento efetivo [mm]	Força máxima [N]	Material
1,00	159,87	67462	CFRP- CFRP
1,00	100,03	42234	CFRP-Al
1,29	84,32	37900	CFRP-Al
5,14	68,78	21698	CFRP-Al

Da Tabela 4.1 constata-se que a força de rotura numa ligação CFRP-CFRP é significativamente superior (67462N) quando comparado com uma ligação híbrida cujos aderentes sejam compostos por CFRP-Alumínio (42234N). O mesmo ocorre com o comprimento efetivo, onde o valor correspondente à ligação CFRP-CFRP é aproximadamente 60% superior em relação à ligação CFRP-Alumínio. Conclui-se, portanto, que a ligação CFRP-CFRP apresenta os melhores resultados para um rácio de rigidez axial de 1,00.

Analisando apenas a ligação CFRP-Al, verifica-se que com o aumento do rácio de rigidez axial (para $R > 1$), existe um decréscimo quer do comprimento efetivo de ligação, quer da força máxima suportada pela ligação. Este fenómeno é justificado pelo facto de com o aumento do rácio, verifica-se uma componente de amolecimento cada vez menos acentuada, pelo que o comprimento efetivo vai sendo menor, bem como a força máxima de rotura.

No que respeita a componente elástica da ligação, observa-se que este depende do rácio de rigidez axial dos materiais, apresentando ligeiras oscilações na reta crescente para comprimentos de ligação até aos 50mm para $R=5,14$.

Deste modo, para a ligação de sobreposição simples híbrida de CFRP-Alumínio, conclui-se que a melhor ligação é obtida com um rácio de rigidez axial de 1,00, onde a força de rotura vai aumentando até um valor máximo de 42234N atingido para um comprimento de ligação de 100,03mm. Por outro lado, a ligação CFRP-CFRP homologamente apresenta os melhores valores de resistência da ligação. Embora não se tenha modelado a ligação CFRP-CFRP com os rácios 1,29 e 5,14, podemos concluir que seguirá a mesma tendência dos resultados obtidos com o material CFRP-AL.

4.2 Resposta Força- Deslizamento

As diferentes respostas força- deslizamento foram analisadas com base nos modelos numéricos implementados. A relação entre força de corte e o deslocamento simula os elementos na interface dos dois materiais, e, no caso da ligação de degrau duplo e triplo, simula a interface

dentro do mesmo material, embora este contacto seja praticamente rígido. A força adotada corresponde ao somatório de todas as forças de corte locais, ao longo do comprimento da ligação enquanto o deslizamento é medido a partir da diferença entre o deslocamento relativo de cada substrato, calculado a partir da equação (3.2).

4.2.1 Ligação Sobreposição Simples

Nas Figuras 4.2 b) e d) observa-se que para um $R=1,00$ a força cresce não-linearmente até à força máxima na interface da ligação, momento em que a força permanece constante com o aumento do *slip*, formando um planalto no gráfico. Nesta fase, o material começa a descolar até à sua rotura. Os resultados mostram que a descolagem é maior na ligação CFRP-Al o que corrobora os resultados obtidos no Subcapítulo 4.1, que revelaram que o comprimento efetivo no alumínio (100,03mm) é menor do que no CFRP (159,87mm).

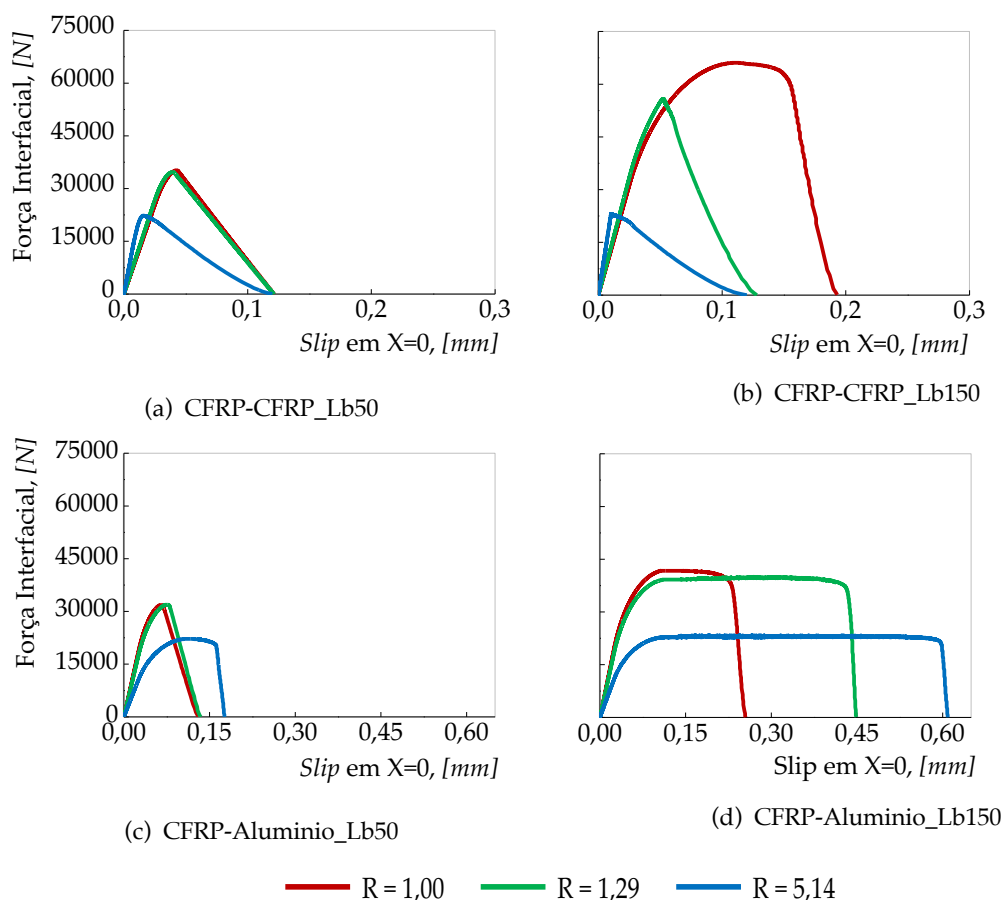


Figura 4.2 - Força Interfacial vs. Slip_Monotónico

Outro aspeto que se pode verificar na Figura 4.2, é que ao diminuir o módulo de elasticidade de um dos aderentes, constata-se que a capacidade de resistência da ligação diminui. De facto, se compararmos a ligação CFRP-CFRP_Lb150 com CFRP-Aluminio_Lb150, ambas para um rácio de rigidez axial $R=1,00$ tem-se que a primeira ligação apresenta uma força de rotura 24,5kN superior à segunda. Por este motivo, estes resultados sugerem que a utilização de um material com um módulo de elasticidade maior, contribui para a obtenção de uma ligação colada com maior resistência mecânica. Que por sua vez justifica a utilização de CFRP como principal escolha no fabrico de ligações coladas, independentemente da geometria adotada.

4.2.2 Ligação em Degrau Duplo

Uma vez que a ligação de degrau duplo e triplo foram apenas simuladas para o comprimento de ligação de 150mm, a comparação destas duas ligações terá como base apenas este comprimento. Três combinações de rácios de rigidez axial foram seleccionadas: $R=1,00 | R=0,19$, $R=5,14 | R=0,19$ e $R=5,14 | R=1,00$. Os resultados são observados na Figura 4.3.

Quando comparado com a ligação de sobreposição simples, a ligação de degrau duplo tem como maior valor de força de rotura 64845N, para o conjunto de rácios $R=5,14 | R=0,19$ na ligação CFRP_CFRP. Este valor na força de rotura, não só é maior que na ligação LSS ($R=5,14$), como também apresenta um *slip* duas vezes maior (0,4mm).

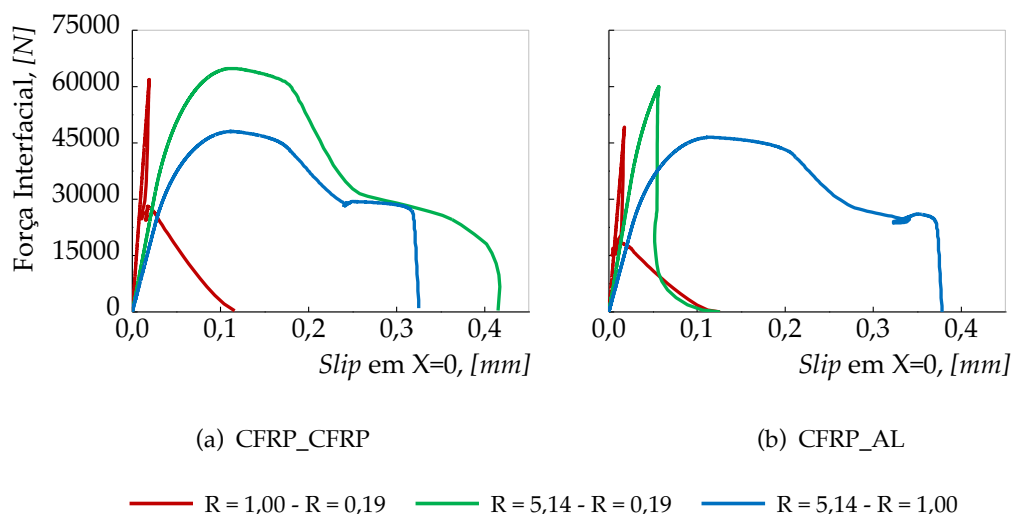


Figura 4.3 - Força Interfacial vs. Slip_Lb150_Duplo

Nesta ligação, observam-se três comportamentos distintos nos três conjuntos escolhidos de valores para R. Num primeiro caso, o conjunto $R=1,00 \mid R=0,19$ tem um comportamento idêntico independentemente do material dos substratos. Isto é, numa fase inicial a relação força-deslizamento é linear até atingir o valor máximo da força de rotura. Segue-se depois uma segunda fase, onde ocorre uma descida acentuada da força interfacial para uma pequena variação do deslizamento. De seguida existe uma ligeira variação no deslizamento onde a força máxima na interface não sofre alteração, sugerindo que esta fase seja no meio do degrau. Logo a seguir, ocorre um decrescimento linear com o aumento do *slip*. Por fim, há um decrescimento até ao valor final de *slip* de 0,12mm. Uma vez que nesta ligação não se verifica uma região de planalto significativa, pode-se assumir que o comprimento de ligação pode não ser suficientemente grande para alcançar a resistência da mesma. Num segundo caso, na ligação $R=5,14 \mid R=1,00$ observa-se que existe uma fase intermédia onde a carga máxima tende a ficar constante, sugerindo que os aderentes da ligação colada começam a separar ao longo do comprimento da ligação. Isto também indica que a ligação tem um comprimento colado suficientemente grande que permite alcançar a sua resistência.

4.2.3 Ligação em Degrau Triplo

Para a ligação em degrau triplo (LDT), três conjuntos de rácios de rigidez axial foram selecionados: (a) $R=1,29 \mid R=1,00 \mid R=0,78$, (b) $R=5,14 \mid R=1,00 \mid R=0,19$ e (c) $R=5,14 \mid R=1,29 \mid R=1,00$.

A relação força-deslizamento é ilustrada na Figura 4.4.

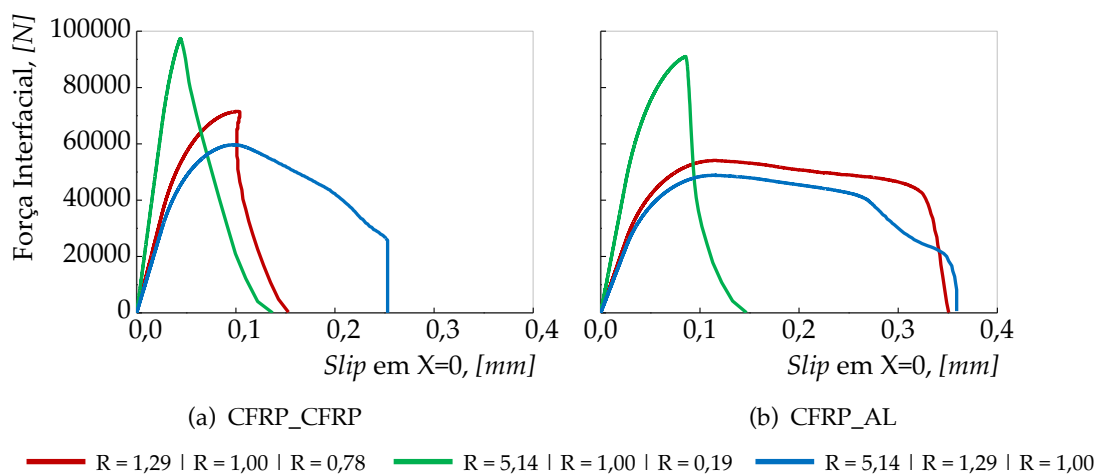


Figura 4.4 - Força Interfacial vs. Slip_Lb150_Triplo

Para a ligação a verde verifica-se que em ambos os materiais, o conjunto de rácios não promove uma fase de planalto, o que sugere que o comprimento efetivo é superior ao comportamento de ligação de 150mm. Por outro lado, na ligação representada a vermelho e azul é atingido o comprimento efetivo na ligação com a liga de alumínio.

A ligação com os rácios $R=5,14 \mid R=1,00 \mid R=0,19$ é aquela onde se observa um maior valor de força interfacial, no entanto, para um comprimento de ligação de 150mm, a força na interface vai aumentando com o deslizamento até ao valor máximo. Seguindo-se uma fase de diminuição da força com o aumento do *slip*.

Ao comparar-se as ligações CFRP_CFRP e CFRP_Al, à semelhança do observado quer na ligação de sobreposição simples, quer na ligação de degrau duplo, verifica-se que quando os aderentes são apenas compostos por CFRP, a força máxima na interface da ligação é sempre maior.

Em suma, da análise efetuada neste capítulo, observaram-se comportamentos similares nos três tipos de ligação: fase linear, fase não-linear, fase de planalto e rotura da ligação. A ligação que suporta uma maior força na interface é a LDT (CFRP_CFRP) com o conjunto de rácios, $R=5,14 \mid R=1,00 \mid R=0,19$, cerca de 50,4% superior que na LDD e 47,1% superior à LSS. A ligação onde o planalto foi maior, isto é, houve maior descolamento até à rotura, foi na LDT com material CFRP_Al.

4.3 Distribuição do *slip* ao longo do comprimento colado

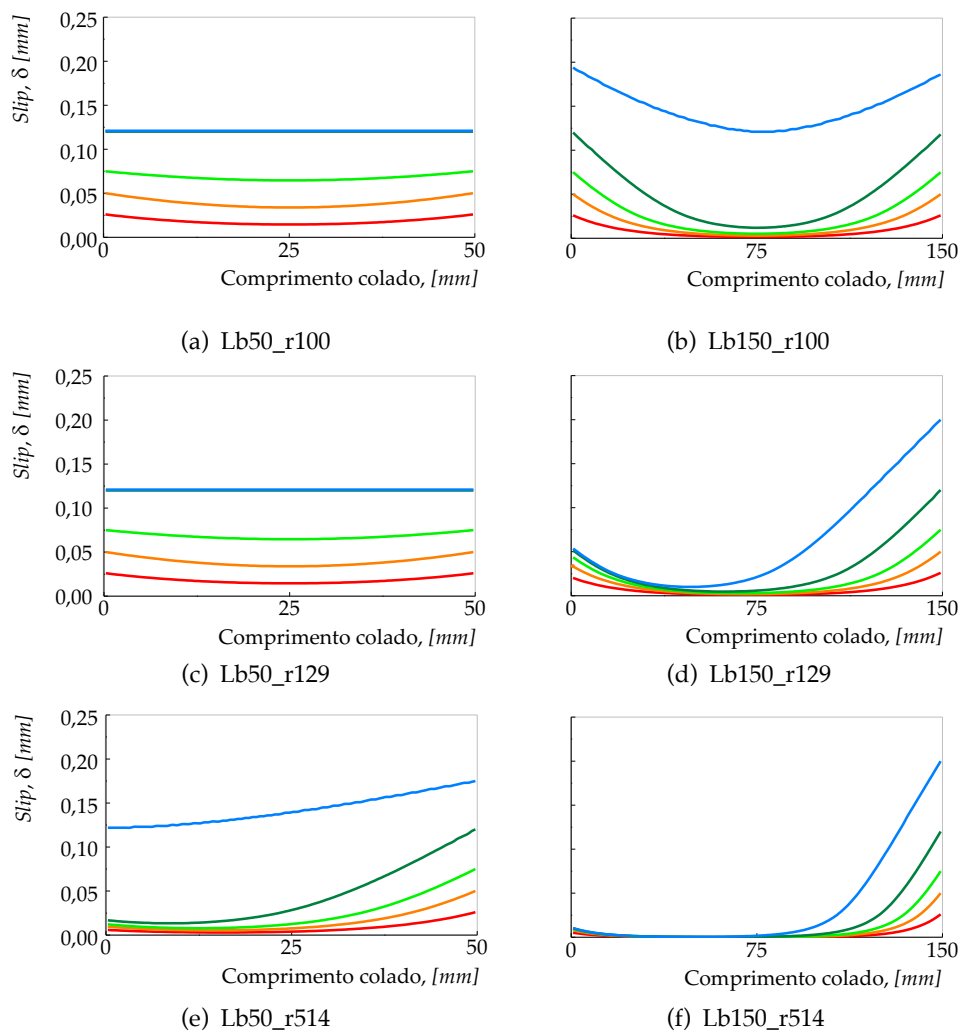
No presente Subcapítulo, a evolução do *slip* ao longo do comprimento colado será abordado. Os seguintes deslizamentos na extremidade mais carregada foram selecionados para mostrar as distribuições do *slip* ao longo do comprimento total das ligações: Ponto A onde $s = 0,026\text{mm}$ (vermelho), Ponto B onde $s = 0,050\text{ mm}$ (laranja), Ponto C onde $s = 0,075\text{ mm}$ (verde-claro), Ponto D onde $s = 0,120\text{ mm}$ (verde-escuro), e Ponto E onde $s = 0,200\text{ mm}$ (azul).

4.3.1 Ligação Sobreposição Simples

De um modo geral, verifica-se que a evolução do *slip* ao longo do comprimento da ligação colada segue as mesmas fases. Numa primeira fase, existe um determinado *slip* na extremidade contrária àquela onde é exercida a força. Este deslizamento é tanto maior, quanto mais perto de 1 é o valor do rácio de rigidez axial. Numa segunda fase, segue-se uma diminuição do *slip* com o aumento do comprimento colado até um valor mínimo. Caso o comprimento seja suficiente para não haver amolecimento do material, o *slip* é igual a 0, como observado nas Figura 4.5 f) e Figura 4.6 f). É de notar que o valor mínimo de *slip* tem a tendência a ser em comprimentos sucessivamente menores com o aumento do rácio de rigidez axial, para $R > 1$. Para $R=1,00$, devido à simetria geométrica da ligação, tem-se uma força em cada extremidade da ligação igual à força aplicada. Esta força será menor a meio da ligação, pelo que também

será aí que o *slip* será menor. A partir deste ponto, começa uma terceira fase, onde há um aumento progressivo do *slip* até ao comprimento de 150mm.

Para o caso de $R=1,00$, o processo de descolamento dos aderentes é simétrico, como observado na Figura 4.5 a) e Figura 4.5 b), o que significa que a fase de amolecimento aparece em ambas extremidades da ligação. Adicionalmente, devido às condições de equilíbrio, as capacidades de ligação dessas ligações devem ser as mais elevadas. No entanto, apesar da Figura 4.6 b) ter um $R=1,00$, a descolamento não foi simétrica como seria de esperar. A principal causa para este facto é a aproximação utilizada para modelar as espessuras desta ligação, ou seja, utilizando uma espessura $e_1 = 1,08$ mm para o aderente 1 e $e_2 = 2,8$ mm para o aderente 2, tem-se uma rigidez axial de 1,008 que, sendo maior a 1, induz o descolamento no lado direito da ligação ligeiramente primeiro do que no lado esquerdo. Para $R>1$, os resultados mostram que as capacidades de ligação diminuem com o aumento do valor de R .

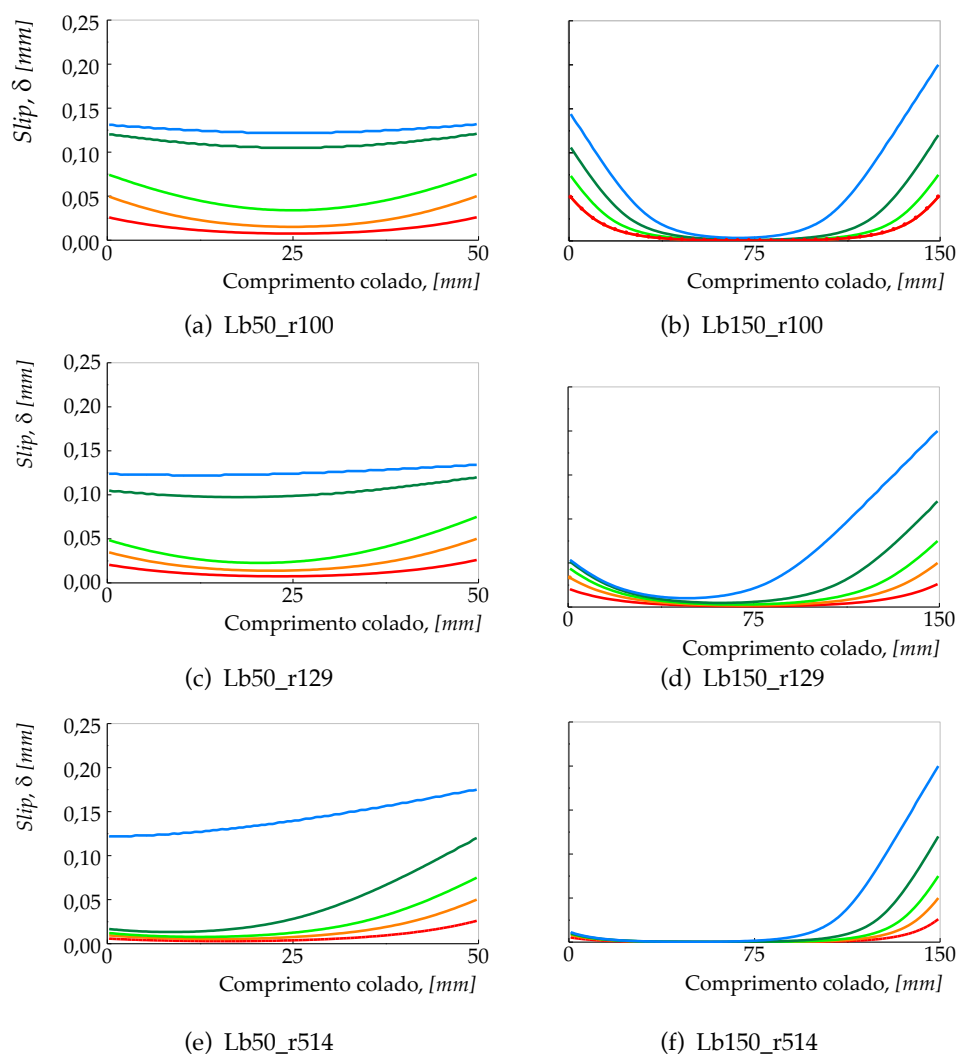


— *Slip* = 0,026 mm — *Slip* = 0,050 mm — *Slip* = 0,075 mm — *Slip* = 0,120 mm — *Slip* = 0,200 mm

Figura 4.5 - *Slip* vs. Comprimento colado_CFRP-CFRP

Para o caso $R=1,29$, tem-se o processo de descolamento a começar do lado direito, onde o *slip* é consideravelmente superior ao observado na extremidade oposta. Os resultados apresentados para o comprimento de ligação de 50mm são bastante semelhantes aos observados em $R=1,00$, apenas uma pequena variação no *slip* na extremidade onde é aplicada a força. No comprimento de ligação de 150mm, as diferenças entre os materiais aderentes já são mais notórias, em especial, no declive observado depois dos 75mm de ligação.

Por último, no caso $R=5,14$, existe uma diferença significativa face aos outros valores mais perto de 1. Logo na ligação de menor comprimento, observa-se um contraste entre os *slips* na extremidade direita face à outra, sendo a primeira mais elevada que a segunda. Na ligação de 150mm, verifica-se uma amplitude de *slip* bastante desproporcional entre as pontas da ligação, sendo que o amolecimento ocorre principalmente a partir do comprimento 75mm.



— Slip = 0,026 mm — Slip = 0,050 mm — Slip = 0,075 mm — Slip = 0,120 mm — Slip = 0,200 mm

Figura 4.6 - Slip vs. Comprimento colado_CFRP-AI

É ainda importante referir os casos onde $R < 1$, apesar destes não terem sido modelados na ligação LSS, apenas nas seguintes ligações. Com $R = 0,19$ e $0,78$ obtém-se transformando $1/R = 1/1,29 = 0,78$ e $1/R = 1/5,14 = 0,19$, a iniciação do descolamento destas ligações terá agora lugar no lado esquerdo destas ligações em vez de no lado direito. Assim, os processos de descolamento destas ligações são os mesmos que os descritos anteriormente, mas com o primeiro aparecimento das etapas de amolecimento e descolamento na interface no lado esquerdo da ligação.

4.3.2 Ligação em Degrau Duplo

Na ligação LDD, três situações distintas foram selecionadas: (a) com $R=1$ e $R < 1$, (b) com $R > 1$ e $R < 1$ e (c) com $R > 1$ e $R=1$. Os resultados obtidos estão discriminados na Figura 4.7.

Na primeira situação, Figura 4.7 a) e Figura 4.7 b) observa-se que o maior *slip* ocorre na extremidade encastrada onde o *slip* é máximo, decrescendo não linearmente seguido de um ligeiro crescimento novamente no meio da ligação, nos 75mm, onde se regista um pico. A partir deste ponto, o *slip* vai diminuindo até ao final da ligação, ponto onde surge novamente um crescimento ligeiro.

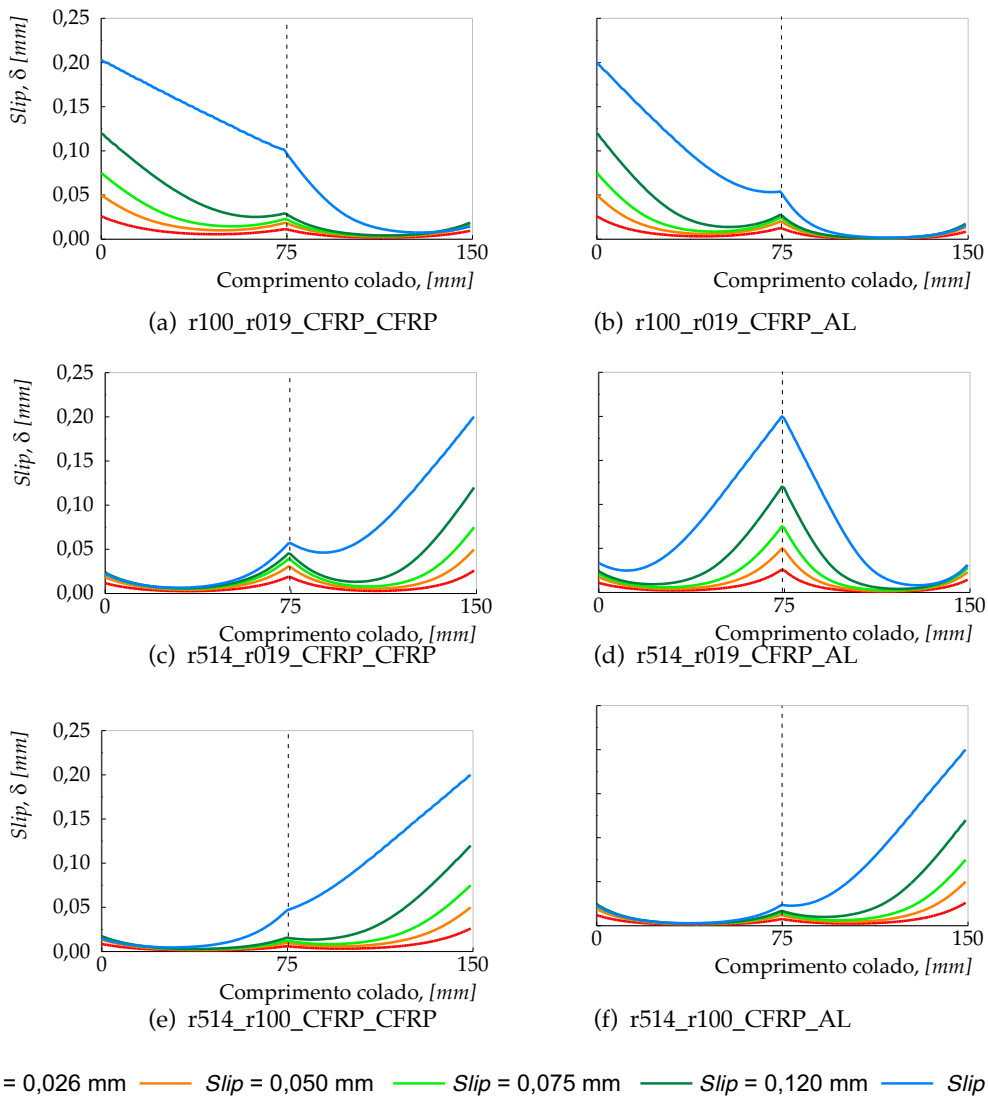


Figura 4.7 - *Slip* vs. Comprimento colado_Lb150_Duplo

Quando comparamos a ligação CFRP_CFRP e CFRP_AL, ambas apresentam as mesmas tendências, no entanto, a fase de decrescimento do *slip* é mais acentuada na ligação com Alumi-

nio. Tal como referido na ligação de sobreposição simples, com um $R < 1$ constata-se que a ligação começa o descolamento no lado esquerdo uma vez que este é o rácio de rigidez com valor mais baixo.

Na segunda situação, $R > 1$ e $R < 1$ verifica-se duas situações diferentes. Na ligação CFRP_CFRP, o *slip* começa na extremidade esquerda em valores pequenos ($< 0,05\text{mm}$) e vai decrescendo até atingir valores quase nulos. Segue-se um ligeiro crescimento até meio da ligação, 75mm, onde se volta a registar um ligeiro decréscimo do *slip*, voltando finalmente a crescer não-linearmente para valores de amplitude de 0,2mm. Nesta ligação o descolamento ocorre da direita para a esquerda. Na ligação CFRP_Al, por outro lado, temos um caso especial onde o descolamento inicia no meio da ligação. O valor mais alto de *slip* encontra-se nos 75mm, decrescendo quer com o aumento do comprimento de ligação até 150mm, quer com a diminuição da mesma até 0mm. No entanto, é do lado esquerdo que se verifica uma maior amplitude *slip*.

Ao trocar a razão de rigidez axial do lado entre substratos e invertendo os valores correspondentes das rigidezes axiais, a distribuição do deslizamento ao longo do comprimento de ligação seriam semelhantes aos obtidos nas simulações representadas na Figura 4.7 a) e Figura 4.7 b). Esta retrata a última situação, $R = 5,14$ e $R = 1,00$ onde o comportamento obtido é exatamente simétrico ao que foi descrito na primeira situação.

4.3.3 Ligação em Degrau Triplo

Na ligação LDT, novamente três situações distintas foram selecionadas (a) $R = 1,29 \mid R = 1,00 \mid R = 0,78$, (b) $R = 5,14 \mid R = 1,00 \mid R = 0,19$ e (c) $R = 5,14 \mid R = 1,29 \mid R = 1,00$. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 4.8.

Para as ligações com um conjunto de rácios rigidez axial $R = 1,29 \mid R = 1,00 \mid R = 0,78$ observam-se dois comportamentos semelhantes na Figura 4.7 a) e Figura 4.7 b). Quer no caso onde o substrato é CFRP, quer no substrato de alumínio, a variação do deslizamento na ligação é simétrica. Os maiores valores de deslizamento encontram-se nas pontas da ligação, sendo que entre os 50mm e 100mm, encontra-se os menores valores. Apenas na linha E (*slip*=0,2mm) podemos perceber que estas ligações começam a descolar em sítios diferentes, enquanto a ligação CFRP descola da esquerda para a direita, na ligação com Alumínio verifica-se o simétrico, ou seja, da direita para a esquerda.

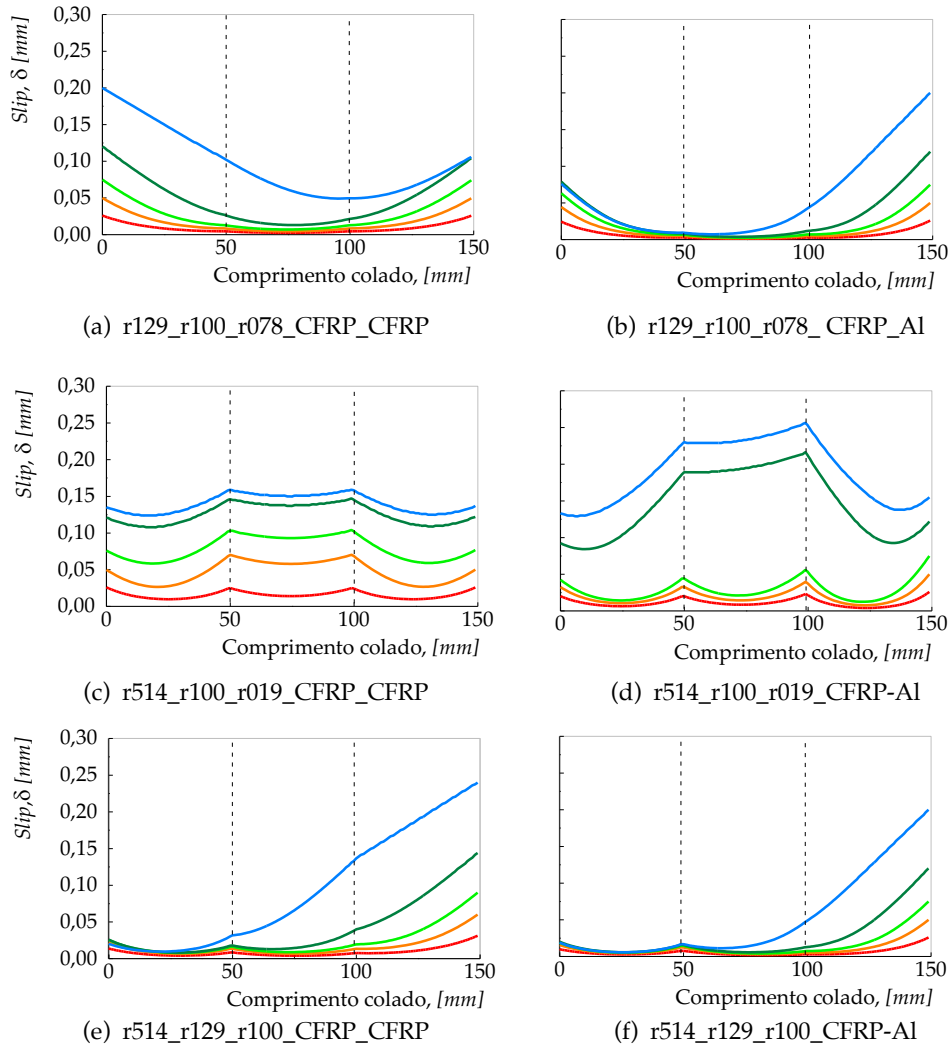


Figura 4.8 - Slip vs. Comprimento colado_Lb150_Triplo

O segundo conjunto representado na Figura 4.7 c) e Figura 4.7 d) é diferente dos outros observados uma vez que o pico do slip na ligação ocorre quer na extremidade da ligação, quer na transição dos rácios de rigidez axial, ou seja, nos comprimentos de ligação igual a 50mm e 100mm. Entre estes picos o *slip* diminui e volta a aumentar num formato parabólico, sugerindo que o descolamento se inicia na transição entre os degraus da ligação.

Por fim, tem-se os casos observados nas

Figura 4.7e) e Figura 4.8 f) onde se pode observar que as distribuições de deslizamentos apresentam configurações similares. O *slip* é mínimo na extremidade esquerda da ligação, aumentando à medida que o comprimento da ligação vai aumentando, sendo máximo na extremidade direita. Este resultado vai em conta ao observado na ligação LSS para R=5,14 e R=1,29, onde o descolamento se inicia da direita para a esquerda.

Concluindo, verifica-se que o valor de R tem um grande impacto no comportamento de descolamento de uma ligação. De um modo transversal nos 3 tipos de ligação, constatou-se que

para um $R=1$, a ligação tem uma variação do slip simétrica sendo mais elevada nas extremidades e menor no meio da ligação. Os resultados obtidos da distribuição do deslizamento ao longo do comprimento de ligação, para $R>1$, sugerem que o descolamento se inicia do lado direito para o lado esquerdo e para $R<1$ verifica-se o oposto, ou seja, da esquerda para a direita.

4.4 Distribuição de Tensões

Neste subcapítulo, será realizada a descrição do processo de descolamento através da distribuição da tensão de corte exercida ao longo do comprimento colado da ligação. Para nos permitir descrever os processos de descolamento destas ligações, as três etapas definidas no comportamento local da interface (ver Figura 3.4) devem ser consideradas. Deste modo, todos os estados presentes na interface até ao momento do descolamento serão descritas em: (E) Elástica, (A) Amolecimento e (D) Descolamento. Adicionalmente, assume-se que antes de qualquer carga ter sido aplicada à ligação, o seu estado inicial será o estado Não Deformado (N).

4.4.1 Ligação Sobreposição Simples

À semelhança do que foi realizado no Subcapítulo 4.3, os seguintes deslizamentos na extremidade mais carregada foram selecionados para mostrar as distribuições de tensão da ligação ao longo do comprimento total das ligações: (a) Ponto A onde $s = 0,026$ mm, Ponto B onde $s = 0,050$ mm, Ponto C onde $s = 0,075$ mm, Ponto D onde $s = 0,120$ mm, e Ponto E onde $s = 0,200$ mm. Para a ligação LSS, podem ser identificados três casos diferentes: (a) $R > 1$; (b) $R = 1$; e (c) $R < 1$. Cada um destes casos é discutido em pormenor a seguir.

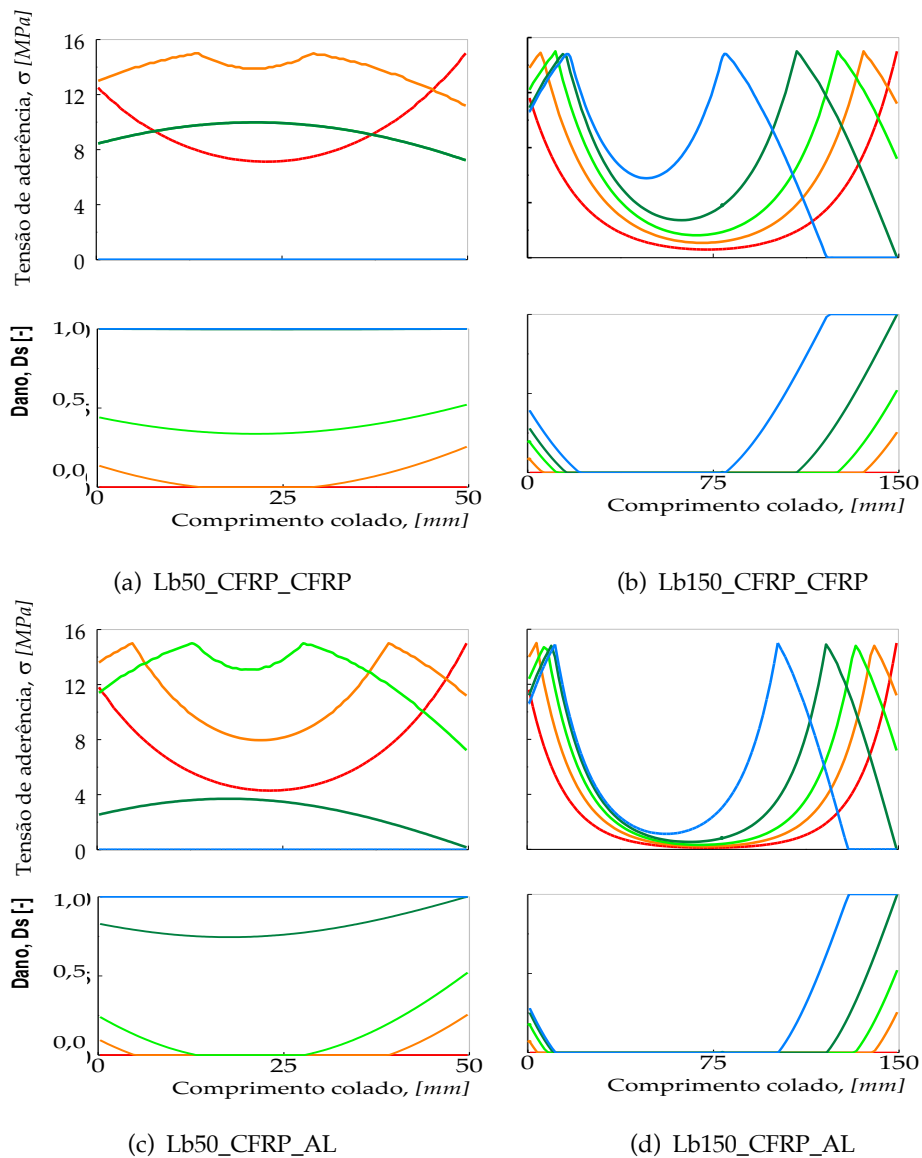
- **Casos onde $R>1$**

Nestes podem ser observados dois casos diferentes durante o processo de descolamento de ligações LSS. O primeiro caso pode ser identificado quando o valor da rigidez axial é bastante alto ($R=5,14$), enquanto o outro caso corresponderá a uma razão de rigidez axial perto de 1 ($R=1,29$). No primeiro caso, as tensões de ligação desenvolvidas no lado esquerdo da ligação nunca chegam à fase A (ver Figura 4.10 b) e Figura 4.10 d)), enquanto no segundo caso, uma região que desenvolve a fase A pode ser vista no lado esquerdo da ligação (ver Figura 4.9 b) e Figura 4.9 d)). Por esse motivo, as sequências de descolamento destas ligações seguem um caminho diferente.

Para um $R=1,29$, como no caso anterior, o E-U-E é quase marginal e, apesar de corresponder sempre a magnitudes de carga muito baixas, pode ser mais significativo se o comprimento total colado for bastante grande. Embora no estado E as tensões de ligação sejam todas inferiores a ($\tau_{máx}$), o lado direito da ligação desenvolve as tensões mais elevadas. Assim, o limite

do estado E é atingido quando ($\tau_{máx}$) é atingido no lado direito da ligação colada. Após este estado, a fase A ocorrerá nesta mesma borda. A seguir, aparece o estado A-E-A, o que significa que a interface da ligação desenvolve agora outra região A, dentro da interface localizada no lado direito e, portanto, a fase A pode ser observada em ambas as extremidades. Uma vez que a fase A, no lado direito da articulação é mais avançado do que no lado esquerdo, a separação completa entre os aderentes, ou seja, a fase D definida na

Figura 3.4, ocorrerá no lado direito da articulação que conduz ao estado D-A-E-A. No início deste estado, a configuração de tensão da ligação é maximizada e a ($\tau_{máx}$) é atingida. Do ponto de vista do equilíbrio dos aderentes, uma vez que as tensões de ligação obtidas nestas ligações têm uma área maior do que as obtidas nas ligações com R=5,14, as capacidades de ligação das ligações com R=1,29 são maiores do que as obtidas nas ligações com R=5,14. Posteriormente, com o descolamento total entre materiais, as cargas tendem a diminuir e os estados seguintes são associados a cargas mais baixas.



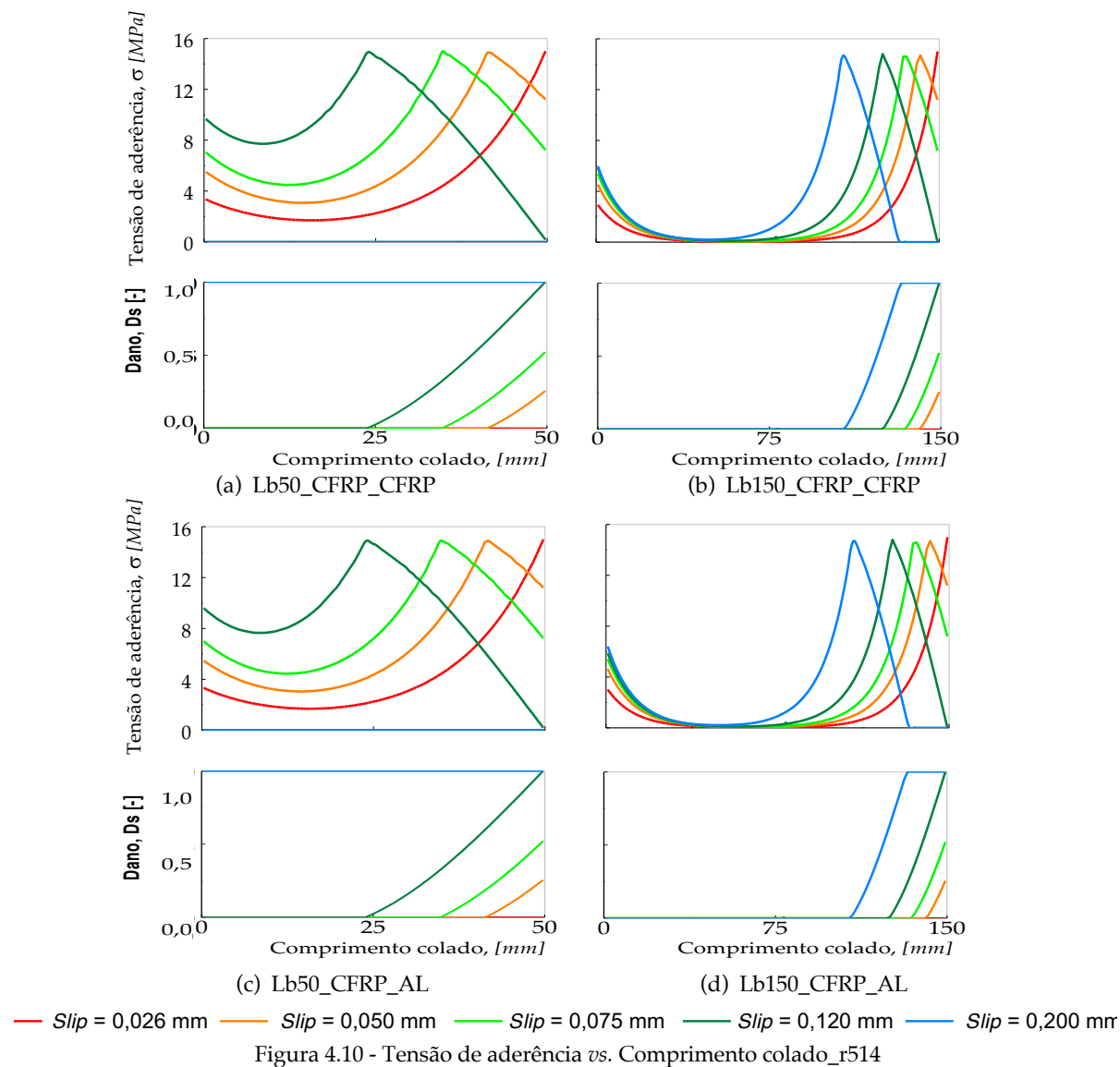
— Slip = 0,026 mm — Slip = 0,050 mm — Slip = 0,075 mm — Slip = 0,120 mm — Slip = 0,200 mm

Figura 4.9 - Tensão de aderência vs. Comprimento colado_r129

No caso de $R=5,14$, com uma amplitude de carregamento muito baixa, a interface está sob um estado E-U-E que tende rapidamente para um estado E com um pequeno aumento de força aplicada. Além disso, a magnitude da tensão de ligação no lado direito da mesma é mais elevada do que a desenvolvida no lado oposto. Logo, o estado E termina quando a tensão máxima da ligação ($\tau_{m\acute{a}x}$) é atingida na extremidade direita da ligação. Neste lado, a tensão na ligação tende agora a diminuir enquanto a posição onde ocorre $\tau_{m\acute{a}x}$ tende a migrar para o lado esquerdo da ligação. Isto pode descrever o estado A-E da ligação e, uma vez que maximiza as tensões de ligação dentro da interface, o seu limite conduzirá à capacidade da ligação. O estado seguinte é o estado D-A-E, o que significa que o descolamento total entre aderentes já começou no lado direito da ligação, uma vez que nenhuma tensão de ligação é agora transferida entre

aderentes. Apesar de não mostrados na Figura 4.10 f) e Figura 4.11 f), os estados seguintes são, por ordem sequencial, os estados D-S e D.

Para comprimento de ligação de 50mm, independentemente do material, verifica-se que o início do descolamento se inicia pelo mesmo lado que a ligação de 150mm, dando-se a fase de descolamento em *slips* mais pequenos.

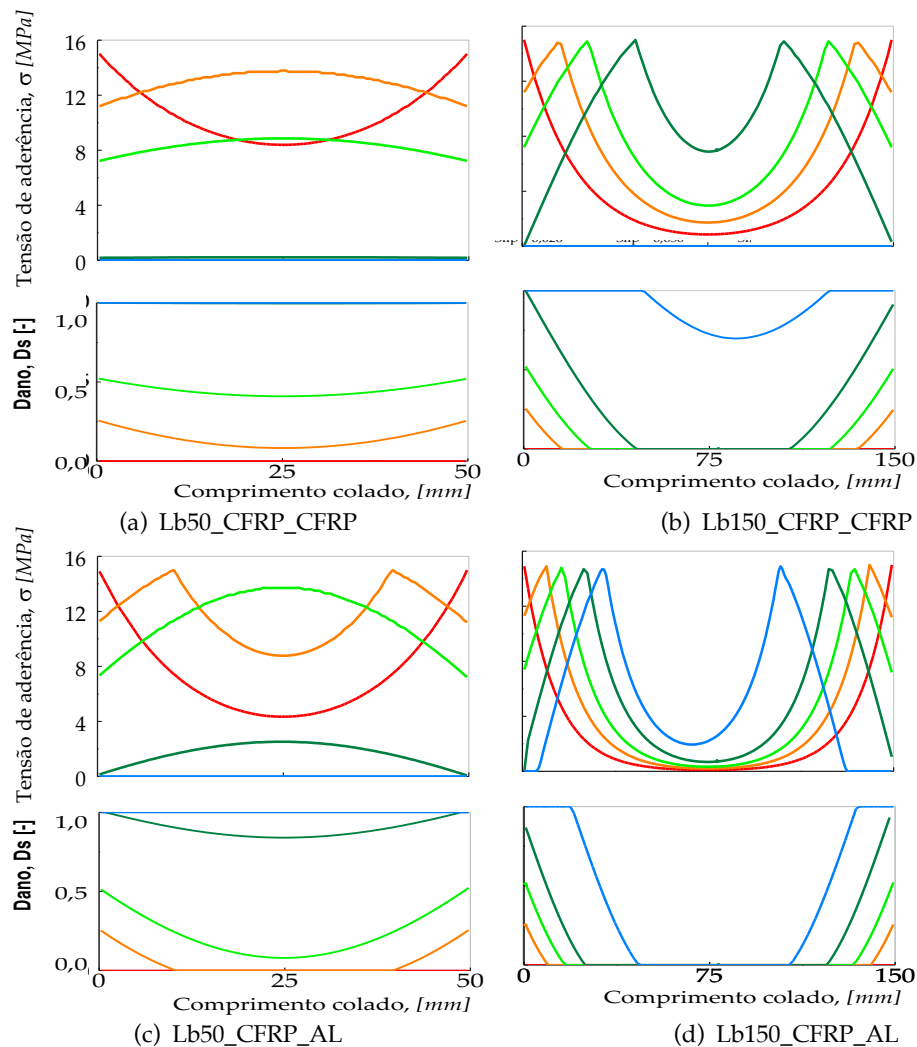


- **Casos onde R=1**

Nestes casos um aspecto principal deve ser tido em conta: o processo de descolamento tem de ser simétrico. Embora este cenário não se verifique na ligação CFRP_AI (Figura 4.11 d)) devido a erros de arredondamentos apontados no Subcapítulo anterior, na ligação CFRP_CFRP (Figura 4.11 b) é possível constatar esta simetria. O processo de descolamento para este rácio seguirá os seis estados até ao seu descolamento: (a) E-U-E; (b) E; (c) A-E-A; (d) D-A-E-A-D; (e) D-A-D; e (f) D.

Tendo em conta a simetria deste caso, os três primeiros estados são semelhantes aos estados homólogos descritos para a ligação com R= 1,29. No entanto, o final do estado E e o início do estado A-E-A é atingido quando ambos os lados atingem $\tau_{máx}$. Depois, a fase A aumenta nas mesmas proporções em ambas as extremidades da ligação. O fim deste estado corresponde ao descolamento total entre os aderentes em ambos os bordos da articulação e, neste ponto, o desenvolvimento das tensões interfaciais da ligação é maximizado, o que significa também que a capacidade de ligação é atingida. Uma vez que nestes casos são obtidas as maiores áreas de tensão de ligação, estes são os casos com maior resistência de ligação. Com a progressão do estado D-A-E-A-D, as tensões tendem agora a diminuir. Deve mencionar-se também que o D-A-E-A-D não é mostrado na Figura 4.11 b) porque não foram obtidos dados para o Ponto E (com $s = 0,200$ mm). Embora os estados seguintes não possam ser visíveis na Figura 4.11, a região E localizada no centro da ligação irá desaparecer e quando o fizer, o D-A-D desenvolve-se dentro da interface. No final, o estado D corresponderá à ausência de esforços transmitidos à ligação e os aderentes estão agora completamente separados um do outro.

Na ligação com comprimento menor, o início do descolamento também ocorre por ambas as extremidades da ligação, mas à semelhança do que se verificou em R=1,29, o descolamento dá-se em *slips* mais pequenos. Por exemplo, para a ligação CFRP_CFRP o quem no ponto D, quer no ponto E já ocorreu o descolamento da ligação. Em comparação, a ligação do mesmo material, com comprimento de ligação maior o Ponto D marca o início do descolamento.



— $Slip = 0,026 \text{ mm}$ — $Slip = 0,050 \text{ mm}$ — $Slip = 0,075 \text{ mm}$ — $Slip = 0,120 \text{ mm}$ — $Slip = 0,200 \text{ mm}$
 Figura 4.11 - Tensão de aderência vs. Comprimento colado_r100

- **Casos onde $R < 1$**

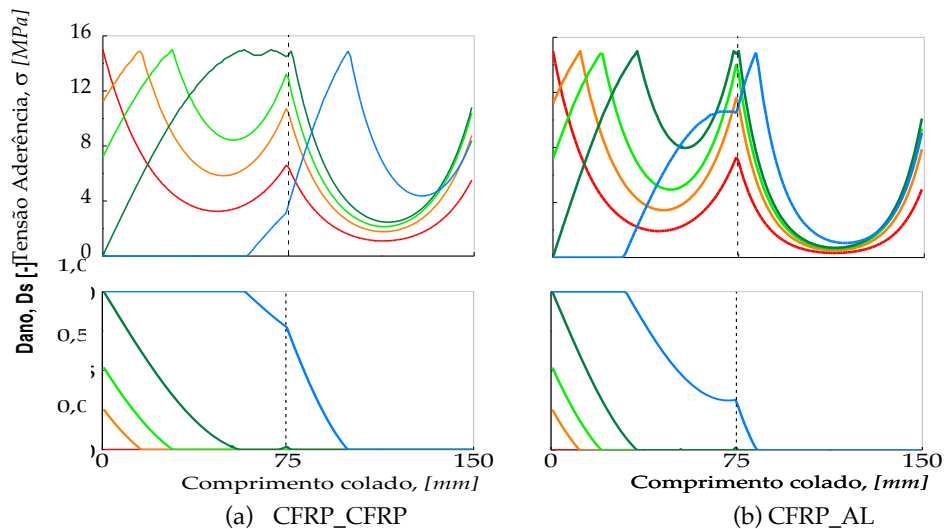
Por fim, para $R < 1$ à semelhança do que foi escrito no Subcapítulo 4.3, obtemos os raios de rigidez axial através do inverso dos raios utilizados. Deste modo, para o rácio 1,29 tem-se $R = \frac{1}{1,29} = 0,78$ e para o rácio 5,14 tem-se $R = \frac{1}{5,14} = 0,19$. Ao contrário do que se verifica na ligação $R > 1$, para estes raios o início do descolamento tem lugar no lado esquerdo em vez do lado direito. No entanto, os processos de descolamento da ligação LSS são os mesmos que os descritos anteriormente em $R > 1$, mas com o primeiro aparecimento das etapas A e D dentro da interface no lado esquerdo da ligação.

4.4.2 Ligação em Degrau Duplo

Dependendo da sequência de rigidez axial que define a configuração da ligação LDD, a interface mostrará diferentes distribuições de tensão da união até à falha que serão analisadas em seguida. Deste modo, esta secção apresenta a distribuição da tensão interfacial que as diferentes ligações de degrau duplo têm até ao descolamento com três possíveis casos: (a) com $R=1$ e $R<1$, (b) com $R>1$ e $R<1$ e (c) com $R>1$ e $R=1$.

Para o caso (a) escolheu-se a ligação representada na Figura 4.12. A partir das distribuições de tensão interfacial verifica-se que os modelos da série CFRP_CFRP (Figura 4.12a)) desenvolvem uma fase de amolecimento (A) no lado direito da ligação enquanto os modelos da série CFRP_AL este amolecimento é pouco expressivo tendo a fase elástica (E) e maior relevância neste mesmo lado.

Neste cenário, os processos de descolamento da ligação têm etapas distintas. Para a ligação CFRP_CFRP a sequência é a seguinte: (a) E-U-E/E/E-U-E; (b) E/E (ou para simplificar, E); (c) A-E/E; (d) D-A-E/E; (e) D-A/E; (f) D-A/A-E; (g) D/D-A-E; (h) D/D-A-A; (i) D/A; e (j) D/D (ou D). Por outro lado, na ligação CFRP_AL é definida por: (a) E-P-E/E/E-P-P-E; (b) E/E (ou apenas E); (c) A-E/E; (d) A-E/E-A; (e) D-A-E/E-A; (f) D-A/A/A-E-A; (g) D/A-E-A; (h) D/A; e (i) D/D (ou apenas D).



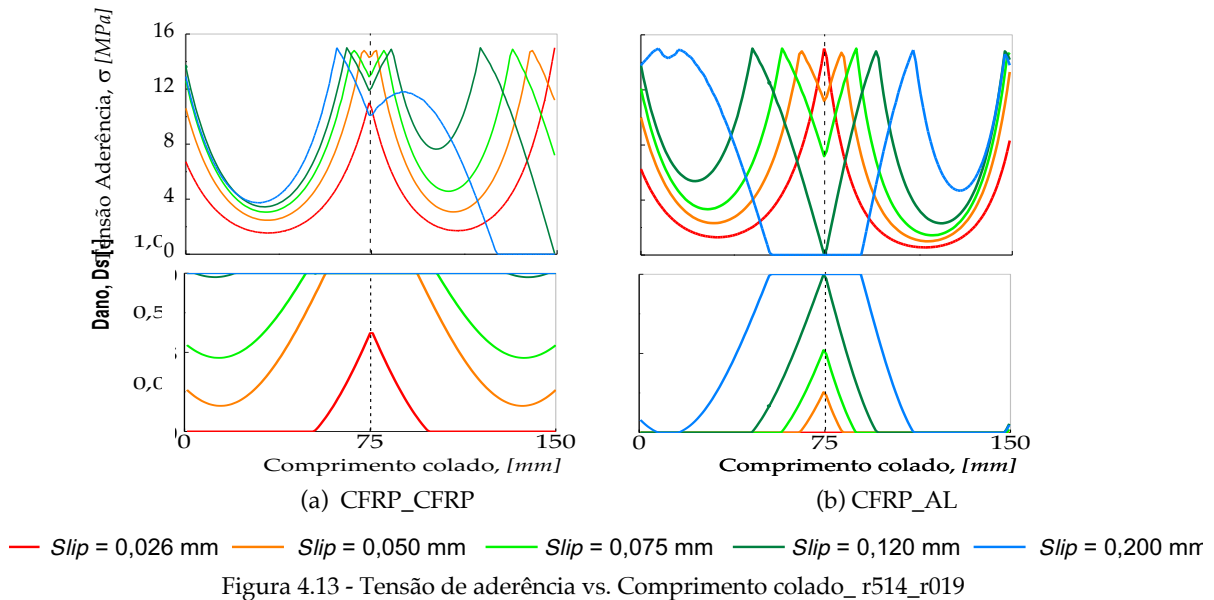
— Slip = 0,026 mm — Slip = 0,050 mm — Slip = 0,075 mm — Slip = 0,120 mm — Slip = 0,200 mm

Figura 4.12 - Tensão de aderência vs. Comprimento colado_r100_r019

Como verificado na ligação LSS, para um $R<1$ a ligação começa a fase de descolamento do lado esquerdo para o lado direito. Outra particularidade destas ligações, LDD, são as maiores áreas sob as distribuições de tensão no lado esquerdo da ligação. Ao contrário das LSS com R

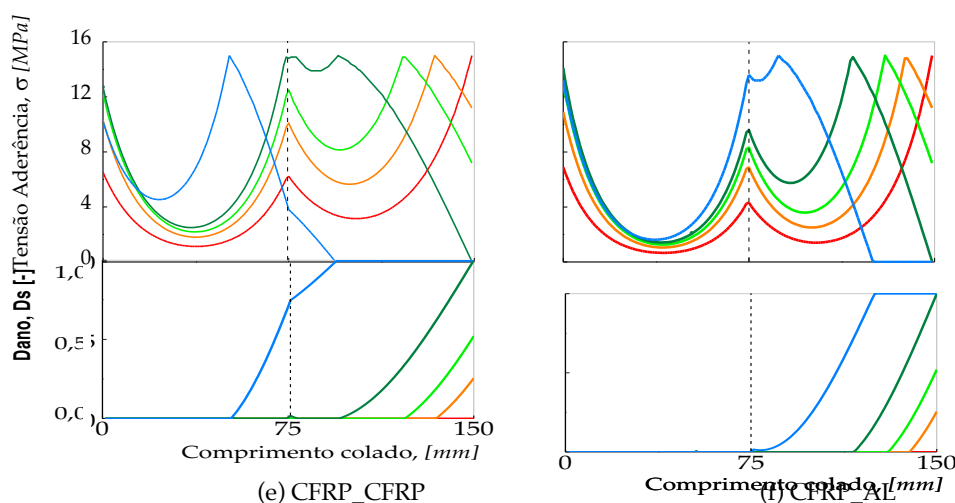
= 1 onde as interfaces desenvolveram as maiores áreas de tensão de ligação, o lado esquerdo destas LDD parece agora contribuir muito para a capacidade de resistência das ligações.

Para o caso (b), selecionou-se os rácios $R=5,14$ e $R=0,19$ e os resultados obtidos encontram-se ilustrados na Figura 4.13.



Nesta situação, os resultados sugerem que o início do descolamento dos aderentes tem uma configuração simétrica em relação ao centro da ligação. Ou seja, com este conjunto de rácios, o processo de descolamento inicia-se na transição do lado esquerdo da ligação para o lado direito. Considerando os resultados observados na Figura 4.13 a) e Figura 4.13 b), o processo de descolamento segue a seguinte sequência até ao descolamento completo (a) E-U-E/E-U-E; (b) E/E (ou apenas E); (c) E-A/A-E; (d) A-E-A/A-E-A; (e) A-E-A-D/D-A-E-A; (f) A-D/D-A e (g) D/D (ou apenas D).

Por fim, no caso (c) escolheu-se os rácios $R=5,14$ e $R=1,00$. Como constatado anteriormente, uma vez que $5,14 = \frac{1}{0,19}$, tem-se que a sequência de descolamento segue a direção oposta aquela observada no conjunto $R=0,19$ e $R=1,00$ como demonstrado pelos resultados ilustrados na Figura 4.14. Adicionalmente, a capacidade de carga das ligações CFRP_CFRP devem ser as mesmas observadas no caso (a). O mesmo deve ocorrer para os modelos CFRP_AI.



— $Slip = 0,026$ mm — $Slip = 0,050$ mm — $Slip = 0,075$ mm — $Slip = 0,120$ mm — $Slip = 0,200$ mm

Figura 4.14 - Tensão de aderência vs. Comprimento colado_r514_r100

4.4.3 Ligação em Degrau Triplo

 semelhança do que sucedeu nas ligações anteriores, novamente três casos foram escolhidos para estudar o início do descolamento da ligação em Degrau Triplo: (a) $R=1,29$, $R=1$ e $R=0,78$; (b) $R=5,14$, $R=1$ e $R=0,19$ e (c) $R=5,14$, $R=1,29$ e $R=1$.

Para o primeiro caso, (a) tem-se dois processos distintos com base no tipo de aderente. Para a ligação CFRP_CFRP observa-se que o início do descolamento começa do lado esquerdo para o lado direito. O processo de descolamento segue a seguinte sequência até ao descolamento completo: (a) E-U-E/E-U-E/E-U-E; (b) E/E/E (ou apenas E); (c) A-E/E/E-A; (d) D-A-E/E/E-A-D; (e) D-A/A-E/E-A; (f) D/D-A/A-D; (g) D/D-A-D/D (h) D/D/D (ou apenas D). A ligação CFRP_AI segue a mesma sequência apenas até à fase (e) e (f) e o descolamento inicia do lado direito.

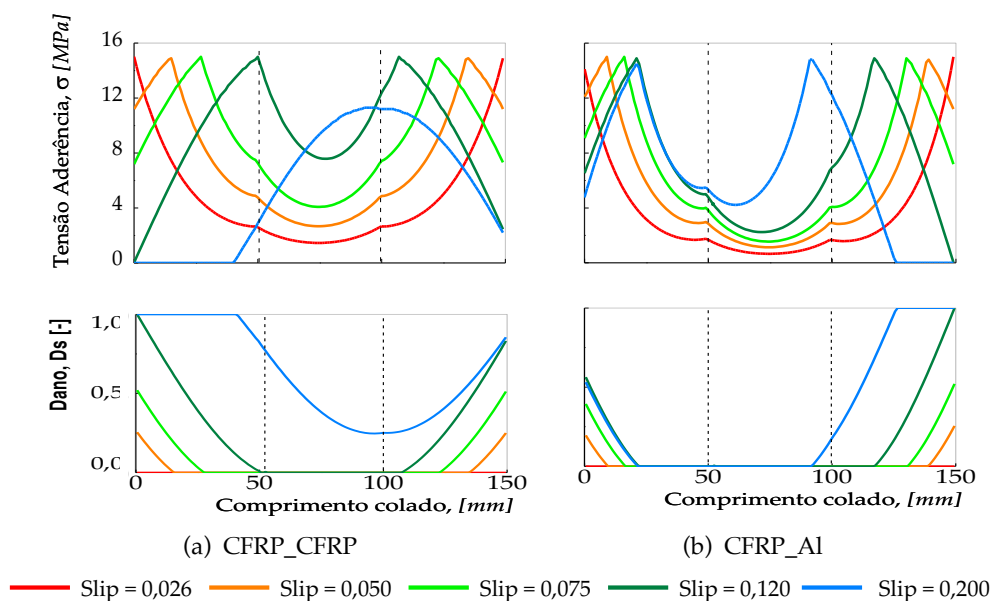


Figura 4.15 - Tensão de aderência e Dano vs. Comprimento colado_r129_r100_r078

No caso (b), o processo de descolamento é idêntico ao observado na ligação LDD com o conjunto de raios de rigidez axial $R=5,14$ e $R=0,19$, isto é, o início do descolamento dá-se na transição entre os coeficientes de rigidez axial. Pela Figura 4.16, verifica-se que até ao ponto A ($slip = 0,026$) a ligação encontra-se apenas no regime elástico. A partir do ponto B começa a existir a acumulação de dano, sendo este mais expressivo nas extremidades da ligação e na transição dos degraus da ligação, ou seja, para um comprimento de ligação igual a 50mm e 100mm.

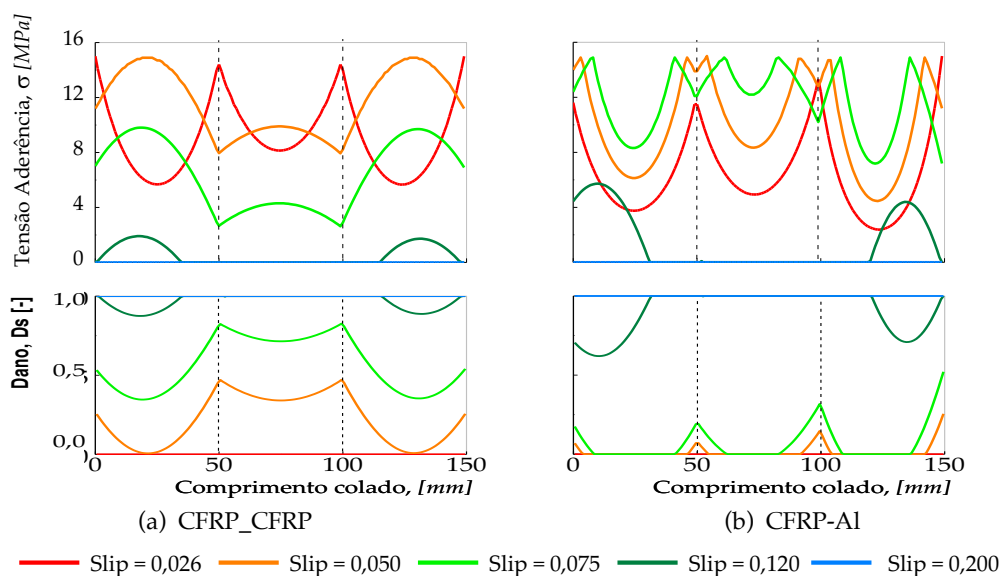


Figura 4.16 - Tensão de aderência e Dano vs. Comprimento colado_r514_r100_r019

Tabela 4.2 - Identificação do início do descolamento dos aderentes nas diferentes ligações

Ligação	Material	Rácio de rigidez axial	Tamanho da Ligação [mm]	Início da descolagem
LSS	CFRP_CFRP	1,00	50	Lado esquerdo e direito
			150	Lado esquerdo e direito
		1,29	50	Lado esquerdo e direito
			150	Lado direito
		5,14	50	Lado direito
			150	Lado direito
	CFRP_AL	1,00	50	Lado esquerdo e direito
			150	Lado esquerdo e direito
		1,29	50	Lado direito
			150	Lado direito
		5,14	50	Lado direito
			150	Lado direito
LDD	CFRP_CFRP	1,00 e 0,19	150	Lado esquerdo
		5,14 e 0,19		Entre degraus
		5,14 e 1,00		Lado direito
	CFRP_AL	1,00 e 0,19	150	Lado esquerdo
		5,14 e 0,19		Entre degraus
		5,14 e 1,00		Lado direito
LDT	CFRP_CFRP	1,29 e 1,00 e 0,78	150	Lado esquerdo
		5,14 e 1,00 e 0,19		Entre degraus
		5,14 e 1,29 e 1,00		Lado direito
	CFRP_AL	1,29 e 1,00 e 0,78	150	Lado direito
		5,14 e 1,00 e 0,19		Entre degraus
		5,14 e 1,29 e 1,00		Lado direito

CONCLUSÕES E TRABALHO DE FUTURO

Neste último Capítulo serão apresentadas e sintetizadas as conclusões que se podem retirar das modelações numéricas realizadas. Posteriormente, confirmam-se que os objetivos inicialmente traçados foram cumpridos.

A presente dissertação permitiu contribuir para o desenvolvimento do conhecimento sobre ligações coladas, mais concretamente, a influência de parâmetros como: tipo de ligação, material dos aderentes, tamanho de ligação e rácio de rigidez axial têm numa ligação colada híbrida. Este estudo incide na elaboração de uma modelação numérica, através do método de elementos discretos, que permite descrever o comportamento interfacial entre a interface de CFRP- Substrato.

5.1 Conclusões

A crescente utilização de ligações coladas é justificada pelas suas vantagens, quando comparado com os restantes processos de ligação mecânica, nomeadamente: capacidade de obter estruturas mais leves e rígidas; capacidade de unir materiais distintos; capacidade de unir eficientemente materiais de espessuras finas e melhor distribuição de tensões, uma vez que conseguem distribuir a carga aplicada sobre uma maior área.

Na ligação de sobreposição simples, o comprimento efetivo de ligação foi determinado e os resultados demonstraram que com o aumento do rácio de rigidez axial, para valores de $R \geq 1$, quer o comprimento efetivo, quer a força máxima de rotura diminuem. Adicionalmente, verificou-se que para o mesmo rácio de rigidez axial, $R=1$, a ligação de CFRP_CFRP apresenta um comprimento efetivo aproximadamente 60% superior à ligação CFRP-Alumínio e suporta uma força 25kN superior.

A resposta força interfacial *vs. slip* permitiu identificar nas três ligações, as 3 fases idênticas no comportamento das mesmas: fase linear, onde a força na interface aumenta proporcionalmente ao aumento do *slip*; fase não-linear onde o aumento não varia proporcionalmente ao *slip*; e a fase de planalto onde se dá o amolecimento da ligação até à rotura. Das três ligações observou-se que apresenta maior resistência na interface é a ligação CFRP_CFRP de degrau

triplo (LDT), sendo que a mesma ligação com aderentes CFRP_Al é a que sofre maior descolamento até à rotura.

Na ligação de sobreposição simples, verifica-se que a resistência da mesma varia consoante o rácio de rigidez axial entre os aderentes. Para um intervalo $R > 1$, a resistência da ligação aumento como aumento do valor de R. Para o intervalo $0 \leq R < 1$, verifica-se o inverso logo a resistência aumenta com o aumento de R. Deste modo, obtemos a capacidade máxima de ligação para $R=1$.

O início do processo de descolamento foi identificado através do estudo da distribuição de tensões ao longo do comprimento colado. Verificou-se que o descolamento se inicia na zona onde a capacidade de ligação é menor, ou seja, na zona onde são desenvolvidas tensões maiores. No caso da mesma quantidade de tensões ser desenvolvida em ambos os lados da ligação, então o descolamento inicia-se nos dois lados da ligação.

Observou-se ainda que a sequência de descolamento nas ligações estudadas pode ser alterada de um lado para o outro invertendo os rácios de rigidez axial. Por exemplo, a sequência de descolamento nas ligações degrau duplo, com $R=1,00$ e $R=0,19$ é igual, mas invertida da ligação com $R=5,14$ e $R=1,00$.

5.2 Desenvolvimentos para trabalho futuro

Em seguida, como sugestão para trabalhos complementares a este estudo, apresentam-se as seguintes propostas:

- Uma vez que o MED envolve algum esforço computacional na modelação dos modelos, o número de modelações a realizar na presente dissertação teve de ser tido em conta. Por este motivo, estudos que envolvam outros materiais como aderentes, outros tipos de ligação ou ainda as variações de outros parâmetros podem ser futuramente estudadas.
- Cálculo do comprimento efetivo nas restantes ligações e comparação com os resultados obtidos na ligação de sobreposição simples.
- Análise do comportamento cíclico nas ligações selecionadas e comparação do comportamento das ligações face a carga monotónica.
- Comparação dos resultados obtidos pelo modelo de elementos discretos com aqueles obtidos através de ensaios experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. F. M. da Silva and R. D. S. G. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*, no. 9783642236075. 2012. doi: 10.1007/978-3-642-23608-2_1.
- [2] A. Pramanik *et al.*, "Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys – A review," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 101, pp. 1–29, 2017, doi: 10.1016/j.compositesa.2017.06.007.
- [3] G. Wypych, "Introduction," *Handbook of Adhesion Promoters*, pp. 1–3, 2018, doi: 10.1016/b978-1-927885-29-1.50003-1.
- [4] Davaun Sanders, "Materials Used in Ancient Egyptian Coffins," 2017. <https://classroom.synonym.com/sarcophagi-ancient-egypt-9094.html>
- [5] G. L. De Lima, R. F. De Freitas, and T. C. Massaro, "Vulcanização da borracha natural com enxofre," pp. 1–12, 2000.
- [6] A. Fortineau, "Products of Chemistry," *Most*, vol. 81, no. 1, pp. 45–50, 2004.
- [7] E. M. Petrie, "An Introduction to Adhesive and Sealants," *Handbook of Adhesives and Sealants*, p. 896, 2007.
- [8] Institution of Structural Engineers (ISE), "A guide to the structural use of adhesives," no. January, p. 51, 1999.
- [9] G. D. Davis, *Surface treatments of selected materials*, vol. 1–2. 2018. doi: 10.1007/978-3-319-55411-2_8.
- [10] L. F. M. da Silva and R. D. Adams, "Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites," *Int J Adhes Adhes*, vol. 27, no. 3, pp. 227–235, 2007, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2006.04.001.
- [11] L. F. M. da Silva and R. D. Adams, "Joint strength predictions for adhesive joints to be used over a wide temperature range," *Int J Adhes Adhes*, vol. 27, no. 5, pp. 362–379, 2007, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2006.09.007.
- [12] M. J. Troughton, "Chapter 17 – Adhesive Bonding," *Handbook of Plastics Joining: a Practical Guide*, pp. 145–173, 2009, doi: 10.1016/B978-0-8155-1581-4.50019-6.
- [13] M. A. Omar, *The Automotive Body Manufacturing Systems and Processes*. 2011. doi: 10.1002/9781119990888.

- [14] M. G. Droubi, C. Fosbrooke, J. McConnachie, and N. H. Faisal, "Indentation based strength analysis of adhesively bonded leading-edge composite joints in wind turbine blades," *SN Appl Sci*, vol. 1, no. 7, 2019, doi: 10.1007/s42452-019-0735-6.
- [15] L. F. M. Silva, A. G. Magalhães, and M. F. S. F. Moura, "Ligações Adesivas Estruturais," vol. 1, 2007.
- [16] L. F. M. Silva, A. G. Magalhães, and M. F. S. F. Moura, "Ligações Adesivas Estruturais," vol. 1, 2007.
- [17] T. C. Silva and L. C. S. Nunes, "A new experimental approach for the estimation of bending moments in adhesively bonded single lap joints," *Int J Adhes Adhes*, vol. 54, pp. 13–20, 2014, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2014.04.006.
- [18] S. Ebnesajjad, Ed., "Chapter 7 - Joint Design," in *Adhesives Technology Handbook (Second Edition)*, Norwich, NY: William Andrew Publishing, 2009, pp. 159–181. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1533-3.50010-4>.
- [19] H. C. Biscoia and C. Chastre, "Theoretical analysis of fracture in double overlap bonded joints with FRP composites and thin steel plates," *Eng Fract Mech*, vol. 190, pp. 435–460, 2018, doi: 10.1016/j.engfracmech.2017.12.038.
- [20] M. F. S. F. MOURA, A. G. MAGALHÃES, and L. F. M. DA SILVA, *Ligações Adesivas Estruturais*. Publindustria, 2007.
- [21] S. Ebnesajjad and A. H. Landrock, "Introduction and Adhesion Theories," *Adhesives Technology Handbook*, pp. 1–18, 2015, doi: 10.1016/b978-0-323-35595-7.00001-2.
- [22] M. J. Davis and A. McGregor, "Importance of Failure Mode Identification.pdf," *ISASI Australian Safety Seminar, Canberra*, pp. 1–12, 2010.
- [23] W. P. Limited, *Related titles :composite joints and connections*. 2011.
- [24] T. P. Characteristics, "Mašinski fakultet PART III : Testing adhesives and adhesively bonded joints".
- [25] Robert M. Jones, *Mechanics of Composite Materials*, 2nd Editio. Taylor & Francis, 1999.
- [26] A. Wood, *Strategies for sustainability: Africa*, vol. 9. 2013. doi: 10.4324/9781315066110.
- [27] Y. Zhou *et al.*, "Prediction of debonding strength of tensile hybrid bonded joints using fracture mechanics," *Mater Des*, vol. 61, pp. 87–100, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.068>.
- [28] A. Pramanik *et al.*, "Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys – A review," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 101, pp. 1–29, 2017, doi: 10.1016/j.compositesa.2017.06.007.
- [29] W. Mu, J. Na, W. Tan, G. Wang, H. Shen, and X. Li, "Durability of adhesively bonded CFRP-aluminum alloy joints subjected to coupled temperature and alternating load," *Int J Adhes Adhes*, vol. 99, no. October 2019, p. 102583, 2020, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102583.

- [30] H. Zhou, D. Fernando, J. L. Torero, J. P. Torres, C. Maluk, and R. Emberley, "Bond Behavior of CFRP-to-Steel Bonded Joints at Mild Temperatures: Experimental Study," *Journal of Composites for Construction*, vol. 24, no. 6, p. 04020070, 2020, doi: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0001073.
- [31] M. A. G. Silva, H. Biscaia, and P. Ribeiro, "On factors affecting CFRP-steel bonded joints," *Constr Build Mater*, vol. 226, pp. 360–375, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.220.
- [32] J. Huo, X. Zhang, J. Yang, and Y. Xiao, "Experimental study on dynamic behavior of CFRP-to-steel interface," *Structures*, vol. 20, no. January, pp. 465–475, 2019, doi: 10.1016/j.istruc.2019.05.007.
- [33] D. Tumino and B. Zuccarello, "Fatigue delamination experiments on GFRP and CFRP specimens under single and mixed fracture modes," *Procedia Eng*, vol. 10, pp. 1791–1796, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.298>.
- [34] H. M. Diab and O. A. Farghal, "Bond strength and effective bond length of FRP sheets/plates bonded to concrete considering the type of adhesive layer," *Compos B Eng*, vol. 58, pp. 618–624, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.075>.
- [35] A. Vahedian, R. Shrestha, and K. Crews, "Bond strength model for externally bonded FRP-to-timber interface," *Compos Struct*, vol. 200, pp. 328–339, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.152>.
- [36] M. D. Banea and L. F. M. da Silva, "Adhesively bonded joints in composite materials: An overview," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 223, no. 1, pp. 1–18, 2009, doi: 10.1243/14644207JMDA219.
- [37] S. de Barros, P. P. Kenedi, S. M. Ferreira, S. Budhe, A. J. Bernardino, and L. F. G. Souza, "Influence of mechanical surface treatment on fatigue life of bonded joints," *Journal of Adhesion*, vol. 93, no. 8, pp. 599–612, 2017, doi: 10.1080/00218464.2015.1122531.
- [38] G. W. Critchlow and D. M. Brewis, "Review of surface pretreatments for aluminium alloys."
- [39] T. Sinmazçelik, E. Avcu, M. Ö. Bora, and O. Çoban, "A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods," *Mater Des*, vol. 32, no. 7, pp. 3671–3685, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2011.03.011.
- [40] S. de Barros, P. P. Kenedi, S. M. Ferreira, S. Budhe, A. J. Bernardino, and L. F. G. Souza, "Influence of mechanical surface treatment on fatigue life of bonded joints," *Journal of Adhesion*, vol. 93, no. 8, pp. 599–612, 2017, doi: 10.1080/00218464.2015.1122531.
- [41] Y. Zhang, A. P. Vassilopoulos, and T. Keller, "Environmental effects on fatigue behavior of adhesively-bonded pultruded structural joints," *Compos Sci Technol*, vol. 69, no. 7–8, pp. 1022–1028, 2009, doi: 10.1016/j.compscitech.2009.01.024.

- [42] W. Mu, J. Na, W. Tan, G. Wang, H. Shen, and X. Li, "Durability of adhesively bonded CFRP-aluminum alloy joints subjected to coupled temperature and alternating load," *Int J Adhes Adhes*, vol. 99, no. October 2019, p. 102583, 2020, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102583.
- [43] Y. Zhang, A. P. Vassilopoulos, and T. Keller, "Environmental effects on fatigue behavior of adhesively-bonded pultruded structural joints," *Compos Sci Technol*, vol. 69, no. 7–8, pp. 1022–1028, 2009, doi: 10.1016/j.compscitech.2009.01.024.
- [44] W. W. Wright, "The effect of diffusion of water into epoxy resins and their carbon-fibre reinforced composites," *Composites*, vol. 12, no. 3, pp. 201–205, 1981, doi: 10.1016/0010-4361(81)90505-X.
- [45] H. Zhou, D. Fernando, J. L. Torero, J. P. Torres, C. Maluk, and R. Emberley, "Bond behavior of CFRP-to-steel bonded joints at mild temperatures: an experimental," *Journal of Composites for Construction*, vol. 24, no. 6, p. 35, 2020.
- [46] T. Keller and T. Vallée, "Adhesively bonded lap joints from pultruded GFRP profiles. Part I: Stress-strain analysis and failure modes," *Compos B Eng*, vol. 36, no. 4, pp. 331–340, 2005, doi: 10.1016/j.compositesb.2004.11.001.
- [47] T. Keller and T. Vallée, "Adhesively bonded lap joints from pultruded GFRP profiles. Part II: Joint strength prediction," *Compos B Eng*, vol. 36, no. 4, pp. 341–350, 2005, doi: 10.1016/j.compositesb.2004.11.002.
- [48] M. A. G. Silva, H. Biscaia, and P. Ribeiro, "On factors affecting CFRP-steel bonded joints," *Constr Build Mater*, vol. 226, pp. 360–375, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.220.
- [49] M. D. Banea, L. F. M. da Silva, and R. D. S. G. Campilho, "The effect of adhesive thickness on the mechanical behavior of a structural polyurethane adhesive," *Journal of Adhesion*, vol. 91, no. 5, pp. 331–346, 2014, doi: 10.1080/00218464.2014.903802.
- [50] Huntsman Corporation ©, "Users Guide to Adhesives," *Methods*, pp. 1–16, 2007.
- [51] M. D. Banea, L. F. M. Da Silva, and R. D. S. G. Campilho, "The effect of adhesive thickness on the mechanical behavior of a structural polyurethane adhesive," *Journal of Adhesion*, vol. 91, no. 5, pp. 331–346, 2014, doi: 10.1080/00218464.2014.903802.
- [52] M. Goland and E. Reissner, "The Stresses in Cemented Joints," *J Appl Mech*, vol. 11, no. 1, pp. A17–A27, Mar. 2021, doi: 10.1115/1.4009336.
- [53] R. D. Adams and n. a. Peppiatt, "Stress analysis of adhesive-bonded lap joints," *J Strain Anal Eng Des*, vol. 9, no. 3, pp. 185–196, 1974, doi: 10.1243/03093247V093185.
- [54] T. Carlberger and U. Stigh, "Influence of Layer Thickness on Cohesive Properties of an Epoxy-Based Adhesive—An Experimental Study," *J Adhes*, vol. 86, no. 8, pp. 816–835, Aug. 2010, doi: 10.1080/00218464.2010.498718.

- [55] Volkersen O, *Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. 1938.
- [56] A. Turon, C. G. Dávila, P. P. Camanho, and J. Costa, "An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models," *Eng Fract Mech*, vol. 74, no. 10, pp. 1665–1682, 2007, doi: 10.1016/j.engfracmech.2006.08.025.
- [57] A. Cundall, *Proceeding of the Symponium of the International Society of Rock Mechanics*, Volume 1. Nancy, France, 1971.
- [58] H. C. Biscaia, R. Micaelo, and C. Chastre, "Cyclic performance of adhesively bonded joints using the Distinct Element Method: Damage and parametric analysis," *Compos B Eng*, vol. 178, p. 107468, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107468>.
- [59] N. M. Azevedo and F. Gouveia, "Um modelo discreto de partículas 2D para simulação da fratura em rocha: formulação e calibração," *Geotecnia*, no. 129, pp. 73–101, 2013.
- [60] M. D. Banea and L. F. M. Da Silva, "Adhesively bonded joints in composite materials: An overview," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 223, no. 1, pp. 1–18, 2009, doi: 10.1243/14644207JMDA219.
- [61] T. L. Anderson, *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. CRC Press, 1995.
- [62] Edison da Rosa, *Análise de Resistência Mecânica*. Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Mecânica.
- [63] C. Tuakta and O. Büyüköztürk, "Deterioration of FRP / concrete bond system under variable moisture conditions quantified by fracture mechanics," *Compos B Eng*, vol. 42, no. 2, pp. 145–154, 2011, doi: 10.1016/j.compositesb.2010.11.002.
- [64] J. Auersperg, R. Dudek, S. Rzepka, and B. Michel, "Advantage and current limitations of advanced fracture mechanics for 3d-integration and beol under CPI aspects," *Proceedings of the 2013 IEEE 15th Electronics Packaging Technology Conference, EPTC 2013*, pp. 455–460, 2013, doi: 10.1109/EPTC.2013.6745762.
- [65] Y. S. Upadhyaya and B. K. Sridhara, "Fatigue life prediction: A Continuum Damage Mechanics and Fracture Mechanics approach," *Mater Des*, vol. 35, pp. 220–224, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.09.049.
- [66] K. Duan, X. Hu, and Y. W. Mai, "Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints," *J Adhes Sci Technol*, vol. 18, no. 1, pp. 39–53, 2004, doi: 10.1163/156856104322746992.
- [67] C. D. M. Liljedahl, A. D. Crocombe, M. A. Wahab, and I. A. Ashcroft, "Damage modelling of adhesively bonded joints," *Int J Fract*, vol. 141, no. 1–2, pp. 147–161, 2006, doi: 10.1007/s10704-006-0072-9.

- [68] G. I. Barenblatt, "The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks," *Journal of applied mathematics and mechanics*, vol. 23, no. 3, pp. 622–636, 1959.
- [69] H. C. Biscaia, C. Chastre, and M. A. G. Silva, "Linear and nonlinear analysis of bond-slip models for interfaces between FRP composites and concrete," *Compos B Eng*, vol. 45, no. 1, pp. 1554–1568, 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.08.011.
- [70] A. Association, *Aluminum: properties and physical metallurgy*. ASM international, 1984.
- [71] X. Yun, W. Zhongxing, and L. Gardner, "Full-Range Stress–Strain Curves for Aluminum Alloys," *Journal of Structural Engineering*, vol. 147, p. 04021060, Mar. 2021, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002999.
- [72] U. Neubauer and F. S. Rostásy, "Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP-plates," *Proceedings of the 7th international conference on structural faults and repairs*, vol. 2, pp. 109–18, 1997.



<2021>

IOÃO BORDA

Perspetiva Teórica de Diferentes Tipos de Ligações Coladas Sujeitas a Ações Monotónicas