



CALVIN EMANUEL TOMBUL VAZ

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Estudo analítico sobre o desempenho de
compósitos de FRP exteriormente colados a um
substrato com amarração

Estudo analítico sobre o desempenho de compósitos de FRP exteriormente colados a um substrato com amarração

CALVIN EMANUEL TOMBUL VAZ

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Orientador: Hugo Emanuel Charrinho da Costa Biscaia
Professor Auxiliar, FCT-NOVA, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Rui Fernando dos Santos Pereira Martins
Professor Associado, FCT-NOVA, Universidade NOVA de Lisboa

Arguente: Pedro Samuel Gonçalves Coelho
Professor Associado, FCT-NOVA, Universidade NOVA de Lisboa

Vogal: Hugo Emanuel Charrinho da Costa Biscaia
Professor Auxiliar, FCT-NOVA, Universidade NOVA de Lisboa

Copyright Calvin Emanuel Tombul Vaz, FCT/UNL e UNL

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

Agradeço ao professor Hugo Biscaia por toda a ajuda que me deu ao longo desta dissertação e por me motivar a realizar este trabalho.
Agradeço também aos professores do DEMI pela formação académica transmitida ao longo do curso.

RESUMO

A possibilidade de futuramente se incluírem várias expressões em regulamentos ou recomendações de dimensionamento de ligações coladas entre dois materiais estruturais requer que se desenvolvam estudos mais teóricos que permitam perceber e dimensionar vários tipos de ligações coladas. Atualmente ainda existe falta de conhecimento quando se consideram algumas situações mais específicas e nas quais se usam amarrações adicionais para realizar ligações entre compósitos de FRP e um outro elemento estrutural qualquer.

O presente trabalho centra-se no desenvolvimento de formulações algébricas que permitam analisar o desempenho de ligações coladas entre dois materiais com comportamento constitutivo essencialmente elástico. Foram obtidas as expressões analíticas do deslizamento, da extensão e da tensão de aderência. Estas expressões permitem prever o processo de descolamento da interface FRP/substrato. Posteriormente, foram analisados e interpretados os resultados das amostras em que o comprimento colado é superior ao efetivo, ou seja, em que o comprimento colado é de 250 mm e de amostras em que o comprimento colado é inferior ao efetivo, ou seja, em que o comprimento colado é de 50 mm.

Com vista a validar o modelo analítico proposto, este foi comparado com os modelos experimentais, analíticos e numéricos disponíveis na literatura.

Palavras-chave: Compósitos FRP, Aderência, Análise analítica, Análise não-linear

ABSTRACT

The possibility of including various expressions in regulations or recommendations for the design of bonded joints between two structural materials in the future requires that more theoretical studies be developed to understand and design various types of bonded joints. There is currently still a lack of knowledge when considering some more specific situations in which additional ties are used to create joints between FRP composites and any other structural element.

This work focuses on the development of algebraic formulations that allow the analysis of the performance of bonded joints between two materials with essentially elastic constitutive behavior. Analytical expressions for slip, extension and bond stress were obtained. These expressions allow the prediction of the debonding process of the FRP/substrate interface. Subsequently, the results of the samples in which the bonded length is greater than the effective length, i.e., in which the bonded length is 250 mm, and of samples in which the bonded length is less than the effective length, i.e., in which the bonded length is 50 mm, were analyzed and interpreted.

In order to validate the proposed analytical model, it was compared with the experimental, analytical and numerical models available in the literature.

Keywords: FRP Composites, Bond, Analytical analysis, Non-linear analysis

ÍNDICE

Índice de figuras	xiii
Simbologia	xv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento e motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da dissertação	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Constituição dos compósitos FRP.....	5
2.1.1 Matriz.....	5
2.1.2 Reforço sob a forma de fibras	6
2.1.3 Fillers	7
2.1.4 Aditivos.....	7
2.1.5 Interface fibra-matriz	7
2.2 Campo de aplicação dos compósitos FRP	8
2.3 Ligações coladas	9
2.4 Leis de aderência.....	10
2.5 Ancoragem mecânica.....	11
2.6 Equações governativas da ligação FRP/substrato [17]	12
2.7 Lei de aderência exponencial [17]	14
2.8 Corte simples sem ancoragem mecânica.....	15
2.9 Corte simples com ancoragem mecânica perfeita.....	17
2.10 Descrição do processo de descolamento dos estágios da interface com amarração	19
3 MODELO ANALÍTICO PROPOSTO	21
3.1 Introdução	21
3.2 Desenvolvimento do modelo analítico.....	21

3.3	Força máxima transmitida ao compósito FRP sem amarração.....	24
3.4	Curva força-deslizamento	25
4	VALIDAÇÃO DO MODELO ANALÍTICO PROPOSTO	27
4.1	Lei de aderência	27
4.2	Comprimento efetivo de ligação	28
4.3	Amostras com comprimento colado de 250 mm	28
4.4	Amostras com comprimento colado de 50 mm	32
4.5	Comparação com outros estudos	34
4.5.1	Comparação com o modelo analítico proposto por Ueda e Dai.....	34
4.5.2	Comparação com Biscaia et al	36
4.5.3	Comparação com Lu et al	37
5	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	43
5.1	Conclusões	43
5.2	Futuros desenvolvimentos.....	43
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Sistema de reforço FRP [5].....	1
Figura 2.1 – Comportamento tensão-extensão (σ - ϵ) das fibras, resina e matriz, adaptado de [10].	6
Figura 2.2 – Classificação de compósitos baseados na forma da fase de reforço, adaptado de [1].....	6
Figura 2.3 – Exemplos das principais aplicações de materiais FRP: a) armaduras interiores do tabuleiro de uma ponte; b) reforço de uma laje maciça vigada; c) reabilitação de uma ponte através de painéis pultrudidos; d) estrutura híbrida (Ponte de Friedberg, Alemanha (adaptado de [1])).....	8
Figura 2.4 – Modos de rotura em ligações compósito-metal, adaptado de [13].....	10
Figura 2.5 – Modelos da lei de aderência [31].	11
Figura 2.6 – Esquema de um teste de corte simples livre de quaisquer dispositivos mecânicos de ancoragem [17].	12
Figura 2.7 – A distribuição da tensão de corte interfacial no processo de descolamento e processo de ativação da camisa em U: (a) Estágio elástico; (b) Início da etapa de amolecimento; (c) Estágio de amolecimento elástico; (d) Início da descolagem em $x=L$; (e) Estágio de descolamento elástico-amolecimento; (f) Pico de cisalhamento em $x = 0$; (g) Etapa de amolecimento-descolamento; (h) Estágio de descolamento completo [15].....	20
Figura 4.1 – Curva analítica da tensão vs. deslizamento em $x= L_b$	27
Figura 4.2 – Curva analítica da força transmitida no compósito em $x= L_b$ vs. deslizamento em $x= L_b$	29
Figura 4.3 – Gráfico da força transmitida à mola em $x= 0$ vs. deslizamento em $x= L_b$	29
Figura 4.4 – Gráfico da tensão normal no compósito vs. extensão	29
Figura 4.5 – Distribuição de deslizamentos ao longo do comprimento colado de 250 mm.....	30
Figura 4.6 – Distribuição de extensões no compósito ao longo do comprimento colado de 250 mm.....	31
Figura 4.7 – Distribuição de extensões no substrato ao longo do comprimento colado de 250 mm.....	31
Figura 4.8 – Distribuição de tensões de aderência ao longo do comprimento colado de 250 mm	31
Figura 4.9 – Curva analítica da força transmitida no compósito em $x= L_b$ vs. deslizamento em $x= L_b$	32
Figura 4.10 – Distribuição de deslizamentos ao longo do comprimento colado de 50 mm.....	33
Figura 4.11 – Distribuição de extensões no compósito ao longo do comprimento colado de 50 mm.....	33
Figura 4.12 – Distribuição de extensões no substrato ao longo do comprimento colado de 50 mm.....	33
Figura 4.13 – Distribuição de tensões de aderência ao longo do comprimento colado de 50 mm	34
Figura 4.14 – Curva força vs. deslizamento para um comprimento colado de 250 mm	35
Figura 4.15 – Curva força vs. deslizamento para um comprimento colado de 50 mm	35
Figura 4.16 – Comparação do modelo analítico proposto com o modelo numérico de Biscaia et al [22]	36

Figura 4.17 – Comparação com o trabalho de Lu et al [26]: a) relação entre as leis bond-slip, b) relação entre as curvas força-deslizamento	37
Figura 4.18 – Comparação com as tensões axiais desenvolvidas ao longo do comprimento colado: a) $F = 10,54$ kN; b) $F = 21,84$ kN; c) $F = 29,01$ kN; d) $F = 35,90$ kN	38
Figura 4.19 – Comparação com as tensões de aderência desenvolvidas ao longo do comprimento colado: a) $F = 10,54$ kN; b) $F = 21,84$ kN; c) $F = 29,01$ kN; d) $F = 35,90$ kN.....	39
Figura 4.20 – Efeito da rigidez da ancoragem final (k): (a) comparação com as curvas força-deslizamento e (b) comparação com a força limite	40
Figura 4.21 – Efeito do comprimento colado das juntas coladas mecanicamente ancoradas com diferentes comprimentos colados de 200 mm, 300 mm, 400 mm e 500 mm.	41
Figura 4.22 – Efeito da rigidez do reforço.....	42

SIMBOLOGIA

Notações escalares latinas

A	-	Extensão máxima
B	-	Índice de rigidez
b_p	-	Largura do laminado de FRP
b_s	-	Largura do bloco de aço
E_p	-	Módulo de elasticidade do FRP
E_s	-	Módulo de elasticidade do aço
F	-	Força aplicada ao sistema de reforço,
F_{max}	-	Força máxima
G_f	-	Energia de fratura
L_b	-	Comprimento ligado
L_{eff}	-	Comprimento de ligação efetivo
s_{max}	-	Deslizamento máximo
s_{ult}	-	Deslizamento último
t_p	-	Espessura do FRP
t_s	-	Espessura do substrato
u_p	-	Deslocamento do FRP
u_s	-	Deslocamento do substrato

Notações escalares gregas

β_L	-	Fator de redução
τ_{max}	-	Tensão de aderência máxima
σ_p	-	Tensões no FRP
σ_s	-	Tensões no substrato

Abreviaturas

- FRP** - *Fiber Reinforced Polymer*
- CFRP** - *Carbon Fiber Reinforced Polymer*
- EBR** - *Externally Bounded Reinforcement*
- NSM** - *Near Surface Mounted*

Neste capítulo inicial apresenta-se uma contextualização da situação em estudo e os principais motivos que conduziram a esta investigação. Estabelecem-se os objetivos principais que orientam o presente trabalho.

1.1 Enquadramento e motivação

Os materiais compósitos são materiais formados pela união de outros materiais com o objetivo de se obter um produto de melhor qualidade. Apesar de terem tido início da década de 1960, os compósitos FRP (*Fiber Reinforced Polymer* conforme a literatura internacional) só começaram a ser utilizados mais frequentemente no final da década de 1980 e no início da década de 1990, com a redução do custo dos materiais FRP e com o melhor conhecimento das suas propriedades [1,2]. Em consequência, verifica-se que estes materiais começaram a ser introduzidos em diversos projetos de engenharia que passam pela indústria automóvel, civil ou aeroespacial.

Os compósitos FRP são feitos de uma matriz polimérica reforçada com fibras, sendo as fibras de vidro, carbono, aramida ou basalto enquanto o polímero é geralmente plástico termoendurecível epóxi, éster vinílico ou poliéster. As referidas fibras possuem propriedades mecânicas superiores à matriz, e estas são responsáveis pela rigidez e resistência do compósito. Já a matriz tem como principal função garantir a transmissão de tensões entre as fibras do compósito [3].

As aplicações dos compósitos FRP podem ser encontradas atualmente no reforço de vigas, pilares e lajes de edifícios e pontes [4].

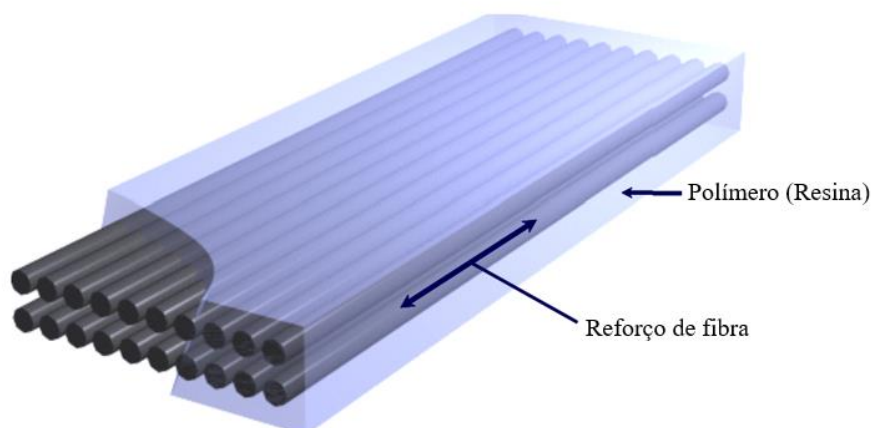


Figura 1.1 - Representação de material FRP [5]

Com o uso crescente dos FRP, verifica-se que a ligação por adesivos tem vindo a ser mais utilizada do que a ligação mecânica. Numa ligação adesiva, é expectável que a capacidade de suportar cargas estáticas ou cíclicas durante determinados períodos, sem qualquer efeito adverso sobre a capacidade de carga da estrutura seja superior [6]. Por sua vez, as ligações coladas permitem unir materiais distintos, sem alterar em demasia o peso da estrutura e mantendo a sua integridade estrutural. Consequentemente, a combinação das propriedades de compósitos FRP com a ligação por adesivos, torna-se bastante importante para o reforço de estruturas.

Outras características relevantes dos compósitos FRP são o aumento mínimo do peso estrutural, a fácil instalação e a alta resistência/rigidez em relação ao peso. Além disso, não há concentrações de tensão a serem produzidas por meio de soldadura ou perfuração de elementos estruturais [7]. Isto possibilitou o desenvolvimento de estruturas mais leves como, por exemplo, foguetes e aeronaves de geometria mais complexa.

As desvantagens da utilização de FRP como reforço de estruturas metálicas são os modos de rotura e o custo do material de FRP. Assim, o trabalho de investigação torna-se bastante importante para estes aspetos [7].

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento de formulações algébricas que permitam analisar o desempenho de ligações coladas entre dois materiais com comportamento constitutivo essencialmente elástico. Em particular, procura-se modelar situações em que se utiliza uma amarração adicional recorrendo, para isso, a uma mola (de comportamento linear ou não linear) como simplificação dessa amarração adicional.

Os objetivos do presente estudo podem agrupar-se da seguinte forma:

- Pesquisa bibliográfica sobre os vários tipos de amarração utilizada e a sua influência no desempenho de ligações entre um compósito de FRP e um material estrutural;
- Identificar formulações já existentes e evidenciar as novidades que o presente trabalho poderá trazer quando comparado com os trabalhos já existentes na literatura;
- Desenvolver uma formulação algébrica que permita analisar o desempenho de ligações FRP/substrato com amarração adicional;
- Analisar e interpretar os resultados;
- Com vista a validar o modelo, comparar com dados experimentais existentes na literatura.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos, incluindo a introdução e a conclusão.

No primeiro capítulo, é apresentado o enquadramento e os objetivos do desenvolvimento deste estudo.

No segundo capítulo, é apresentado o estado de arte, onde se introduz os compósitos FRP (matriz, reforço sob a forma de fibras, fillers, aditivos e interface fibra-matriz), o seu campo de aplicação, as ligações coladas, as leis de aderência e a ancoragem mecânica. São também identificadas formulações já existentes e evidenciadas as novidades que o presente trabalho poderá trazer quando comparado com os trabalhos já existentes na literatura

No terceiro capítulo é desenvolvida uma formulação algébrica que permita analisar o desempenho de ligações FRP/substrato com amarração adicional.

No quarto capítulo, é realizada a análise e a comparação de resultados. Além disso, com vista a validar o modelo, são comparados com dados experimentais existentes na literatura.

No quinto capítulo, resumem-se as principais conclusões da presente dissertação e são apresentadas recomendações para futuros trabalhos.

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Constituição dos FRP

Nos FRP, as propriedades físico-químicas dos polímeros são combinadas com as propriedades mecânicas das fibras de reforço. São também usados fillers ou agentes desmoldantes com o objetivo de melhorar as suas propriedades [8].

2.1.1 Matriz

A matriz permite a transferência e distribuição das tensões entre fibras assim como a manutenção da sua posição no seio da matriz, possuindo também um papel de proteção destas face aos agentes de degradação ambiental.

Segundo Cabral-Fonseca [1], as funções gerais da matriz são:

- Garantir a posição e orientação das fibras;
- Dividir pelas fibras as tensões resultantes das cargas externas aplicadas;
- Absorver a energia e diminuir a concentração de tensões;
- Proteger as fibras da abrasão e das agressões do meio ambiente.

Tipicamente, as resinas utilizadas em compósitos FRP podem ser divididas em dois tipos: termoendurecíveis ou termoplásticas. As resinas termoendurecíveis são materiais de estrutura molecular reticulada e o seu endurecimento é obtido através de um processo de cura. Depois de curadas, estas resinas apresentam-se no seu estado final e não podem ser reprocessadas uma vez que o seu comportamento é irreversível [9].

No que respeita às matrizes termoplásticas, estas são formadas maioritariamente por moléculas de dimensões maiores que, através de ligações secundárias (ligações de hidrogénio e forças de Van der Waals) se mantêm nas suas posições. As ligações de hidrogénio são um tipo de interação intermolecular que se dá entre átomos de hidrogénio de uma molécula com átomos de elementos eletronegativos. Por sua vez, as forças de Van der Waals são a soma de todas as forças atrativas ou repulsivas, que não sejam forças devidas a ligações covalentes entre moléculas ou forças devido à interação eletrostática de iões [9].

Estas resinas possuem um comportamento reversível, o que permite o seu reprocessamento. Além disso, estas resinas são fáceis de armazenar devido ao facto de não precisarem de refrigeração [9].

2.1.2 Reforço sob a forma de fibras

As fibras têm como objetivo suportar as solicitações mecânicas dos elementos estruturais e caracterizam a resistência mecânica do compósito, que depende do tipo de fibra utilizado, sendo que as mais comuns são as fibras de vidro e as de carbono. Na figura 2.1, apresenta-se o comportamento tensão-extensão das fibras, compósito e matriz.

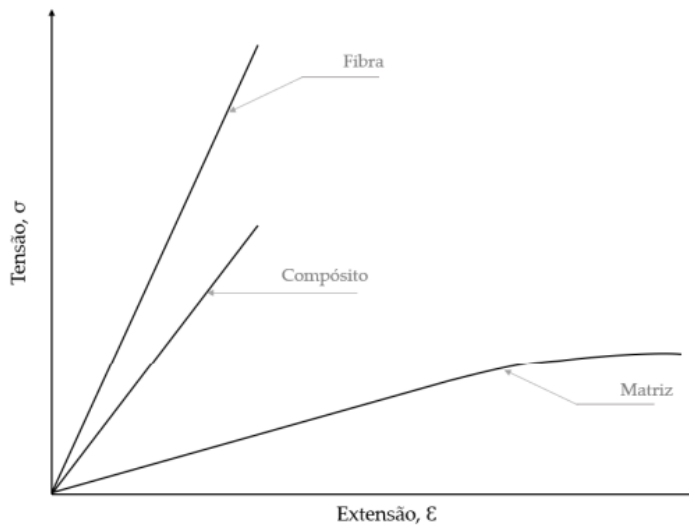


Figura 2.1 - Comportamento tensão-extensão (σ - ϵ) das fibras, resina e matriz, adaptado de [10].

A fase de reforço tem uma grande importância nos materiais compósitos. É possível efetuar a sua classificação com base na forma de reforço utilizada, como se consegue perceber pela figura 2.2.

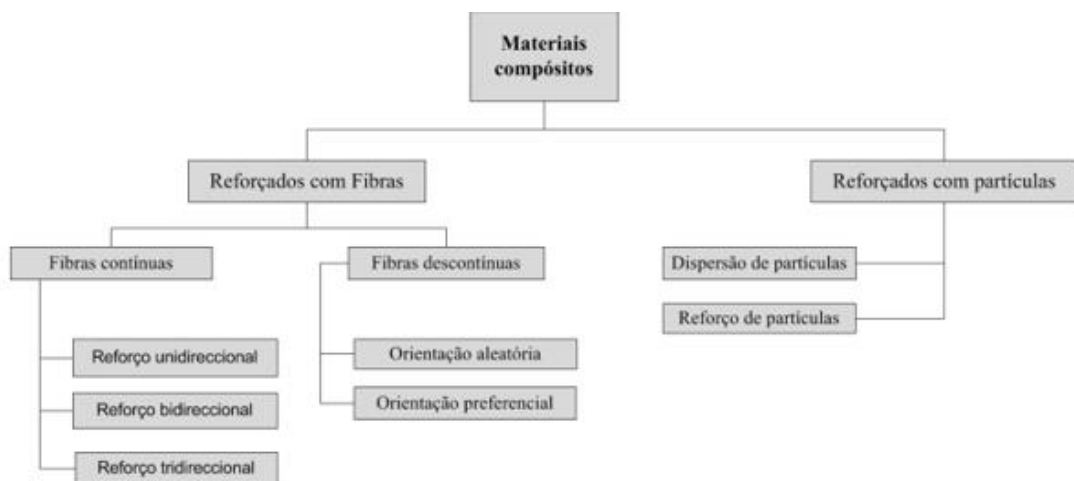


Figura 2.2 - Classificação de compósitos baseados na forma da fase de reforço, adaptado de [1]

Estes reforços são normalmente utilizados na forma de feixes, como por exemplo mechas de fio contínuo ou cordões. As mechas de fio contínuo são obtidas pela ligação de feixes paralelos sem torção intencional. Por sua vez, os cordões resultam da união dos feixes com torção [8].

2.1.3 Fillers

Os fillers, são agregados finos, cujas partículas tem diâmetros equivalentes superiores a 0,07mm, cujo objetivo é a redução dos custos de produção. Os fillers permitem melhorar algumas propriedades, as quais não se conseguiriam obter com recurso à mera utilização de resina e fibras. A adição de fillers à matriz pode melhorar algumas das suas propriedades como, por exemplo, a resistência à fadiga e a resistência química. Adicionalmente, o uso de fillers diminui normalmente a resistência à corrosão dos FRP e as suas propriedades mecânicas [8].

2.1.4 Aditivos

Os aditivos são elementos que se colocam nos betões, argamassas e colas de modo a melhorar as suas capacidades e de lhes modificar o comportamento de acordo com determinados requisitos. Os aditivos são geralmente adicionados em pequenas quantidades. De acordo com Busel e Lockwood [8], os aditivos têm normalmente as seguintes funções:

- Diminuição de produção de fumo e melhoramento da resistência ao fogo;
- Inibição da oxidação de polímeros;
- Diminuição do teor de vazios;
- Aumento da condutividade elétrica e interferência eletromagnética;
- Aumento da dureza;
- Diminuição da tendência à atração de cargas elétricas;
- Diminuição da massa volúmica e retração;
- Prevenção de perda de cor e brilho ;
- Obtenção de cor;
- Facilitação da desmoldagem.

2.1.5 Interface fibra-matriz

Os materiais constituídos por fibras e matrizes criam uma importante área de contacto entre si. Embora ambos mantenham as suas propriedades físico-químicas, o conjunto destes

constituintes garante uma combinação de propriedades, que são difíceis de alcançar individualmente. Assim, é preciso garantir uma boa interação entre ambos. As propriedades mecânicas da interface fibra-matriz dependem principalmente da adesão e compatibilidade mecânica entre as fibras e a matriz e também do ângulo entre as fibras e a direção de aplicação do carregamento [8].

2.2 Campos de aplicação dos materiais FRP

A utilização dos materiais FRP tem vindo a generalizar-se, destacando-se as indústrias de construção civil e as indústrias aeroespacial, automóvel, da aviação e defesa, as quais têm explorado as características destes materiais para desenvolver os seus produtos.

Na indústria da construção, por exemplo, materiais compósitos FRP têm sido utilizados na forma de componentes em tração ou de componentes em flexão. Podem identificar-se quatro áreas principais de aplicação de materiais FRP: (i) armaduras interiores para betão; (ii) reparação e reforço (exterior) de estruturas existentes; (iii) estruturas híbridas novas, em que os materiais compósitos FRP são combinados com materiais tradicionais; e (iv) estruturas 100% compósitas. Na figura 2.3 encontram-se exemplos das respetivas áreas de aplicação.



Figura 2.3: Exemplos das principais aplicações de materiais FRP: (a) armaduras interiores do tabuleiro de uma ponte; (b) reforço de uma laje maciça vigada; (c) reabilitação de uma ponte através de painéis pultrudidos; (d) estrutura híbrida (Ponte de Friedberg, Alemanha) (adaptado de [1]).

O reforço interno de estruturas de betão é feito substituindo os varões de aço do betão armado por fibras curtas, redes de fibras e varões ou cabos internos de pré-esforço em materiais FRP.

A reparação e reforço de estruturas existentes está relacionada com a melhoria do

comportamento de elementos estruturais. Para este efeito, em geral, têm sido utilizados laminados, barras e cabos de pré-esforço exteriores em estruturas de betão armado, metálicas e de madeira [9].

Em estruturas novas híbridas, os materiais FRP são combinados com materiais tradicionais. As estruturas híbridas apresentam várias vantagens, tais como o aumento da rigidez à flexão e o aumento da resistência face aos elementos FRP isolados [9].

Em estruturas novas totalmente compósitas os elementos estruturais são construídos apenas com materiais FRP. A sua aplicação é mais usada na construção de pontes devido à resistência e durabilidade dos compósitos FRP. Estes fatores contribuem para uma maior vida útil das estruturas. No entanto, os pilares ainda são construídos com materiais tradicionais, como, por exemplo, aço ou betão [9].

2.3 Ligações coladas

As ligações coladas foram bastante impulsionadas pela indústria aeroespacial, na medida em que estas ligações contribuem para a redução do peso das estruturas, o que se revela crucial para a construção de aeronaves.

Algumas vantagens das ligações coladas são [10]:

- Reduzem problemas de fadiga em comparação com ligações aparafusadas;
- Previnem a necessidade de furos no material;
- Melhoram as capacidades de absorver vibrações e sons;
- Impedem a entrada de humidade e detritos na junta;
- Melhoram a resistência à corrosão e à fadiga;
- Melhoram a distribuição de tensões.

No entanto, as ligações coladas também apresentam algumas desvantagens como, por exemplo, [10] :

- Irreversibilidade das ligações, o que não permite a desmontagem;
- Necessidade de um tratamento criterioso das superfícies onde se pretende aplicar o adesivo;
- Gama de temperaturas de serviço limitadas;
- Maiores dificuldades de aplicação in-situ.

Na colagem entre perfis pultrudidos é bastante importante ter em consideração a transmissão de tensões na junta, que deve ser feita da forma mais homogénea possível. Segundo Mays e Hutchinson [11] para se otimizar uma junta colada deve-se seguir os seguintes pressupostos:

- Evitar concentrações de tensões;
- A camada de adesivo deve ser tanto quanto possível fina e contínua;
- Utilizar a máxima área de colagem possível;
- O adesivo deve ser tracionado na direção de máxima resistência dos aderentes.

A análise deste tipo de ligações é feita com base na identificação do modo de rotura.

Existem três modos de rotura distintos entre metais e compósitos como se pode observar na figura 2.4. Assim, a rotura adesiva é definida pelo deslocamento do adesivo dos materiais, a rotura coesiva ocorre na camada adesiva e a rotura por delaminação na camada do compósito [12].

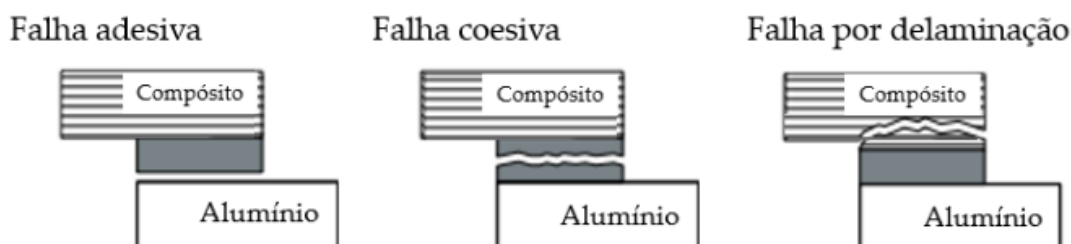


Figura 2.4 - Modos de rotura em ligações compósito-metal, adaptado de [13].

Alguns adesivos, para melhorarem o seu desempenho precisam de ser curados. Também é muito importante utilizar geometrias que evitem a concentração de tensões. Outros fatores que influenciam a resistência da ligação são as condições de temperatura e de humidade, tendo presente a natureza polimérica do adesivo. Consequentemente, a escolha do adesivo deve ter em consideração o comprimento de colagem em relação ao comprimento efetivo (que é o comprimento a partir do qual a força transmitida ao compósito FRP deixa de aumentar), as tensões impostas à ligação, o pré-tratamento das superfícies a colar, a espessura do adesivo e a temperatura a que este se encontra sujeito [3,13].

2.4 Leis de aderência

As leis de aderência utilizam-se para simular o comportamento real da interface entre o compósito FRP e o substrato. Estas leis são gráficos de tensões de aderência vs. deslizamento relativo entre o FRP e o substrato. São obtidas através de ensaios experimentais [14]. Para quantificar a tensão de aderência e o deslizamento usa-se a expressão seguinte [14]:

$$\tau = E_f \cdot t_f \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta x} \quad (2.1)$$

Onde $\Delta \varepsilon$ é a diferença de extensões entre dois extensómetros consecutivos e Δx o comprimento entre extensómetros. Por sua vez, os deslizamentos calculam-se através da seguinte expressão [14]:

$$s_i = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}}{2} (x_i - x_{i-1}) + s_{i-1} \quad (2.2)$$

onde ε_i e ε_{i-1} são as extensões no compósito obtidas experimentalmente da leitura dos extensómetros; x_i e x_{i-1} são as posições dos extensómetros e s_i e s_{i-1} são os deslizamentos.

Na figura 2.5f pode-se observar uma lei de aderência triangular. No entanto, nesta dissertação a lei de aderência usada foi do tipo exponencial e não bi-linear, como se consegue observar pela figura 2.5l. Usou-se esta lei uma vez que assim é necessário apenas uma expressão para definir analiticamente os estágios elásticos, de amolecimento e de descolamento, ao contrário da lei de aderência triangular em que seria necessário definir estes estágios com expressões diferentes.

A expressão matemática da figura 2.5f é a seguinte:

$$f(s) = \begin{cases} \frac{\tau_{max}}{s_{ult}} s & \text{onde } 0 \leq s \leq s_{max} \\ \frac{\tau_f}{s_{ult} - s_{max}} (s - s_{ult}) & \text{onde } s_{max} < s \leq s_{ult} \\ 0 & \text{onde } s > s_{ult} \end{cases} \quad (2.3)$$

Também existem leis de aderência que são definidas através de funções lineares e funções não lineares. As primeiras são menos rigorosas uma vez que são aproximações mais simples para a representação do fenômeno do descolamento.

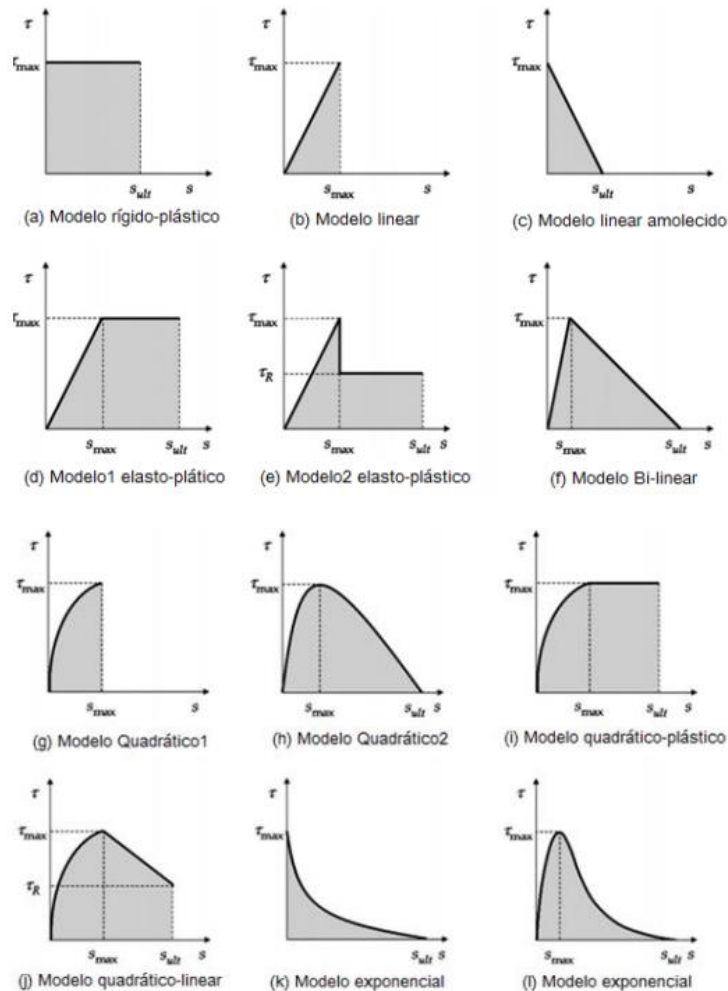


Figura 2.5 - Modelos da lei de aderência [31]

2.5 Ancoragem mecânica

De entre os vários tipos de ancoragens que podem ser usados na construção de estruturas, as mais comuns são as ancoragens mecânicas que são fixadas na madeira usando parafusos ou rebites. Este tipo de ancoragem é das mais fortes e duráveis, apesar de ser das mais caras e difíceis de instalar.

Considerando que a técnica NSM (Near Surface Mounted) não pode ser utilizada nos casos de elementos estruturais de aço, nestes casos pode ser utilizada a técnica EBR (Externally Bounded Reinforcement). Assim, são utilizados dispositivos de ancoragem mecânica adicionais no sistema EBR para melhorar o desempenho entre um compósito e substratos.

Ferracuti e Mazzotti [20] estudaram o desempenho de sistemas EBR com ancoragem mecânica adicional. Para o efeito, testaram duas amostras e estudaram as respostas força-deslizamento das interfaces CFRP-betão mecanicamente ancoradas não permitindo qualquer deslizamento entre o CFRP e o betão. A partir desses estudos foi possível identificar três ramos principais na resposta carga-deslizamento: o primeiro ramo é praticamente linear até o início do descolamento; o ramo seguinte representa o processo de descolamento e no último ramo, após a descolagem completa, apenas o compósito de CFRP é capaz de resistir, proporcionando um comportamento elástico linear até à rotura [16].

2.6 Equações governativas da ligação FRP/substrato [17]

Em um sistema EBR, as equações de equilíbrio do compósito de FRP (ver figura 2.6) podem conduzir as seguintes equações:

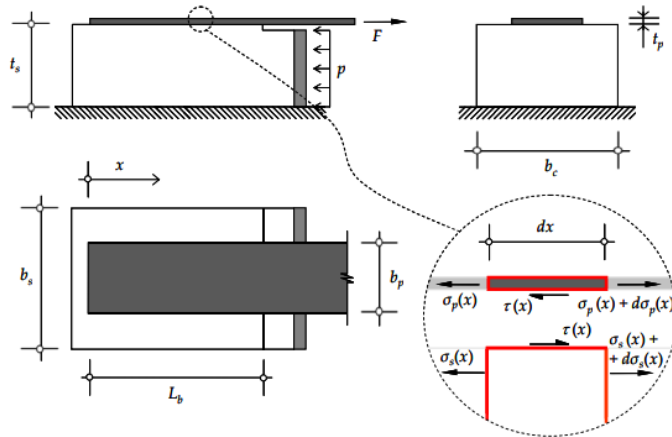


Figura 2.6 - Esquema de um teste de corte simples livre de quaisquer dispositivos mecânicos de ancoragem [17]

$$\frac{d\sigma_p(x)}{dx} - \frac{\tau(x)}{t_p} = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{d\sigma_s(x)}{dx} + \frac{\tau(x) \cdot b_p}{b_s \cdot t_s} = 0 \quad (2.5)$$

$$\sigma_p(x) \cdot b_p \cdot t_p + \sigma_s(x) \cdot b_s \cdot t_s = F \quad (2.6)$$

As tensões longitudinais no compósito de FRP e no substrato são, respetivamente:

$$\sigma_p(x) = E_p \frac{du_p(x)}{dx} \quad (2.7)$$

$$\sigma_s(x) = E_s \frac{du_s(x)}{dx} \quad (2.8)$$

onde E_p e E_s são, respetivamente, o módulo de elasticidade do FRP e do substrato; e du_p/dx e du_s/dx são, respetivamente, as extensões no compósito e no substrato devido às cargas transmitidas ao FRP. Os deslocamentos relativos entre o FRP e o substrato são determinados de acordo com:

$$s(x) = u_p(x) - u_s(x) \quad (2.9)$$

onde u_p e u_s são, respetivamente, os deslocamentos na fibra de FRP e no substrato.

Derivando a Equação (2.9) em ordem a x obtém-se:

$$\frac{ds(x)}{dx} = \frac{du_p(x)}{dx} - \frac{du_s(x)}{dx} \quad (2.10)$$

Introduzindo as Equações (2.7) e (2.8) na Equação (2.10) obtém-se a seguinte equação:

$$\frac{ds(x)}{dx} = \frac{\sigma_p(x)}{E_p} - \frac{\sigma_s(x)}{E_s} \quad (2.11)$$

Derivando a Equação (2.11) em ordem a x obtém-se:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} = \frac{1}{E_p} \cdot \frac{d\sigma_p(x)}{dx} - \frac{1}{E_s} \frac{d\sigma_s(x)}{dx} \quad (2.12)$$

Introduzindo as Equações (2.4) e (2.5) na Equação (2.12) e assumindo que localmente a tensão de aderência depende dos deslocamentos relativos entre o FRP e o substrato, a equação diferencial de segunda ordem é obtida como:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} - \lambda^2 \cdot \tau(x) = 0 \quad (2.13)$$

onde:

$$\lambda^2 = \frac{1}{E_p \cdot t_p} + \frac{b_p}{E_s \cdot b_s \cdot t_s} \quad (2.14)$$

Normalmente, $\frac{1}{E_p \cdot t_p} \gg \frac{b_p}{E_s \cdot b_s \cdot t_s}$ e assim a Equação (2.14) fica

$$\lambda^2 = \frac{1}{E_p \cdot t_p} \quad (2.15)$$

As tensões longitudinais no compósito FRP podem ser determinadas introduzindo a Equação (2.8) na Equação (2.6), levando a:

$$\sigma_p(x) = \frac{1}{t_p \cdot \lambda^2} \cdot \frac{ds(x)}{dx} \quad (2.16)$$

A solução da Equação (2.13) depende do modelo *bond-slip* que representa o comportamento local da interface FRP-substrato original. Para modelos não lineares de deslizamento de ligação, a solução analítica da Equação (2.13) é difícil de resolver e estratégias numéricas têm sido utilizadas. Nas seções a seguir, uma solução analítica da Equação (2.13) é exposta onde um modelo exponencial de deslizamento de ligação local é usado.

2.7 Lei de aderência exponencial [17]

A curva de deslizamento exponencial proposta por Dai et al. [19] é obtida a partir de testes de corte com comprimentos de ligação longos, ou seja, com um comprimento de ligação maior que o comprimento efetivo de ligação. Nesses casos, o deslizamento de deformação experimental em $x = L_b$ deve ser conhecido e, então, a expressão a seguir deve representar experimentalmente a resposta de deslizamento de deformação da interface:

$$\varepsilon_p(s) = A \cdot (1 - e^{-Bs}) \quad (2.17)$$

onde A é a extensão máxima no compósito de FRP; e B é o índice de rigidez da ligação obtido do ajuste da Equação (2.17) à curva experimental extensão vs. deslizamento.

Como os compósitos FRP possuem comportamentos constitutivos lineares e o comportamento local da interface é governado por uma relação ligação-deslizamento, a seguinte equação pode ser estabelecida:

$$\tau(s) = E_p \cdot t_p \cdot \frac{d\varepsilon_p}{ds} \cdot \frac{ds}{dx} \quad (2.18)$$

Derivando a Equação (2.17) em relação a s e introduzindo o resultado na Equação (2.18), o deslizamento de ligação não linear local é determinado de acordo com:

$$\tau(s) = E_p \cdot t_p \cdot A^2 \cdot B \cdot e^{-Bs} \cdot (1 - e^{-Bs}) \quad (2.19)$$

A energia de fratura do Modo II é calculada de acordo com

$$G_f = \int_0^{\infty} \tau(s) \cdot ds \quad (2.20)$$

Resolvendo a Equação (2.20), a energia de fratura do Modo II é:

$$G_f = 0.5 \cdot A^2 \cdot E_p \cdot t_p \quad (2.21)$$

e portanto:

$$A = \sqrt{\frac{2G_f}{E_p \cdot t_p}} \quad (2.22)$$

A partir da Equações (2.21) e (2.22), a tensão de aderência definida na Equação (2.19) pode ser reescrita como:

$$\tau(s) = 2B \cdot G_f \cdot (e^{-Bs} - e^{-2Bs}) \quad (2.23)$$

Derivando a Equação (2.23) em relação a s e igualando a zero, o escorregamento na tensão máxima de ligação é:

$$s_{max} = \frac{\ln(2)}{B} \quad (2.24)$$

e quando introduzido na Equação (2.23), a tensão de aderência máxima é:

$$\tau_{max} = 0.5B \cdot G_f \quad (2.25)$$

2.8 Corte simples sem ancoragem mecânica

O ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica possui condições de fronteira diferentes do ensaio de corte com ancoragem mecânica. Assim, neste caso, atendendo à figura 2.6, as condições de fronteira são [17]:

$$\varepsilon(x = 0) = \frac{ds(x=0)}{dx} = 0 \quad (2.26)$$

e

$$s(x = 0) = s_0 \quad (2.27)$$

A solução analítica da Equação (2.13) começa com a introdução da lei de aderência que rege o descolamento da ligação definida na Equação (2.23) na Equação (2.13), o que leva a:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} - \frac{2B \cdot G_f}{t_p} \cdot \left(\frac{1}{E_p} + \frac{b_p \cdot t_p}{E_s \cdot b_s \cdot t_s} \right) \cdot (e^{-Bs} - e^{-2Bs}) = 0 \quad (2.28)$$

Antes de tentar resolver a Equação (2.28), é preciso reconhecer que:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left(\frac{ds}{dx} \right) = \frac{d}{ds} \left(\frac{ds}{dx} \right) \frac{ds}{dx} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{ds} \left(\frac{ds}{dx} \right)^2 \quad (2.29)$$

e

$$2B \cdot (e^{-Bs} - e^{-2Bs}) = \frac{d}{ds} (1 - e^{-Bs})^2 \quad (2.30)$$

Introduzindo as igualdades em (2.29) e (2.30) na Equação (2.28), tem-se que:

$$\left(\frac{ds}{dx} \right)^2 = \int \frac{2G_f}{t_p} \cdot \left(\frac{1}{E_p} + \frac{b_p \cdot t_p}{E_s \cdot b_s \cdot t_s} \right) \cdot \frac{d}{ds} (1 - e^{-Bs})^2 \quad (2.31)$$

A distribuição da extensão ao longo de FRP é dada por:

$$\frac{ds}{dx} = \sqrt{\frac{2G_f}{t_p} \cdot \left(\frac{1}{E_p} + \frac{b_p \cdot t_p}{E_s \cdot b_s \cdot t_s} \right) \cdot (1 - e^{-Bs})^2 + C_1} \quad (2.32)$$

A partir das condições fronteira obtém-se a constante C_1 :

$$C_1 = -D^2 \cdot (1 - e^{-B \cdot s_0})^2 \quad (2.33)$$

onde

$$D = \sqrt{\frac{2G_f}{t_p} \cdot \left(\frac{1}{E_p} + \frac{b_p \cdot t_p}{E_s \cdot b_s \cdot t_s} \right)} \quad (2.34)$$

Rescrevendo a Equação (2.32):

$$\int \frac{ds}{(1-e^{-Bs})^2 - (1-e^{-B \cdot s_0})^2} = \int D dx \quad (2.35)$$

Resolvendo a Equação (2.35)

$$\frac{\ln\left(2\sqrt{1-(1-e^{-B \cdot s_0})^2} \cdot \sqrt{(1-e^{-Bs})^2 - (1-e^{-B \cdot s_0})^2} \cdot e^{-Bs} + 2 \cdot (1-(1-e^{-B \cdot s_0})^2) e^{B \cdot s - 2}\right)}{B \cdot \sqrt{1-(1-e^{-B \cdot s_0})^2}} = D \cdot x + C_2 \quad (2.36)$$

Onde C_2 é uma constante. Considerando que:

$$\sqrt{(1-e^{-Bs})^2 - (1-e^{-B \cdot s_0})^2} \approx \sqrt{(1-e^{-Bs})^2} \quad (2.37)$$

Tendo em conta a Equação (2.37) e resolvendo a Equação (2.36) em relação a s , o deslizamento ao longo do comprimento colado é dado por:

$$s(x) = \frac{1}{B} \ln \left(\frac{e^{(D \cdot x + C_2)(B \cdot \sqrt{1-(1-e^{-B \cdot s_0})^2}) + 2 + 2\sqrt{1-(1-e^{-B \cdot s_0})^2}}}{2\sqrt{1-(1-e^{-B \cdot s_0})^2} + 2 \cdot (1-(1-e^{-B \cdot s_0})^2)} \right) \quad (2.38)$$

A constante C_2 é então obtida pela introdução da condição de fronteira da Equação (2.26) na Equação (2.38) o que leva a:

$$C_2 = \frac{\ln\left(e^{B \cdot s_0 \cdot (2\sqrt{1-(1-e^{-B \cdot s_0})^2} + 2 \cdot (1-(1-e^{-B \cdot s_0})^2)) - 2 - 2\sqrt{1-(1-e^{-B \cdot s_0})^2}}\right)}{B \cdot \sqrt{1-(1-e^{-B \cdot s_0})^2}} \quad (2.39)$$

A tensão de aderência ao longo do comprimento colado é determinada introduzindo a Equação (2.38) na Equação (2.23):

$$\tau(x) = 2B \cdot G_f \cdot \left(\frac{2\sqrt{1-(1-e^{-B \cdot s_0})^2} + 2 \cdot (1-(1-e^{-B \cdot s_0})^2)}{e^{(D \cdot x + C_2)(B \cdot \sqrt{1-(1-e^{-B \cdot s_0})^2}) + 2 + 2\sqrt{1-(1-e^{-B \cdot s_0})^2}} - \left(\frac{2\sqrt{1-(1-e^{-B \cdot s_0})^2} + 2 \cdot (1-(1-e^{-B \cdot s_0})^2)}{e^{(D \cdot x + C_2)(B \cdot \sqrt{1-(1-e^{-B \cdot s_0})^2}) + 2 + 2\sqrt{1-(1-e^{-B \cdot s_0})^2}} - \right)^2} \right) \quad (2.40)$$

2.9 Corte simples com ancoragem mecânica perfeita

A diferença entre o modelo de corte simples com ancoragem mecânica perfeita (em que a rigidez da ancoragem - k é infinita i.e. em que não há deslizamento entre o compósito FRP e o substrato) [16] e o modelo apresentado nesta dissertação está nas condições de fronteira.

A solução analítica da equação definida na Equação (2.13) começa com a introdução da lei de aderência que rege o descolamento da ligação definida na Equação (2.23) na Equação (2.13), o que leva a:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} - \frac{2B \cdot G_f}{t_p} \cdot \left(\frac{1}{E_p} + \frac{b_p \cdot t_p}{E_s \cdot b_s \cdot t_s} \right) \cdot (e^{-Bs} - e^{-2Bs}) = 0 \quad (2.41)$$

Antes de tentar resolver a Equação (2.41), é preciso reconhecer que:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left(\frac{ds}{dx} \right) = \frac{d}{ds} \left(\frac{ds}{dx} \right) \frac{ds}{dx} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{ds} \left(\frac{ds}{dx} \right)^2 \quad (2.42)$$

e

$$2B \cdot (e^{-Bs} - e^{-2Bs}) = \frac{d}{ds} (1 - e^{-Bs})^2 \quad (2.43)$$

Introduzindo as igualdades em (2.42) e (2.43) na Equação (2.41), tem-se que:

$$\left(\frac{ds}{dx} \right)^2 = \int \frac{2G_f}{t_p} \cdot \left(\frac{1}{E_p} + \frac{b_p \cdot t_p}{E_s \cdot b_s \cdot t_s} \right) \cdot \frac{d}{ds} (1 - e^{-Bs})^2 \quad (2.44)$$

E integrando a Equação (2.42) a expressão das extensões no compósito FRP é definida como:

$$\frac{ds}{dx} = \sqrt{\frac{2G_f}{t_p} \cdot \left(\frac{1}{E_p} + \frac{b_p \cdot t_p}{E_s \cdot b_s \cdot t_s} \right) \cdot (1 - e^{-Bs})^2 + C_1} \quad (2.45)$$

Onde C_1 é uma constante determinada a partir das condições de fronteira do problema de descolamento (atendendo à figura 2.6):

$$\varepsilon(x=0) = \frac{ds(x=0)}{dx} = \varepsilon_0 \quad (2.46)$$

e

$$s(x=0) = 0 \quad (2.47)$$

Impondo a condição de fronteira indicada na Equação (2.46), a constante C_1 é determinada a partir da Equação (2.45):

$$C_1 = \varepsilon_0^2 \quad (2.48)$$

Assim, a Equação (2.45) pode ser reescrita como:

$$\int \frac{ds}{(1 - e^{-Bs})^2 - \left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2} = \int D dx \quad (2.49)$$

onde D é uma constante definida a partir da Equação (2.34):

Como ε_0 e D são sempre positivos, integrando a Equação (2.49) obtém-se:

$$\frac{\operatorname{arcsinh}\left(\frac{\varepsilon_0 \cdot e^{Bs} + D \cdot e^{Bs} \frac{D}{\varepsilon_0}}{D}\right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1}} = D \cdot x + C_2 \quad (2.50)$$

onde C_2 é uma constante. Resolvendo a Equação (2.50) em relação a s , os deslizamentos ao longo da interface FRP-substrato são determinados de acordo com a seguinte expressão:

$$s(x) = \frac{1}{B} \cdot \ln \left(\frac{\sinh\left((D \cdot x + C_2) \cdot B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1}\right) + \frac{D}{\varepsilon_0}}{\frac{\varepsilon_0 + D}{D + \varepsilon_0}} \right) \quad (2.51)$$

Introduzindo agora a condição de fronteira previamente definida na Equação (2.47), a constante C_2 é:

$$C_2 = \frac{\operatorname{arcsinh}\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1}} \quad (2.52)$$

Introduzindo a Equação (2.52) na Equação (2.51), os deslizamentos ao longo do comprimento da ligação são definidos como:

$$s(x) = \frac{1}{B} \ln \left(\frac{\sinh\left(\left(D \cdot x + \frac{\operatorname{arcsinh}\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1}}\right) \cdot B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1}\right) + \frac{D}{\varepsilon_0}}{\frac{\varepsilon_0 + D}{D + \varepsilon_0}} \right) \quad (2.53)$$

Como mencionado anteriormente, as deformações no compósito FRP são determinadas de acordo com a Equação (2.45). Assumindo mais uma vez que as deformações no substrato podem ser ignoradas quando comparadas com as deformações no compósito FRP, estas últimas são calculadas de acordo com:

$$\frac{ds}{dx} = \varepsilon(x) = \sqrt{D^2 \cdot \left(1 - \frac{\frac{\varepsilon_0 + D}{D + \varepsilon_0}}{\sinh\left(\left(D \cdot x + \frac{\operatorname{arcsinh}\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1}}\right) \cdot B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1}\right) + \frac{D}{\varepsilon_0}} \right)^2} + \varepsilon_0^2 \quad (2.54)$$

As tensões de ligação ao longo do comprimento de ligação são facilmente encontradas quando a Equação (2.53) é introduzida na Equação (2.23), o que leva a:

$$\tau(x) = 2B \cdot G_f \cdot \left(\frac{\frac{\varepsilon_0 + D}{D} + \frac{D}{\varepsilon_0}}{\sinh \left(\left(D \cdot x + \frac{\operatorname{arcsinh} \left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1}} \right) \cdot B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1} \right) + \frac{D}{\varepsilon_0}} \right) - \left(\frac{\frac{\varepsilon_0 + D}{D} + \frac{D}{\varepsilon_0}}{\sinh \left(\left(D \cdot x + \frac{\operatorname{arcsinh} \left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1}} \right) \cdot B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1} \right) + \frac{D}{\varepsilon_0}} \right)^2 \right) \quad (2.55)$$

Também existe o modelo de Lu et al [26]. Este modelo é muito difícil de implementar pois para definir cada estágio do processo de descolamento é preciso definir várias expressões diferentes.

2.10 Descrição do processo de descolamento dos estágios da interface com amarração e com comportamento linear

Para a lei de aderência triangular é importante compreender primeiro o que os estágios representam antes de encontrar as soluções de cada um. Os diferentes estados que a interface sofre até ao seu descolamento completo estão representados na figura 2.7 e são descritos em seguida [18]:

- Estágio elástico: neste estado inicial, todo o comprimento da ligação tem um desempenho elástico no qual os deslizamentos desenvolvidos dentro da interface são inferiores ao deslizamento s_1 . A extremidade mais carregada do laminado FRP apresenta os maiores deslizamentos, que tendem a diminuir em direção extremidade livre do FRP, mas nas regiões mais próximas da extremidade livre do FRP, os deslizamentos tendem a aumentar novamente em proporção muito menor do que aquela desenvolvida na região ligada oposta;

- Estágio de amolecimento elástico: neste estado, a extremidade mais carregada de FRP amolece, o que significa que a tensão máxima de aderência já foi atingida naquele ponto. À medida que a carga é transmitida ao laminado de FRP, a tensão máxima de aderência migra da extremidade carregada do FRP para o centro da região ligada;

- Estágio de descolamento de amolecimento elástico: neste estado, a extremidade mais carregada já foi descolada. A resistência máxima da interface é atingida e, dependendo do comprimento da ligação, este estado funciona como se estivesse cedendo. Além disso, excluindo a região descolada, a distribuição das tensões de aderência neste estado tem a mesma configuração. Ainda assim, à medida que os escorregamentos aumentam, a região elástica tenderá a diminuir até ao seu completo desaparecimento, o que representa o início de um novo estado;

- Estágio de amolecimento e descolamento: a região de amolecimento está localizada na região mais próxima da extremidade livre do FRP e neste ponto os deslizamentos estão aumentando entre s_1 e s_2 . Quando o deslizamento s_2 é alcançado na extremidade livre do FRP, a região de amolecimento desaparece da interface e um novo estado começa então;

- Estágio de descolamento completo: apenas a região correspondente a uma tensão de ligação constante ainda está transferindo tensões entre os materiais.

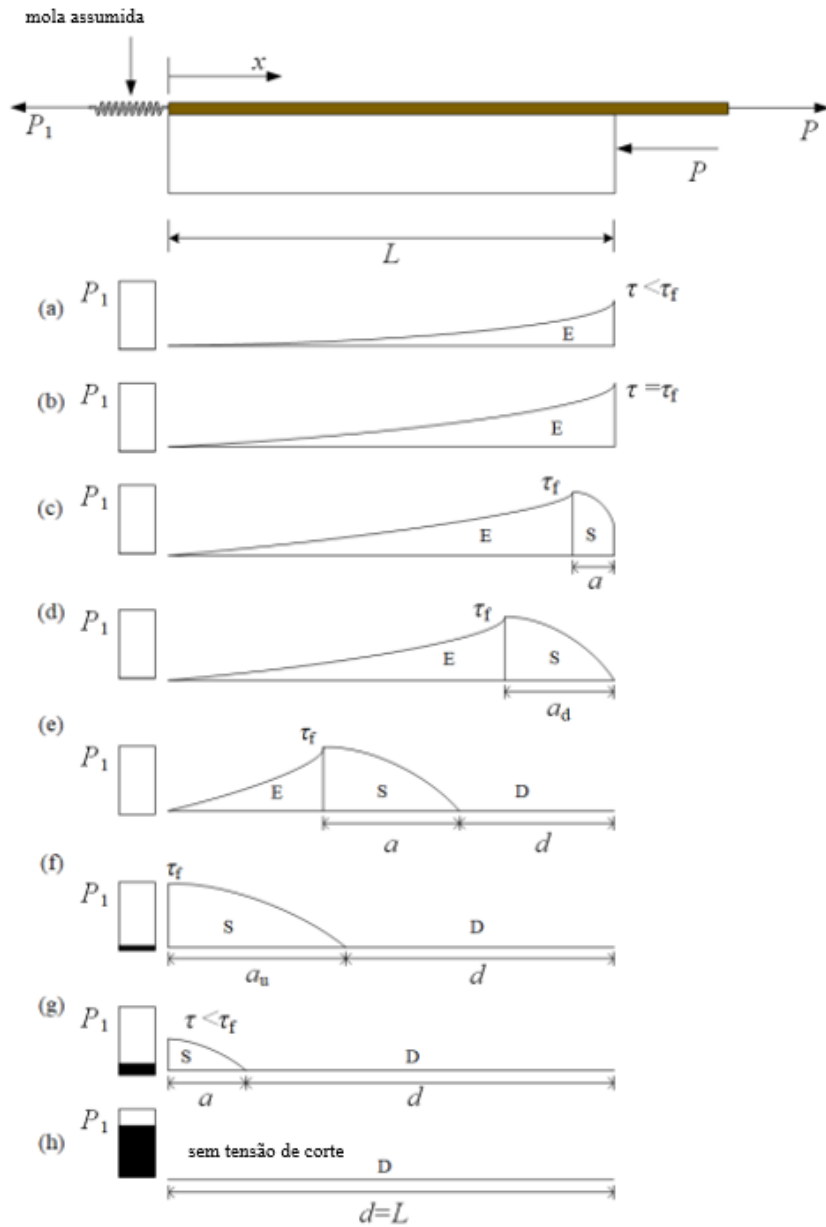


Figura 2.7 – A distribuição da tensão de corte interfacial no processo de descolamento e processo de ativação da camisa em U (a) Estágio elástico; (b) Início da etapa de amolecimento; (c) Estágio de amolecimento elástico; (d) Início da descolagem em $x=L$; (e) Estágio de descolamento elástico-amolecimento; (f) Pico de cisalhamento em $x=0$; (g) Etapa de amolecimento-descolamento; (h) Estágio de descolamento completo [15]

MODELO ANALÍTICO PROPOSTO

3.1 Introdução

Um dos objetivos deste estudo é desenvolver um modelo analítico que permita analisar o desempenho de ligações FRP/substrato com amarração adicional. Este modelo tem lei de aderência do tipo exponencial e não bi-linear e é válido para a técnica EBR e para a técnica NSM.

Neste capítulo apresenta-se as deduções do modelo analítico.

3.2 Desenvolvimento do modelo analítico

A solução analítica da equação diferencial da Equação (2.13) começa com a introdução da lei do escorregamento definida na Equação (2.23) na Equação (2.13), o que leva a:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} - \frac{2B \cdot G_f}{t_p} \cdot \left(\frac{1}{E_p} + \frac{b_p \cdot t_p}{E_s \cdot b_s \cdot t_s} \right) \cdot (e^{-Bs} - e^{-2Bs}) = 0 \quad (3.1)$$

Antes de tentar resolver a Equação (3.1), é preciso reconhecer que:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left(\frac{ds}{dx} \right) = \frac{d}{ds} \left(\frac{ds}{dx} \right) \frac{ds}{dx} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{ds} \left(\frac{ds}{dx} \right)^2 \quad (3.2)$$

e

$$2B \cdot (e^{-Bs} - e^{-2Bs}) = \frac{d}{ds} (1 - e^{-Bs})^2 \quad (3.3)$$

Introduzindo as igualdades em (3.2) e (3.3) na Equação (3.1), tem-se que:

$$\left(\frac{ds}{dx} \right)^2 = \int \frac{2G_f}{t_p} \cdot \left(\frac{1}{E_p} + \frac{b_p \cdot t_p}{E_s \cdot b_s \cdot t_s} \right) \cdot \frac{d}{ds} (1 - e^{-Bs})^2 \quad (3.4)$$

Simplificando a Equação (3.4)

$$\frac{ds}{dx} = \sqrt{\frac{2G_f}{t_p} \cdot \left(\frac{1}{E_p} + \frac{b_p \cdot t_p}{E_s \cdot b_s \cdot t_s} \right) \cdot (1 - e^{-Bs})^2 + C_1} \quad (3.5)$$

onde C_1 é uma constante a ser encontrada a partir da deformação desenvolvida no compósito FRP na sua extremidade livre (ε_{r0}), que pode ser obtida a partir da expressão geral proposta [23, 24, 25]:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{1+r} \frac{ds}{dx} \quad (3.6)$$

sendo r é a razão entre a rigidez axial do compósito de FRP e a rigidez axial do substrato.

Quando a Equação (3.5) é introduzida na Equação (3.6) em $x = 0$ (veja-se o topo da figura 2.9) a seguinte condição de fronteira é obtida, independentemente do seu comprimento colado:

$$\varepsilon_{r0} = \frac{1}{1+r} \sqrt{\frac{2G_f}{t_p} \cdot \left(\frac{1}{E_p} + \frac{b_p \cdot t_p}{E_s \cdot b_s \cdot t_s} \right) \cdot (1 - e^{-Bs})^2 + C_1} \quad (3.7)$$

Sendo s_0 o deslizamento em $x = 0$ e como a mola tem comportamento linear, a força na mola (P_1) é:

$$P_1 = k s_0 \Leftrightarrow s_0 = \frac{R}{k} \Leftrightarrow s_0 = \frac{\varepsilon_0 E_p A_p}{k} \quad (3.8)$$

Substituindo $\frac{2G_f}{t_p} \cdot \left(\frac{1}{E_p} + \frac{b_p \cdot t_p}{E_s \cdot b_s \cdot t_s} \right)$ por D^2 e escrevendo de outra forma a Equação (3.7) obtém-se a constante C_1 :

$$\varepsilon_{r0}^2 \cdot (1+r)^2 - D^2 \cdot (1 - e^{-Bs_0})^2 = C_1 \Leftrightarrow \varepsilon_{r0}^2 \cdot (1+r)^2 - D^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{B \varepsilon_{p0} E_p b_p \cdot t_p}{k}} \right)^2 = C_1 \quad (3.9)$$

Substituindo C_1 na Equação (3.7) obtém-se:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{1+r} \sqrt{D^2 \cdot (1 - e^{-Bs})^2 + \varepsilon_{r0}^2 \cdot (1+r)^2 - D^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{B \varepsilon_{p0} E_p b_p \cdot t_p}{k}} \right)^2} \quad (3.10)$$

Rescrevendo a Equação (3.5):

$$\frac{1 ds}{\sqrt{(1 - e^{-Bs})^2 + \left(\frac{\sqrt{|C_1|}}{D} \right)^2}} = \int D dx \quad (3.11)$$

Resolvendo a Equação (3.11):

$$\frac{\operatorname{arcsinh} \left(\frac{\frac{2(\sqrt{|C_1|})^2 e^{Bs}}{\sqrt{4 \left(\left(\frac{\sqrt{|C_1|}}{D} \right)^2 + 1\right)^{-4D^2}} + \frac{2e^{Bs}}{\sqrt{4 \left(\left(\frac{\sqrt{|C_1|}}{D} \right)^2 + 1\right)^{-4}}}}{\sqrt{4 \left(\left(\frac{\sqrt{|C_1|}}{D} \right)^2 + 1\right)^{-4}}} \right)}{B \sqrt{\left(\frac{\sqrt{|C_1|}}{D} \right)^2 + 1}} \right)}{B \sqrt{\left(\frac{\sqrt{|C_1|}}{D} \right)^2 + 1}} = Dx + C_2 \quad (3.12)$$

sendo C_2 uma constante. Simplificando a Equação (3.12):

$$\frac{D \cdot \operatorname{arcsinh} \left(\frac{(D^2 + C_1) e^{Bs - D^2}}{\sqrt{|C_1|} D} \right)}{B \sqrt{|D^2 + C_1|}} = Dx + C_2 \quad (3.13)$$

Isolando a variável s , para obter a função $s(x)$:

$$s(x) = \frac{1}{B} \ln \left(\frac{(\sqrt{|C_1|} D) \sinh \left(\frac{(D \cdot x + C_2) \cdot B \cdot \sqrt{|D^2 + C_1|}}{D} \right) + D^2}{|D^2 + C_1|} \right) \quad (3.14)$$

Introduzindo a condição fronteira $s(x = 0) = s_0$ obtém-se a constante C_2 :

$$C_2 = \frac{D \cdot \operatorname{arcsinh} \left(\frac{e^{s_0 B} (D^2 + C_1) - D^2}{\sqrt{|C_1|} D} \right)}{B \sqrt{|D^2 + C_1|}} \quad (3.15)$$

Introduzindo a Equação (3.15) na Equação (3.14), obtém-se:

$$s(x) = \frac{1}{B} \ln \left(\frac{(\sqrt{|C_1|} D) \sinh \left(\frac{\left(D \cdot x + \frac{D \cdot \operatorname{arcsinh} \left(\frac{e^{s_0 B} (D^2 + C_1) - D^2}{\sqrt{|C_1|} D} \right)}{B \sqrt{|D^2 + C_1|}} \right) \cdot B \cdot \sqrt{|D^2 + C_1|}}{D} \right) + D^2}{|D^2 + C_1|} \right) \quad (3.16)$$

Introduzindo a Equação (3.15) na Equação (3.10) obtém-se a extensão no compósito de FRP :

$$\varepsilon_r(x) = \frac{1}{1+r} \cdot \frac{\sqrt{|C_1|} \sqrt{|C_1 + D^2|} \cosh \left(\frac{(Dx + C_2) B \sqrt{|C_1 + D^2|}}{D} \right)}{\sqrt{|C_1|} \sinh \left(\frac{(Dx + C_2) B \sqrt{|C_1 + D^2|}}{D} \right) + D} \quad (3.17)$$

Introduzindo a Equação (3.14) na Equação (2.23) obtém-se a expressão das tensões de aderência:

$$\tau(x) = 2B \cdot G_f \cdot \frac{\frac{D}{\sqrt{|C_1|} + \frac{\sqrt{|C_1|}}{D}}}{\frac{D}{\sqrt{|C_1|}} + \sinh \left(\frac{B \cdot (D \cdot x + C_2) \cdot \sqrt{|1 + \frac{C_1}{D^2}|}}{D} \right)} \cdot \left(1 - \frac{\frac{D}{\sqrt{|C_1|} + \frac{\sqrt{|C_1|}}{D}}}{\frac{D}{\sqrt{|C_1|}} + \sinh \left(\frac{B \cdot (D \cdot x + C_2) \cdot \sqrt{|1 + \frac{C_1}{D^2}|}}{D} \right)} \right) \quad (3.18)$$

Para obter as extensões desenvolvidas no substrato, usa-se a seguinte expressão [23, 24, 25]:

$$\varepsilon_s = -\frac{1}{1+\frac{1}{r}} \frac{ds}{dx} \quad (3.19)$$

Escrevendo a Equação (3.19) de outra forma obtém-se:

$$\varepsilon_s(x) = -\frac{1}{1+\frac{1}{r}} \cdot \frac{\sqrt{|C_1|}\sqrt{|C_1+D^2|} \cosh\left(\frac{(Dx+C_2)B\sqrt{|C_1+D^2|}}{D}\right)}{\sqrt{|C_1|} \sinh\left(\frac{(Dx+C_2)B\sqrt{|C_1+D^2|}}{D}\right) + D} \quad (3.20)$$

3.3 Força máxima transmitida ao compósito FRP sem amarração

Existem dois casos para o comprimento colado. No primeiro tem-se que $L_b < L_{eff}$, ou seja, que o comprimento colado é inferior ao comprimento de ligação efetivo. No segundo caso tem-se que $L_b \geq L_{eff}$, ou seja, que o comprimento colado é igual ou superior ao comprimento de ligação efetivo.

A força máxima é atingida quando se tem $L_b \geq L_{eff}$ e pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$P_{max} = b_p \cdot \sqrt{2G_f \cdot \left(E_p \cdot t_p + \frac{E_p^2 \cdot b_p \cdot t_p^2}{E_s \cdot t_s \cdot b_s}\right)} \quad (3.21)$$

Como se tem que:

$$E_p \cdot t_p \gg \frac{E_p^2 \cdot b_p \cdot t_p^2}{E_s \cdot t_s \cdot b_s} \quad (3.22)$$

Obtém-se a expressão:

$$P_{max} = b_p \cdot \sqrt{2G_f \cdot E_p \cdot t_p} \quad (3.23)$$

No caso em que se tem $L_b < L_{eff}$, a expressão anterior não se pode utilizar. Assim é preciso adicionar um fator β_L no cálculo da força máxima. Assim, neste caso, a força máxima é obtida através de:

$$P_{max} = \beta_L \cdot b_p \cdot \sqrt{2G_f \cdot E_p \cdot t_p} \quad (3.24)$$

sendo que, segundo alguns autores [28-30], β_L pode ser obtido de acordo com:

$$\beta_L = \frac{L_b}{L_{eff}} \left(2 - \frac{L_b}{L_{eff}}\right) \quad (3.25)$$

3.4 Curva força-deslizamento

Admitindo que o compósito de FRP tem um comportamento linear elástico, a curva força-deslizamento é determinada a partir da Equação (3.17):

$$F(x = L_b) = \varepsilon(x = L_b) \cdot E_p \cdot t_p \cdot b_p = E_p \cdot t_p \cdot b_p \cdot \frac{1}{1+r} \cdot \frac{\sqrt{|c_1|} \sqrt{|c_1+D^2|} \cosh\left(\frac{(DL_b+C_2)B\sqrt{|c_1+D^2|}}{D}\right)}{\sqrt{|c_1|} \sinh\left(\frac{(DL_b+C_2)B\sqrt{|c_1+D^2|}}{D}\right) + D} \quad (3.26)$$

Por sua vez, o deslizamento em $x = L_b$ é determinado através da seguinte expressão:

$$s(x = L_b) = \frac{1}{B} \ln \left(\frac{(\sqrt{|c_1|} D) \sinh \left(\frac{D \cdot \operatorname{arcsinh} \left(\frac{e^{s_0 B} (D^2 + C_1) - D^2}{\sqrt{|c_1|} D} \right)}{B \sqrt{|D^2 + C_1|}} \right) \cdot B \cdot \sqrt{|D^2 + C_1|}}{D} + D^2}{|D^2 + C_1|} \right) \quad (3.27)$$

VALIDAÇÃO DO MODELO ANALÍTICO PROPOSTO

4.1 Lei de aderência

A partir das Equações (3.17), (3.18) e (3.26) construíram-se as curvas extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento. Obtiveram-se os valores de A e B através da lei de aderência da Equação (2.19). A partir da lei de aderência determinaram-se:

- extensão no compósito vs. deslizamento;
- tensão de aderência vs. deslizamento
- tensão normal vs. extensão
- deslizamento vs. comprimento colado;
- extensão no compósito vs. comprimento colado;
- extensão no substrato vs. comprimento colado;
- tensão de aderência vs. comprimento colado;

No modelo analítico assumiram-se os seguintes valores retirados do modelo de Lu et al [26]: $t_p = 1,2$ mm, $b_p = 50$ mm, $t_s = 300$ mm, $b_s = 220$ mm, $E_p = 205$ GPa e $E_s = 33$ GPa.

Os parâmetros da curva *bond-slip* como se consegue observar pela figura 4.1 são: $s_{max} = 0,047$ mm, $\tau_{max} = 5,44$ MPa, $G_f = 0,743$ N/mm e $B = 14,64$ mm⁻¹.

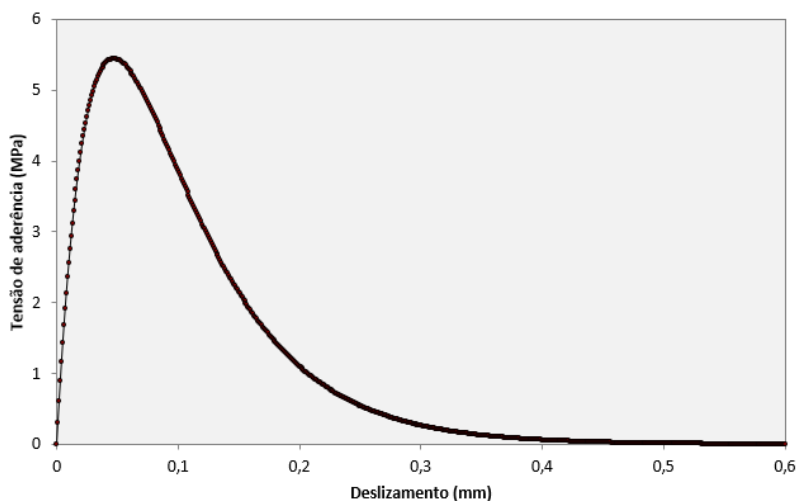


Figura 4.1 – Curva analítica da tensão de aderência vs. deslizamento em $x = L_b$.

4.2 Comprimento efetivo da ligação

O comprimento efetivo de ligação é o comprimento a partir do qual a força transmitida ao compósito FRP deixa de aumentar. O comprimento efetivo de ligação entre um compósito FRP e o aço, de acordo com Ueda e Dai [21] é calculado a partir da seguinte expressão:

$$L_{eff} = \frac{\sqrt{2E_p \cdot t_p}}{B \sqrt{G_f}} \cdot \ln \left(\frac{1+\alpha}{1-\alpha} \right) \quad (4.1)$$

em que E_p é o módulo de elasticidade do FRP, t_p é a espessura do FRP, G_f é a energia de fratura, B é o índice de rigidez da ligação e α é uma constante igual a 0,96.

Obtém-se um comprimento efetivo de ligação de 216 mm. Este comprimento efetivo de ligação encontra-se entre 50 mm e 250 mm uma vez que a força máxima é atingida neste intervalo. Por isso, neste capítulo serão analisados e interpretados os resultados de amostras em que o comprimento colado é superior ao efetivo, ou seja, em que o comprimento colado é de 250 mm e de amostras em que o comprimento colado é inferior ao efetivo, ou seja, em que o comprimento colado é de 50 mm.

4.3 Amostras com comprimento colado de 250 mm

A figura 4.2 mostra a força transmitida ao compósito em $x = L_b$ em função do deslizamento em $x = L_b$ para o comprimento colado de 250 mm. É possível perceber que inicialmente a força aumenta linearmente com o deslizamento até atingir um patamar em que a força se mantém praticamente constante, que é tanto maior quanto maior for o comprimento colado. Após isso, o aumento do deslizamento na extremidade livre $x = 0$ provoca uma diminuição na força até ser atingido um ponto em que o deslizamento em $x = L_b$ volta a aumentar, enquanto a força continua a diminuir (*snap-back*). Por fim, após isso, a força volta a aumentar linearmente com o deslizamento uma vez que o compósito de FRP está totalmente descolado. O declive deste gráfico representa a rigidez axial do compósito de FRP.

A figura 4.3 mostra a força transmitida à mola em $x = 0$ em função do deslizamento em $x = L_b$, também para o comprimento colado de 250 mm. É possível verificar que o declive desta reta é a constante elástica da mola (k) que, neste caso, é 12,12 kN/mm.

A figura 4.4 mostra a tensão normal no compósito em função da extensão. É possível verificar que a tensão normal no compósito aumenta linearmente com a extensão. O declive desta reta é o módulo de Young (E).

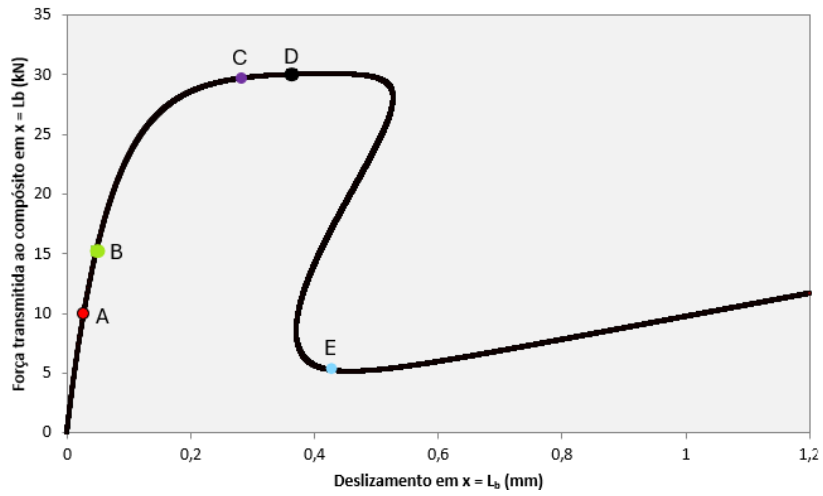


Figura 4.2 – Curva analítica da força transmitida no compósito em $x = L_b$ vs. deslizamento em $x = L_b$.

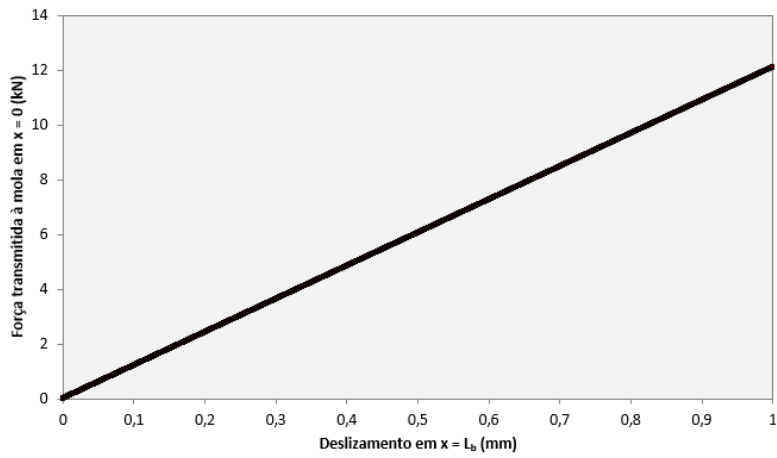


Figura 4.3 – Gráfico da força transmitida à mola em $x = 0$ vs. deslizamento em $x = L_b$.

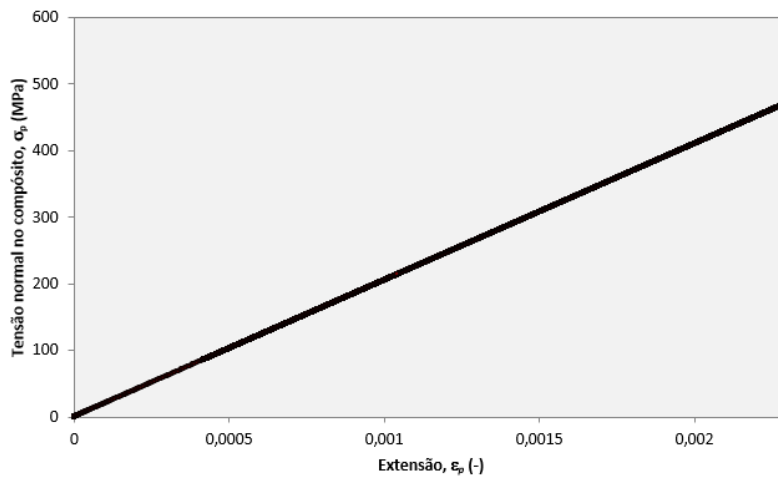


Figura 4.4 – Gráfico da tensão normal no compósito vs. extensão.

Foram obtidas 5 curvas diferentes para: $s < s_{max}$, $s = s_{max}$, $s_{max} < s < s_{ult}$, $s = s_{ult}$ e para $s > s_{ult}$. Foram escolhidos cinco pontos: A, B, C, D e E. Os deslocamentos destes pontos são os seguintes: $s_A = 0,027$ mm; $s_B = 0,047$ mm; $s_C = 0,281$ mm; $s_D = 0,363$ mm; $s_E = 0,422$ mm

Nas figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 as curvas de cor vermelha representam o ponto A, as curvas de cor verde representam o ponto B, as curvas de cor roxa representam o ponto C, as curvas de cor preta representam o ponto D e as curvas de cor azul representam o ponto E.

A figura 4.5 mostra os deslocamentos no compósito de FRP ao longo do comprimento colado. Como seria de esperar na extremidade livre $x = 0$ todos os pontos apresentam um deslocamento nulo. Com o aumento do comprimento colado, os deslocamentos vão aumentando, sendo o ponto E (a azul) o que apresenta um maior deslocamento e o ponto A (a vermelho) o que apresenta um menor deslocamento. Isto acontece uma vez que o compósito de FRP está a descolar do substrato.

A figura 4.6 mostra as extensões no compósito de FRP ao longo do comprimento colado. Verifica-se que o ponto A (a vermelho) apresenta um patamar praticamente constante entre 0 e 200 mm. Esta ponto não apresenta um patamar constante a partir de 200 mm, sendo que vai aumentando dos 200 mm até chegar aos 250 mm.

A figura 4.7 mostra as extensões no substrato ao longo do comprimento colado. Nesta figura os valores de todos os gráficos são negativos uma vez que o substrato está sujeito à compressão.

A figura 4.8 mostra as tensões de aderência ao longo do comprimento colado. É possível verificar que com o aumento do deslocamento os gráficos deslocam-se para a esquerda uma vez que dizem respeito ao processo de descolamento da ligação, ou seja, com deslocamentos maiores, o descolamento da ligação está mais avançado.

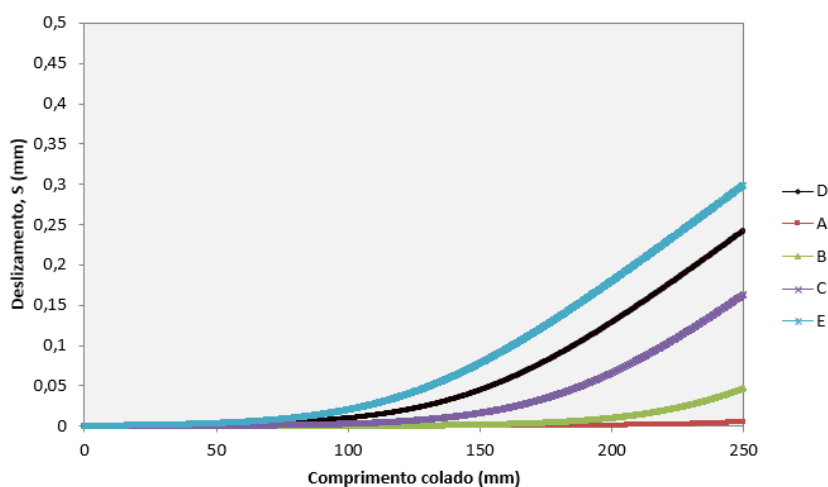


Figura 4.5 – Distribuição de deslocamentos ao longo do comprimento colado de 250 mm

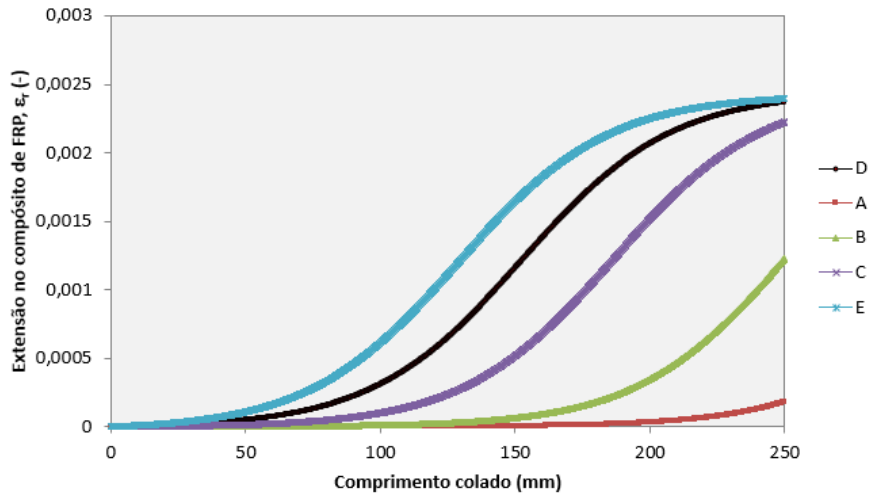


Figura 4.6 – Distribuição de extensões no compósito ao longo do comprimento colado de 250 mm

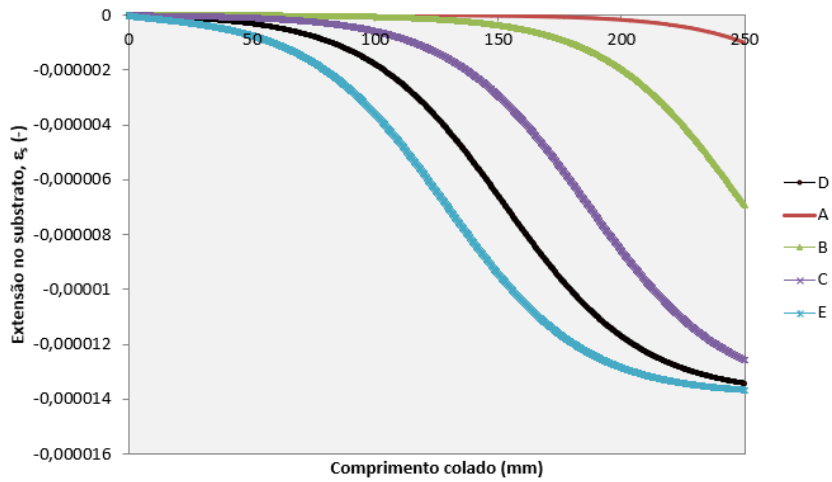


Figura 4.7 – Distribuição de extensões no substrato ao longo do comprimento colado de 250 mm

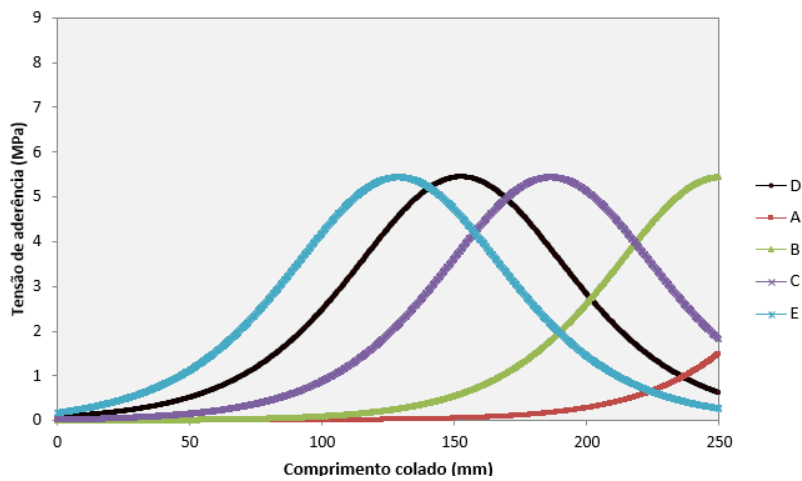


Figura 4.8 – Distribuição de tensões de aderência ao longo do comprimento colado de 250 mm

4.4 Amostras com comprimento colado de 50 mm

Na figura 4.9 está representada a força transmitida ao compósito em $x = L_b$ em função do deslizamento em $x = L_b$ para o comprimento colado de 50 mm. É possível perceber que inicialmente a força aumenta linearmente com o deslizamento. Após isso, o aumento do deslizamento na extremidade livre $x = 0$ provoca uma diminuição na força até ser atingido um ponto em que a força volta a aumentar linearmente com o deslizamento.

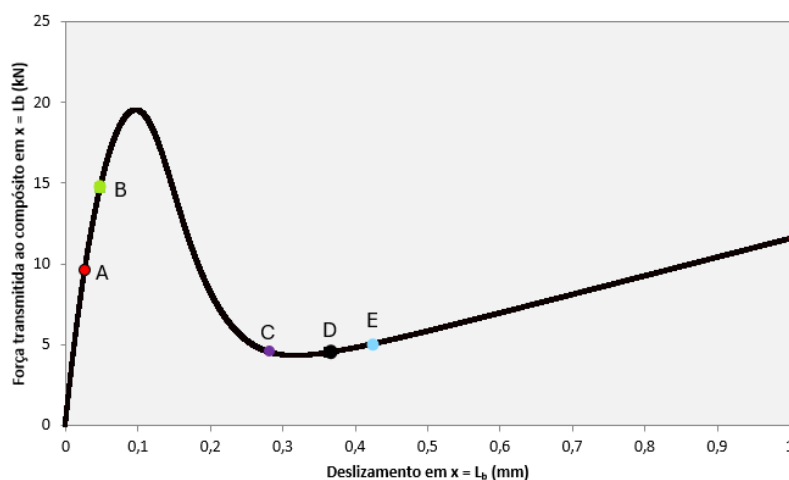


Figura 4.9 – Curva analítica da força transmitida no compósito em $x = L_b$ vs. deslizamento em $x = L_b$.

Foram obtidas 5 curvas diferentes para: $s < s_{max}$, $s = s_{max}$, $s_{max} < s < s_{ult}$, $s = s_{ult}$ e para $s > s_{ult}$. Foram escolhidos cinco pontos: A, B, C, D e E. Os deslizamentos destes pontos são os seguintes: $s_A = 0,027$ mm; $s_B = 0,047$ mm; $s_C = 0,281$ mm; $s_D = 0,363$ mm; $s_E = 0,422$ mm.

Nas figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 as curvas de cor vermelha representam o ponto A, as curvas de cor verde representam o ponto B, as curvas de cor roxa representam o ponto C, as curvas de cor preta representam o ponto D e as curvas de cor azul representam o ponto E.

A figura 4.10 mostra os deslizamentos no compósito de FRP ao longo do comprimento colado. Tal como no caso em que o comprimento colado é de 250 mm, na extremidade livre $x = 0$ todos os pontos apresentam um deslizamento praticamente nulo. Com o aumento do comprimento colado, os deslizamentos vão aumentando, sendo o ponto E (a azul) o que apresenta um maior deslizamento e o ponto A (a vermelho) o que apresenta um menor deslizamento. Isto acontece uma vez que o compósito de FRP está a descolar do substrato.

A figura 4.11 mostra as extensões no compósito de FRP ao longo do comprimento colado. Verifica-se que o ponto A (a vermelho) apresenta um patamar praticamente constante entre 0 e 50 mm e o ponto E (a azul) é o que apresenta uma maior extensão entre 0 e 50 mm.

A figura 4.12 mostra as extensões no substrato ao longo do comprimento colado. Tal como no caso em que o comprimento colado é de 250 mm, o substrato está sujeito à compressão e, por isso, os valores de todos os gráficos são negativos.

A figura 4.13 mostra as tensões de aderência ao longo do comprimento colado. É possível verificar que o ponto E (a azul) é o que apresenta uma maior tensão de aderência.

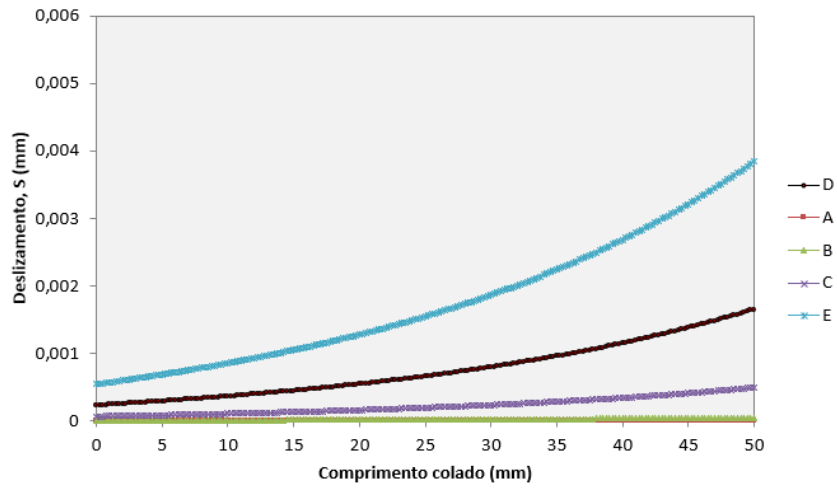


Figura 4.10 – Distribuição de deslizamentos ao longo do comprimento colado de 50 mm

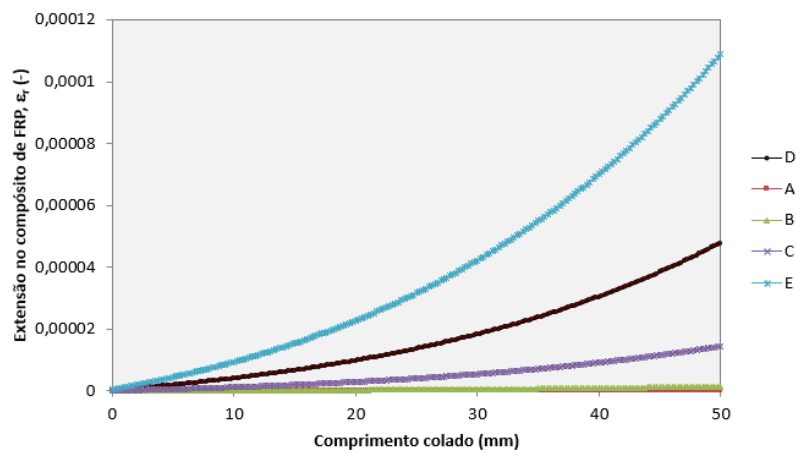


Figura 4.11 – Distribuição das extensões no compósito ao longo do comprimento colado de 50 mm

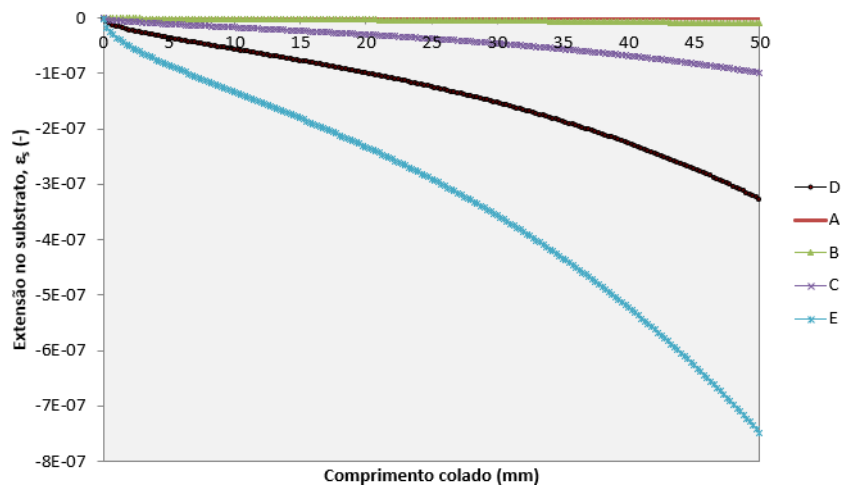


Figura 4.12 – Distribuição das extensões no substrato ao longo do comprimento colado de 50 mm

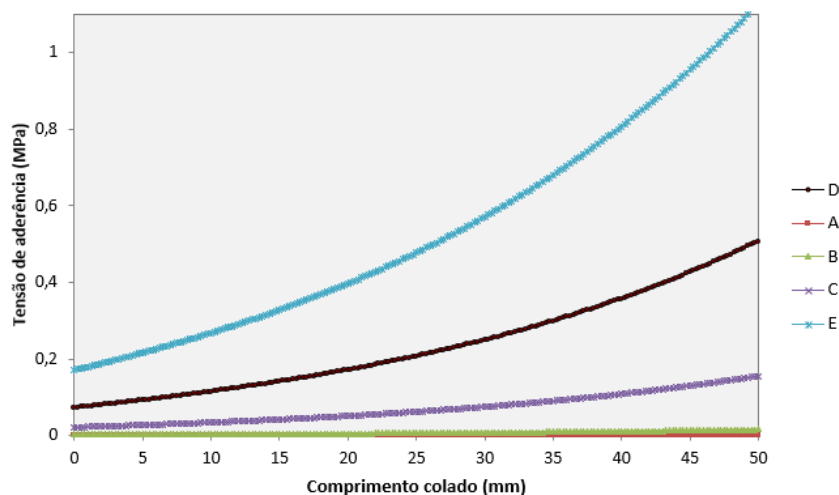


Figura 4.13 – Distribuição de tensões de aderência ao longo do comprimento colado de 50 mm

4.5 Comparação com outros estudos

Nesta seção pretende-se comparar o modelo analítico desta dissertação com outros estudos já existentes na literatura. Assim, decidiu-se comparar o modelo desta dissertação com os modelos desenvolvidos por Ueda e Dai [21], por Biscaia et al [22] e por Lu et al [26].

4.5.1 Comparação com o modelo analítico proposto por Ueda e Dai

Decidiu-se confrontar os resultados obtidos pelo modelo analítico proposto com o modelo analítico proposto por Ueda e Dai [21]. Este modelo é válido quando as características da ligação entre o laminado de FRP e o aço se mantêm uniformes ao longo da largura do laminado, ou seja, é válido apenas nos casos em que o comprimento colado é superior ao comprimento efetivo da ligação.

Os parâmetros utilizados foram os seguintes: $t_p = 1,4$ mm, $b_p = 10$ mm, $t_s = 300$ mm, $b_s = 300$ mm, $E_p = 159$ GPa, $E_s = 29$ GPa, $\tau_{max} = 10,19$ MPa, $s_{max} = 0.062$ mm, $G_f = 1,836$ N/mm e $B = 11,1$ mm⁻¹.

A figura 4.14 mostra a curva força vs. deslizamento para um comprimento colado de 250 mm e a figura 4.15 mostra a curva força vs. deslizamento para um comprimento colado de 50 mm. Em ambas as figuras a curva a preto representa o modelo analítico proposto e a curva a azul representa o modelo de Ueda e Dai [21].

A partir da figura 4.14, em que o comprimento colado é superior ao efetivo, ou seja, em que o comprimento colado é 250 mm, é possível perceber que os dois modelos são iguais até a força máxima ser atingida. Após este momento, o modelo de Ueda e Dai [21] não consegue prever o pós-colapso, ao contrário do modelo analítico proposto.

A partir da figura 4.15, em que o comprimento colado é inferior ao efetivo, ou seja, em que o comprimento colado é 50 mm, o modelo de Ueda e Dai [21] apresenta uma curva igual à do comprimento colado de 250 mm. Neste caso, o modelo de Ueda e Dai [21] não consegue prever a força máxima para comprimentos pequenos, ao contrário do modelo analítico proposto.

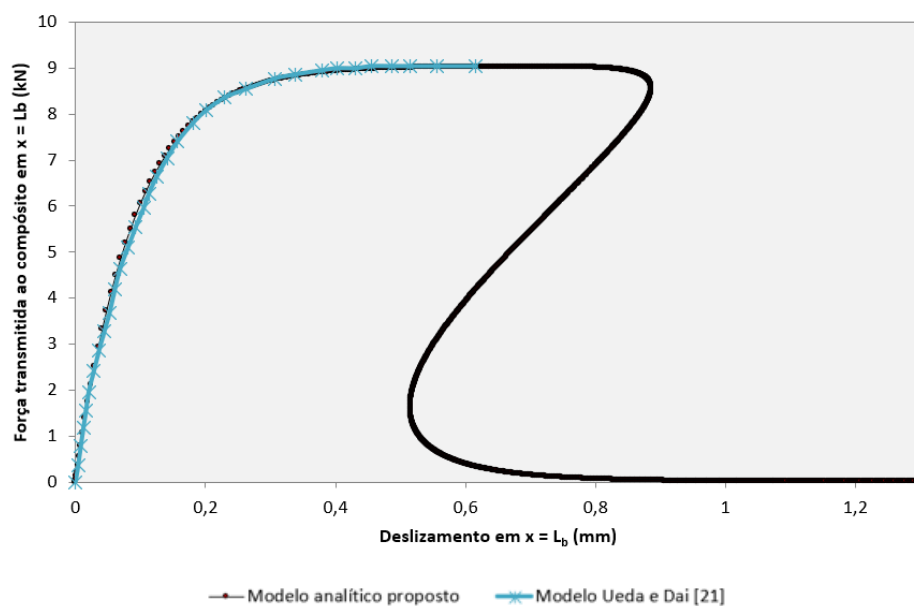


Figura 4.14 – Curva força vs. deslizamento para um comprimento colado de 250 mm.

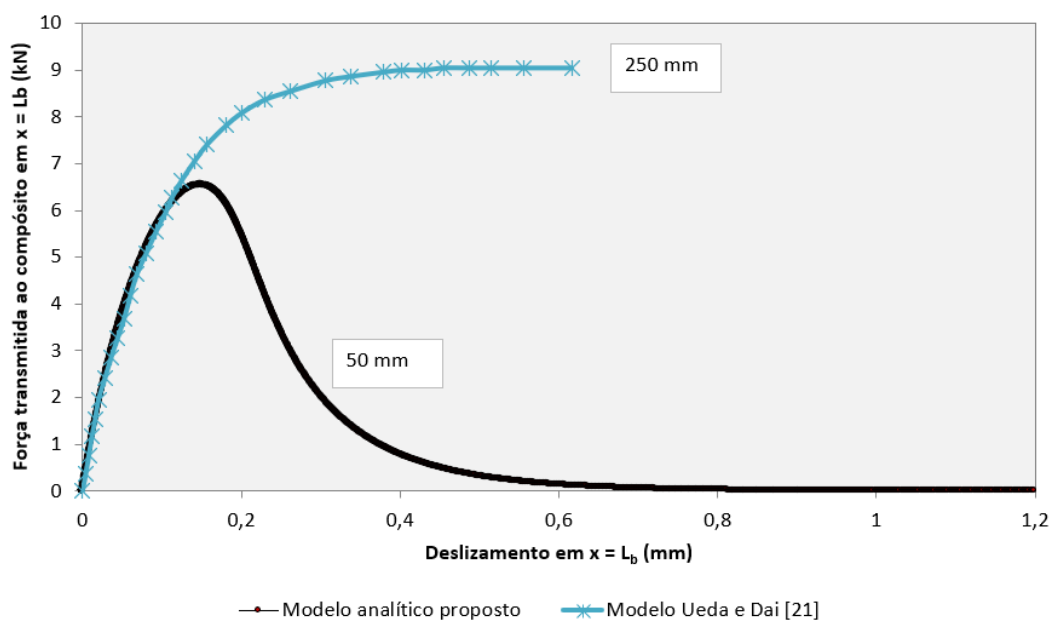


Figura 4.15 – Curva força vs. deslizamento para um comprimento colado de 50 mm.

4.5.2 Comparação com Biscaia et al

Decidiu-se confrontar os resultados obtidos pelo modelo analítico proposto com o modelo numérico proposto por Biscaia et al [22]. Este modelo utiliza a fórmula de Popovics para descrever o comportamento da ligação entre o compósito de FRP e o substrato de aço.

O modelo analítico proposto é comparado com os resultados numéricos de Biscaia et al [22]. Os parâmetros utilizados foram os definidos em [22]: $t_p = 2,54$ mm, $b_p = 80$ mm, $E_p = 20,39$ GPa, $\tau_{max} = 4,24$ MPa, $s_{max} = 0,101$ mm, $s_{ult} = 0,720$ mm e $G_f = 1,236$ N/mm

A figura 4.16 mostra a comparação do modelo analítico proposto com o modelo numérico de Biscaia et al [22]. A curva a preto representa o modelo analítico proposto e a curva azul representa o modelo de Biscaia et al [22].

A partir da figura 4.16 é possível perceber que os modelos analíticos e numéricos são bastante semelhantes. As diferenças encontradas são devido à limitação do deslizamento no modelo *bond-slip*, ou seja, no modelo de Biscaia et al [22] o início do descolamento foi definido para $s_{ult} = 0,720$ mm, ao contrário do modelo analítico proposto nesta dissertação em que não foi imposto qualquer limitação.

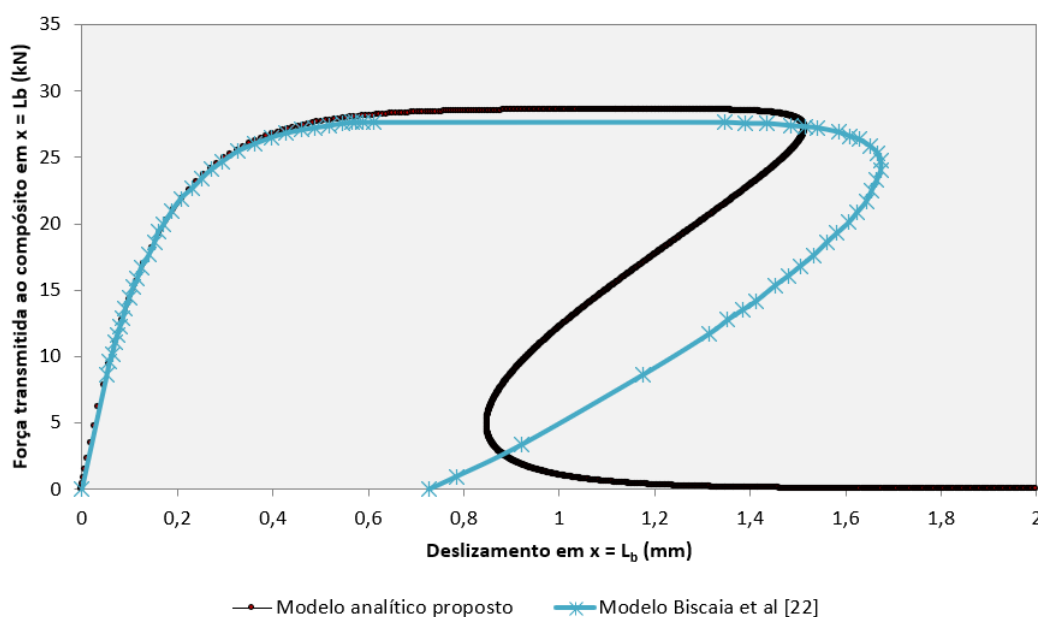


Figura 4.16 – Comparação do modelo analítico proposto com o modelo numérico de Biscaia et al [22]

4.5.3 Comparação com Lu et al

Decidiu-se confrontar os resultados obtidos pelo modelo analítico proposto com os resultados experimentais e analíticos de Lu et al [26].

Cada ensaio de corte simples foi constituído por um compósito CFRP com espessura de 1,2 mm e largura de 50 mm colado a um bloco de betão com espessura de 300 mm, largura de 220 mm e comprimento de 700 mm ao longo de um comprimento colado de 300 mm. O módulo de Young para o compósito de CFRP é de 205 GPa e para o betão é de 33 GPa.

Foi assumida uma lei de aderência triangular com os seguintes parâmetros: $\tau_{max} = 5,44$ MPa, $s_{max} = 0,071$ mm e $s_{ult} = 0,273$ mm como se consegue perceber pela figura 4.17a.

Como se consegue verificar pela figura 4.17b tanto a proposta analítica de Lu et al [26] como a proposta analítica proposta nesta dissertação fornecem resultados bastante semelhantes e consistentes com os resultados experimentais.

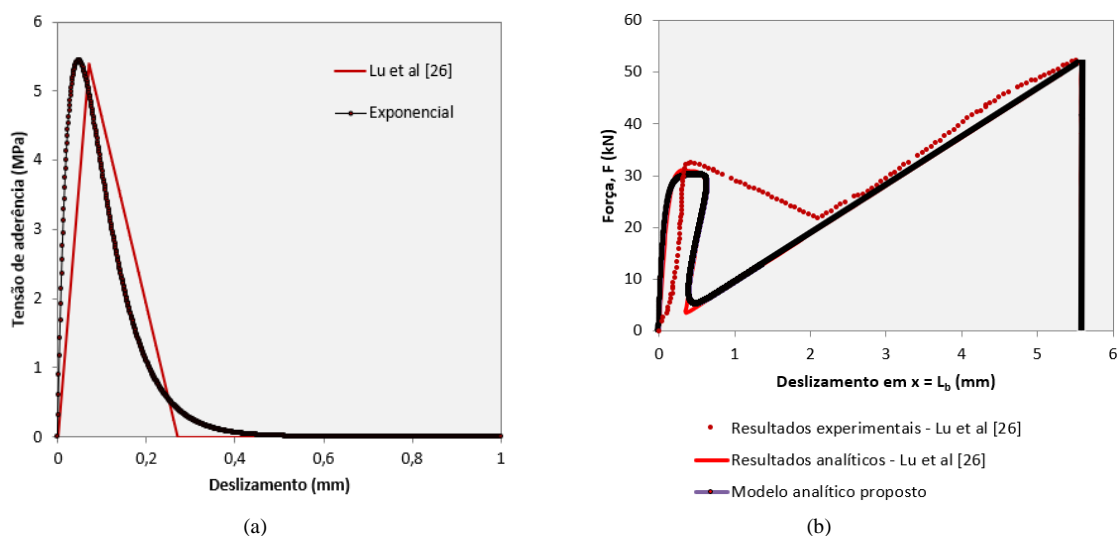


Figura 4.17 – Comparação com o trabalho de Lu et al [26]: (a) relação entre as leis bond-slip, (b) relação entre as curvas força-deslizamento

Lu et al [26] também relataram a tensão axial e a tensão de aderência para quatro forças diferentes, nomeadamente para 10,54 kN, 21,84 kN, 29,01 kN e 35,90 kN.

Como se consegue perceber pela figura 4.18, com a abordagem analítica proposta as tensões axiais estão consistentes com os resultados experimentais. Para as forças de 10,54 kN e 21,84 kN as tensões axiais só se começam a desenvolver no fim da extremidade do compósito de CFRP. No entanto, para a força de 29,01 kN as tensões axiais começam a desenvolver-se mais cedo e para a força de 35,90 kN o compósito de CFRP já está totalmente descolado.

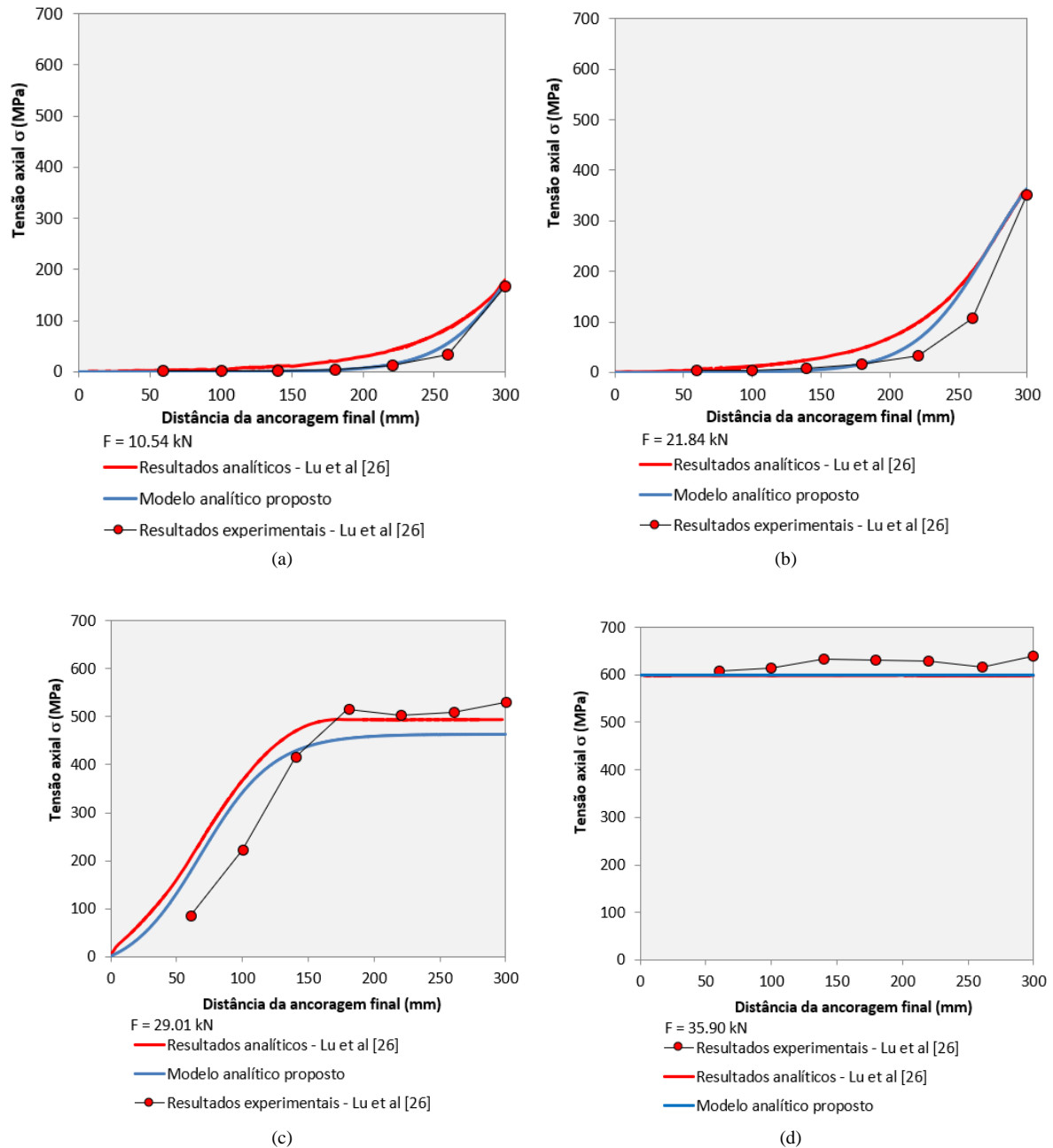


Figura 4.18 – Comparação com as tensões axiais desenvolvidas ao longo do comprimento colado:
(a) $F = 10,54$ kN; (b) $F = 21,84$ kN; (c) $F = 29,01$ kN; (d) $F = 35,90$ kN.

A figura 4.19 mostra a comparação com as tensões de aderência desenvolvidas ao longo do comprimento colado. É possível verificar que para a força de 29,01 kN é possível observar três estágios definidos pela lei de aderência triangular, nomeadamente o estágio elástico, o estágio de amolecimento e o estágio de descolamento e as transições de um estágio para o outro.

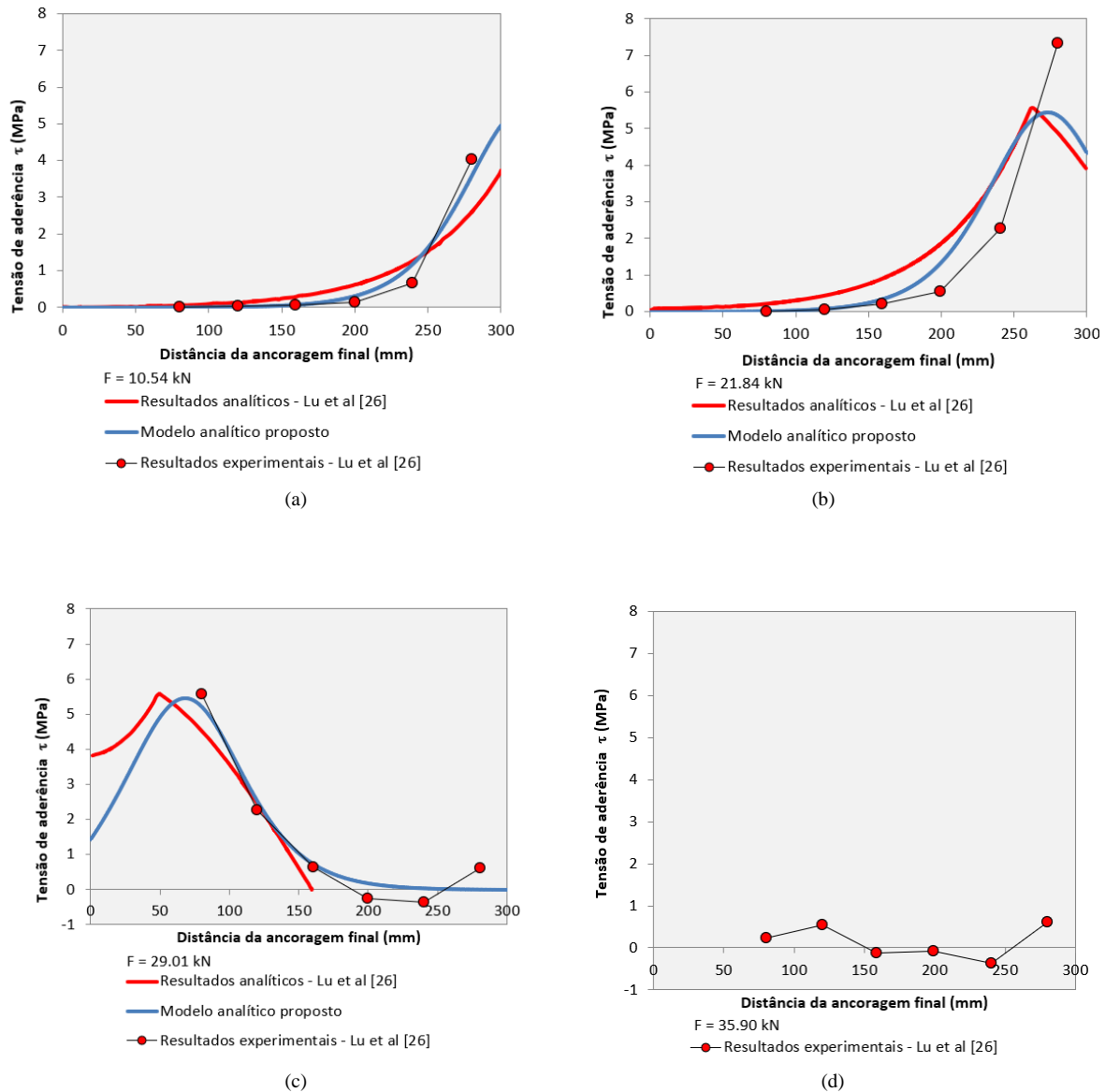


Figura 4.19 – Comparação com as tensões de aderência desenvolvidas ao longo do comprimento colado: (a) $F = 10,54$ kN; (b) $F = 21,84$ kN; (c) $F = 29,01$ kN, (d) $F = 35,90$ kN

Lu et al [26] realizaram também um teste paramétrico em que verificaram os efeitos do comprimento colado, da rigidez da ancoragem final e da rigidez do compósito de FRP. Foram estudados quatro casos diferentes com diferentes rigidezes da ancoragem final, nomeadamente para 0 N/mm, 6500 N/mm, 12100 N/mm e 18150 N/mm. Como se consegue perceber pela figura 4.20a, a força limite aumentou com a rigidez da ancoragem final.

Como se consegue verificar pela figura 4.20b pode-se observar dois casos diferentes: o primeiro em que a força final corresponde à força máxima necessária para descolar o compósito de FRP do substrato. Neste caso, no instante em que a mola falha, a força é menor que a força descolada e, portanto, a ancoragem final é inútil, pois esta não é capaz de aumentar a resistência da junta. O segundo caso é o caso em que a força final é maior que a força máxima necessária para descolar o compósito de FRP do substrato e a força final foi aumentada devido à influência da ancoragem final. Assim a ancoragem melhora o desempenho de ligação da junta colada mecanicamente ancorada [32].

Para calcular a rigidez mínima da ancoragem final, a força descolada deve ser igual à força final dada pela Equação seguinte:

$$P_1 = ks_0 \quad (4.2)$$

Portanto, considerando que a força descolada pode ser dada por [28]:

$$F_{descolada} = \begin{cases} b_p \cdot \sqrt{2G_f \cdot E_p \cdot t_p \cdot (1+r)} & \text{se } L_b \geq L_{eff} \\ \beta_L \cdot b_p \cdot \sqrt{2G_f \cdot E_p \cdot t_p \cdot (1+r)} & \text{se } L_b < L_{eff} \end{cases} \quad (4.3)$$

Igualando a Equação (4.3) à Equação (4.2), a rigidez efetiva da ancoragem final (k_{eff}), ou seja, a rigidez além da qual a ancoragem final pode realmente melhorar a carga transmitida ao compósito de FRP é dada pela seguinte expressão:

$$k_{eff} = \begin{cases} \frac{b_p \cdot \sqrt{2G_f \cdot E_p \cdot t_p \cdot (1+r)}}{s_0} & \text{se } L_b \geq L_{eff} \\ \frac{\beta_L \cdot b_p \cdot \sqrt{2G_f \cdot E_p \cdot t_p \cdot (1+r)}}{s_0} & \text{se } L_b < L_{eff} \end{cases} \quad (4.4)$$

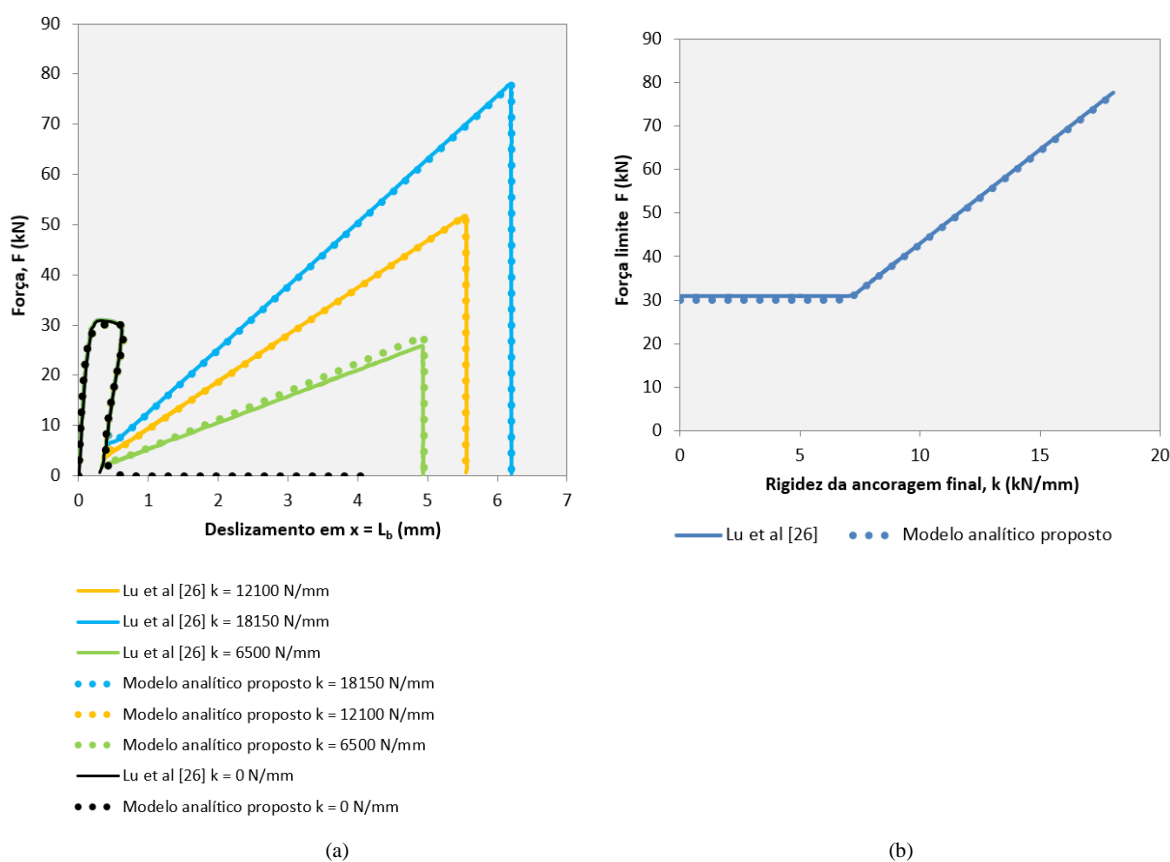


Figura 4.20 – Efeito da rigidez da ancoragem final (k): (a) comparação com as curvas força-deslizamento; (b) comparação com a força limite.

A figura 4.21 mostra o efeito do comprimento colado das juntas coladas mecanicamente ancoradas com diferentes comprimentos colados de 200 mm, 300 mm, 400 mm e 500 mm. É possível verificar que os resultados obtidos pelo modelo analítico proposto nesta dissertação

estão consistentes com os resultados obtidos por Lu et al [26] e que o aumento no comprimento colado não aumenta a força final.

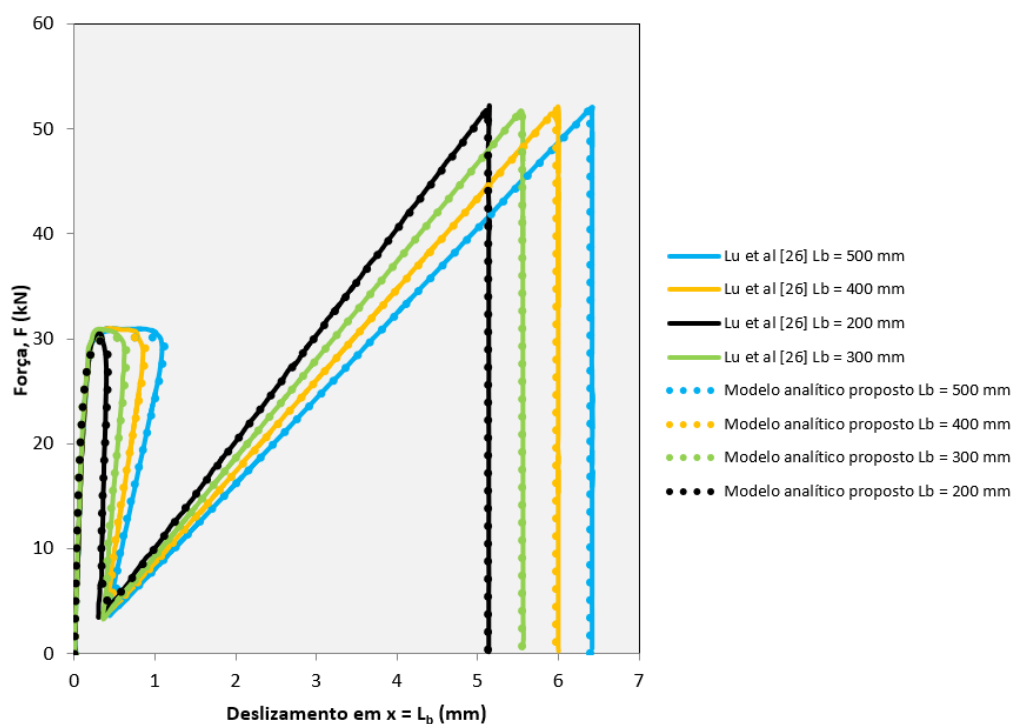


Figura 4.21 – Efeito do comprimento colado das juntas coladas mecanicamente ancoradas com diferentes comprimentos colados de 200 mm, 300 mm, 400 mm e 500 mm.

A figura 4.22 mostra o efeito da rigidez do reforço ($E_r t_r$) para quatro casos diferentes, nomeadamente para 12300 N/mm, 24600 N/mm, 49200 N/mm e 73800 N/mm com $r = 0,003$, 0,006, 0,011 e 0,017 respetivamente e para um comprimento colado fixo de 300 mm. Os resultados obtidos a partir da abordagem analítica proposta nesta dissertação estão consistentes com os resultados obtidos por Lu et al [26]. Pode-se observar que o aumento da rigidez do FRP aumenta a força descolada.

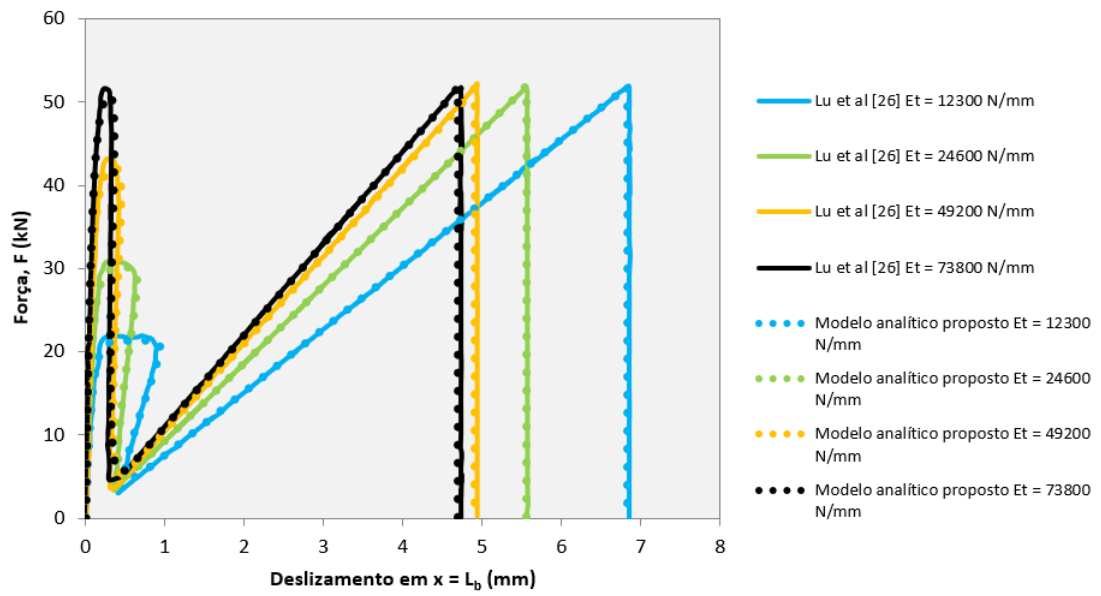


Figura 4.22 – Efeito da rigidez do reforço.

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No presente capítulo são sintetizadas algumas conclusões que podem ser retiradas deste trabalho através do modelo analítico proposto. Apresentam-se também alguns aspetos que se pode ter em conta na realização de trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

O modelo analítico proposto é baseado numa lei de aderência do tipo exponencial e bi-linear entre FRP e aço e descreve o desempenho de deslizamentos da ligação entre FRP e aço. Os resultados obtidos permitem retirar as seguintes conclusões:

- O modelo analítico proposto permite prever o pós-coloapso da interface FRP/aço e identificar o fenómeno de *snap-back*. Este modelo é válido para qualquer comprimento colado do FRP.
- A partir do modelo analítico, verifica-se que a força transmitida ao compósito de FRP aumenta sempre para qualquer comprimento colado até à força de rotura do FRP. Contudo, a resistência da ligação não aumenta a partir de um certo comprimento colado, que é o comprimento efetivo de ligação.
- Foram também obtidas as expressões analíticas do deslizamento, da extensão e da tensão de aderência. Estas expressões permitem prever o processo de descolamento da interface FRP/substrato.
- O modelo analítico proposto foi comparado com o modelo analítico de Ueda e Dai [21]. Estes dois modelos são iguais até a força máxima ser atingida. No entanto, o modelo de Ueda e Dai [21] não consegue prever o pós-coloapso, ao contrário do modelo analítico proposto.
- O modelo analítico proposto foi também comparado ao modelo numérico de Biscaia et al [22]. Os modelos analíticos e numéricos são bastante semelhantes, sendo que as diferenças encontradas são devido à limitação do deslizamento no modelo *bond-slip*, ou seja, no modelo de Biscaia et al [22] o início do descolamento foi definido para $s_{ult} = 0,720$ mm, ao contrário do modelo analítico proposto nesta dissertação em que não foi imposto qualquer limitação.
- Comparou-se também o modelo analítico proposto com os resultados experimentais e analíticos de Lu et al [26]. Verificou-se que os resultados obtidos pelo modelo analítico proposto nesta dissertação estão consistentes com os resultados obtidos por Lu et al [26].

5.2 Futuros desenvolvimentos

Neste trabalho foram cumpridos os objetivos propostos inicialmente. Algumas sugestões que se podem usar nos trabalhos a desenvolver futuramente são:

- Usar uma ancoragem que tenha comportamento não linear.
- Realizar trabalhos que passam pela simulação computacional e numérica de ligações coladas entre compósitos de FRP e um substrato com amarração.
- Realizar ensaios experimentais com diferentes tipos de ligação (com comportamento linear e com comportamento não linear).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Fonseca, S. C.: Materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras usados na engenharia civil: características e aplicações. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2005.
- [2] Correia, J., R.: Ciência e engenharia de materiais de construção: compósitos de matriz polimérica. Coleção Ensino da Ciência e da Tecnologia. Editoras M. Clara Gonçalves & Fernanda Margarido. Lisboa, Portugal: IST Press, 2012.
- [3] Biscaia, HC.: "Ligações coladas entre compósitos de FRP e outros materiais estruturais: estudo experimental vs. teórico", Tertúlias Sobre Experimentação – Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões (APAET), Instituto Politécnico de Setúbal, Maio 15, 2019.
- [4] Naderpour, H.; Nagai, K.; Fakharian, P.; Haji, M.: "Innovative models for prediction of compressive strength of FRP-confined circular reinforced concrete columns using soft computing methods", Composite Structures, 2019; vol.215:69-84.
- [5] Nanni, A.; Lopez, A.: "Validation of FRP composite technology through field testing", 16th World Conference on NDT - Montreal (Canada), 2004.
- [6] Borda, J.: "Perspetiva teórica de diferentes tipos de ligações coladas sujeitas a ações monotónicas". Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2022.
- [7] Silva, C.: "Comportamento de ligações adesivas entre compósitos de FRP e elementos estruturais de aço". Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2015.
- [8] Sousa, J.: "Durabilidade de perfis pultrudidos de veniléster reforçado com fibras de vidro (GFRP)". Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2011.
- [9] Zão, T.: "Desenvolvimento e caracterização de compósitos de polímeros bio-derivados reforçados com fibras para aplicações estruturais". Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2018.
- [10] Paiva, J.: "Comportamento mecânico de ligações coladas em materiais FRP". Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2017.
- [11] Mays, G. C., Hutchinson, A. R.: "Adhesives in civil engineering", Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1992; vol.4:116-179.
- [12] Kang, SG.; Kim, MG.; Kim, CG.: "Evaluation of cryogenic performance of adhesives using composite aluminum double-lap joints". Composite Structures, 2007; vol.78:440-446.
- [13] Tognan, G.: "Study of steel – glass fibre reinforced polymer (GFRP) bonded joints for the design of anchorage systems for flat bottom GFRP tanks subjected to seismic actions". Tese de Doutoramento, Universidade de Trieste, 2020.
- [14] Borba, M.: "Comportamento da ligação CFRP/betão em estruturas de betão armado". Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2015.
- [15] Yuan, H., Teng, J., Seracino, R.: "Full-range behavior of FPR-to-concrete bonded joints with end U-jacket", Engineering Structures, 2004; vol.26:553-565.
- [16] Biscaia, HC.; Chastre, C.; Silva, C.; Franco, N.; "Mechanical response of anchored FRP bonded joints: A nonlinear analytical approach", Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2018; vol.25:238-252.
- [17] Biscaia, HC.; Chastre, C.; Borba, M.; Silva, C.: "A nonlinear analytical model to predict the full-range debonding process of FRP-to-parent material interfaces free of any mechanical anchorage devices", Composite Structures, 2015; vol.138:52-63.
- [18] Yang, Y.: "Bond behavior and durability of CFRP-to-steel bonded joints under cyclic loading and freeze-thaw and salt fog". Tese de Doutoramento, Universidade Nova de Lisboa, 2018.

- [19] Dai, J.; Ueda, T.; Sato Y.: "Development of the nonlinear bond stress-slip model of fiber reinforced plastics sheet-concrete interfaces with a simple method". *Journal of Composites for Construction*, 2005; vol.9:52-62.
- [20] Mazzotti, C; Savoia, M; Ferracuti, B.: "An experimental study on delamination of FRP plates bonded to concrete". *Construction and Building Materials*, 2008; vol.22:1409-1421.
- [21] Dai, J., Ueda, T.; Sato, Y.: "Unified analytical approaches for determining shear bond characteristics of FRP-Concrete interfaces through pullout tests". *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2006; vol.4:133-145.
- [22] Biscaia, HC.; Chastre, C.; Viegas, A.: "A new discrete method to model FRP-to-parent material bonded joints". *Composite Structures*, 2015; vol.121:280-295.
- [23] Biscaia, HC.; Coelho, P.; Conde, F.; D'Antino, T.: "Theoretical study on the bond performance of CFRP-to-steel single-lap shear tests with multiple debonding defects". *Composite Structures*, 2024; vol.345:118406.
- [24] Biscaia, HC.: "The influence of temperature variations on adhesively bonded structures: A non-linear theoretical perspective". *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2019; vol.113:67-85.
- [25] Biscaia, HC.; Canejo, J.; Zhang, S.; Almeida, R.: "Using digital image correlation to evaluate the bond between carbon fibre-reinforced polymers and timber". *Structural Health Monitoring*, 2021; vol.21:534-557.
- [26] Lu, T.; Li, P.; Cui, C.; Wu, J.; Fu B.: "Shear transferring mechanism of the FPR-to-concrete bonded joint with end U-jacketing: A theoretical study". *Composite Structures*, 2023; vol.56, 104991.
- [27] Freddi, F; Savoia, M.: "Analysis of FRP-concrete debonding via boundary integral equations". *Engineering Fracture Mechanics*, 2008; vol.75:1666-1683.
- [28] Biscaia, HC; Chastre, C; Silva, MAG.: "Nonlinear numerical analysis of the debonding failure process of FRP-to-concrete interfaces". *Composites Part B: Engineering*, 2013; vol.50, 210-223.
- [29] Neubauer, U; Rostásy, FS.: "Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP-plates". In: *Proceedings of the 7th international conference on structural faults and repairs*, 1997; vol. 2:109-118.
- [30] Teng, JG; Chen, JF; Smith, ST; Lam L.: "FRP strengthened RC structures" John Wiley and Sons Ltd., Chichester (England), 2001.
- [31] Biscaia, HC.: "Rotura por perda de aderência entre reforços poliméricos com fibras de vidro e elementos estruturais de betão", Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2006.
- [32] Biscaia, HC.; Dai, J.: "An innovative wide-ranging analytical approach for modelling the bond behaviour of frp-to-substrate joints with an elastic end anchorage". *Engineering Fracture Mechanics*, 2025; vol.313:110662.