

Ligações coladas entre compósitos de FRP e outros materiais estruturais

Estudo experimental vs. teórico

Hugo C. Biscaia



Fluid and Structures Engineering, UNIDEMI
NOVA University of Lisbon, Portugal. E-mail: hb@fct.unl.pt



Tertúlias sobre experimentação
8 Maio 2019 | Escola Superior de Tecnologia de Setúbal

ÍNDICE

» Introdução

(i) Objectivos da apresentação; (ii) Breve contexto da investigação; (iii) Técnicas convencionais de colagem; (iv) Tipos de ligações; (v) Algumas soluções de amarração; e (vi) Exemplo prático na indústria automóvel.

» Compósitos de FRP, Adesivos e Outros Materiais Estruturais

(i) Compósitos de FRP (CFRP, GFRP, AFRP); (ii) Adesivos; e (iii) Exemplos de materiais estruturais.

» Avaliação experimental da aderência

(i) Ligação rígida vs. Ligação não rígida; (ii) Modos de fractura; (iii) Idealização da ligação não rígida; (iv) Esquemas de ensaio para avaliar a aderência; (v) Diferentes factores que influenciam a ligação FRP/substrato; (vi) Determinação da Curva Extensão vs. Deslizamento; (vii) Determinação da relação Tensão de Aderência vs. Deslizamento; (viii) Distribuição das extensões no FRP ao longo do comprimento de colagem; (ix) Outras formas de determinação da lei local de aderência; (x) O comprimento efectivo; e (xi) Influência da temperatura.

» Modelação

(i) Tipos de modelação; (ii) Exemplo (Modelos orientados para o dimensionamento); (iii) Simulação do descolamento numa ligação colada FRP/substrato; (iv) Melhorando a performance da ligação CFRP/madeira através da instalação de ancoragem mecânica.

» (Breves) Conclusões gerais & trabalhos futuros

Objectivos da apresentação

1. Mostrar os diferentes tipos de ligações coladas bem como as suas vantagens e desvantagens;
2. Sugerir formas para colmatar algumas das desvantagens das ligações coladas;
3. Mostrar formas de avaliar, pela via experimental, a aderência entre dois materiais colados, mais concretamente entre um compósito de FRP e um outro material estrutural;
4. Identificar o comprimento efectivo de uma ligação colada;
5. Perceber a influência da temperatura na ligação colada;
6. Apresentar alguns desafios futuros.

Breve contexto da investigação

Da literatura verifica-se que os compósitos de FRP (Fiber Reinforced Polymers) têm sido utilizados na construção ou reparação de diversos elementos estruturais em diversas áreas da indústria, e.g. automóvel, eólicas, naval, construção civil ou aeronáutica.

Do sítio da internet do Scopus:

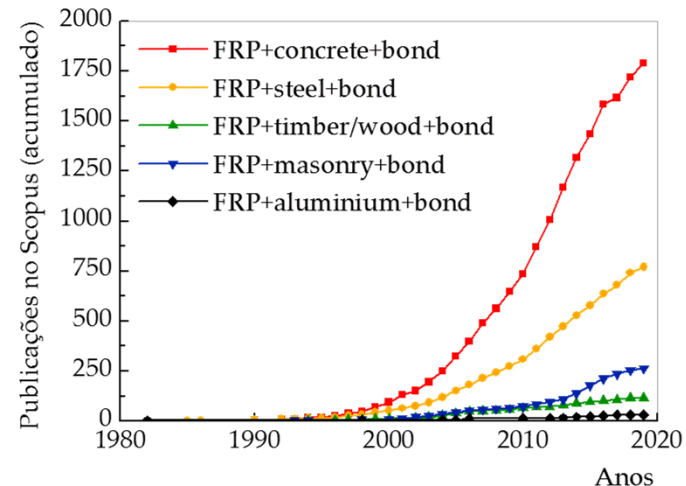
“FRP+bond+concrete” – 1788 documentos;

“FRP+bond+steel” – 770 documentos;

“FRP+bond+timber/wood” – 117 documentos;

“FRP+bond+masonry” – 263 documentos;

“FRP+bond+aluminium” – 30 documentos.

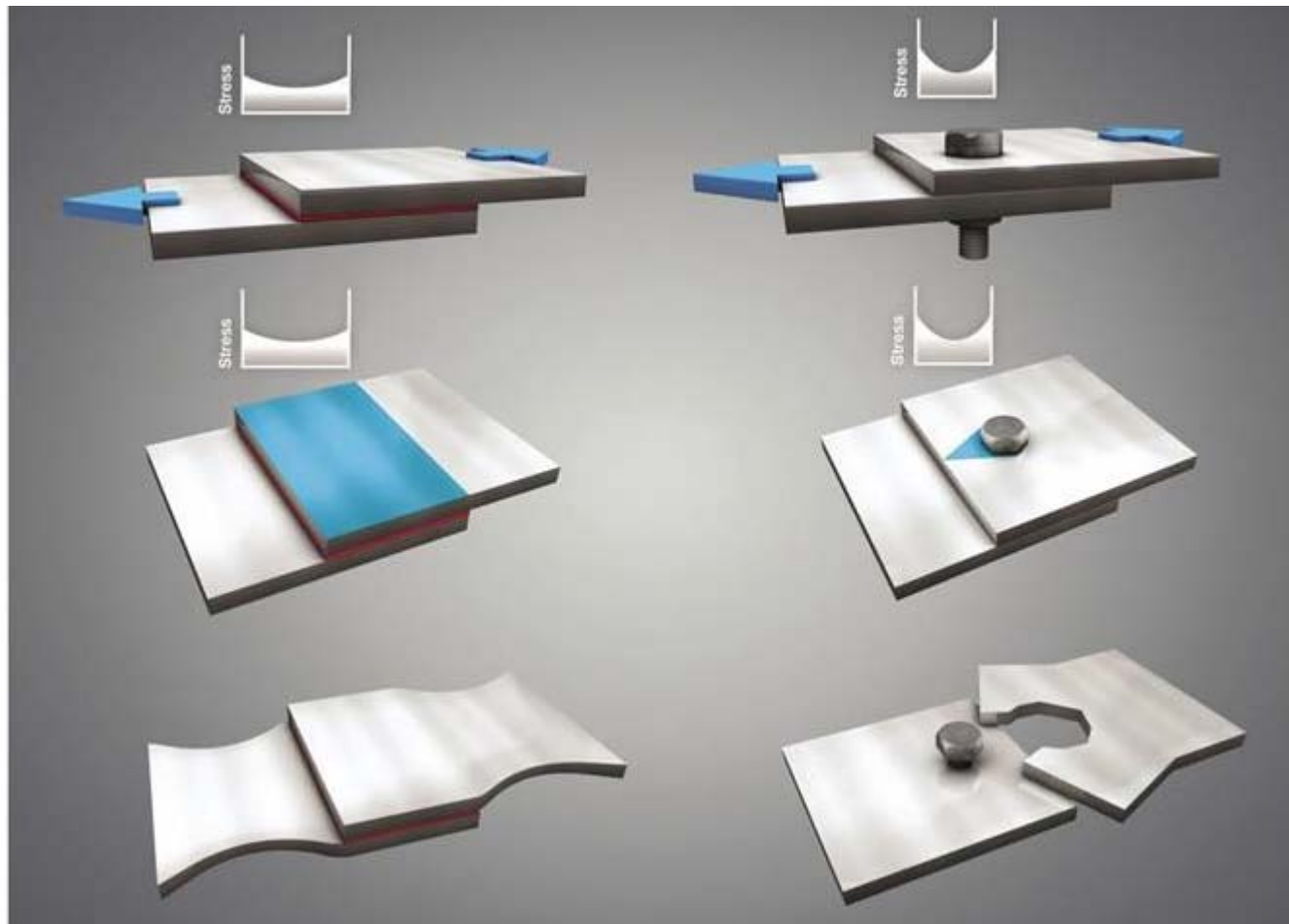


Principais vantagens de recorrer aos compósitos de FRP (quando comparados com outros materiais tradicionais como o aço):

- (i) relação resistência/peso ou relação rigidez/peso;
- (ii) a sua inerente resistência à corrosão;
- (iii) excelente performance quando sujeitos a efeitos de fadiga ou de durabilidade;
- (iv) elimina a concentração de tensões.

Breve contexto da investigação

Concentração de tensões: Colagem vs. Fixação mecânica (e.g. parafuso).



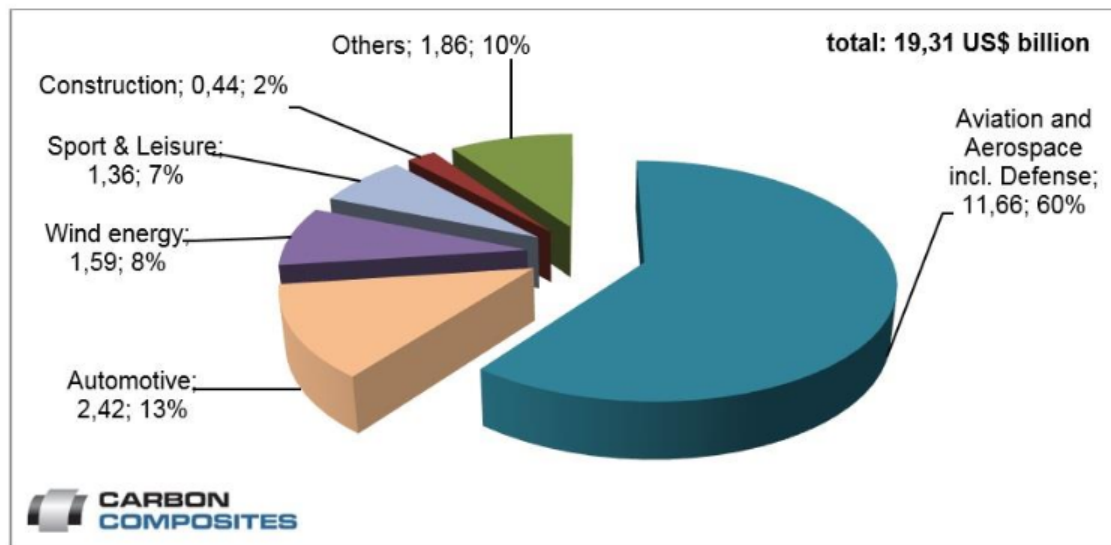
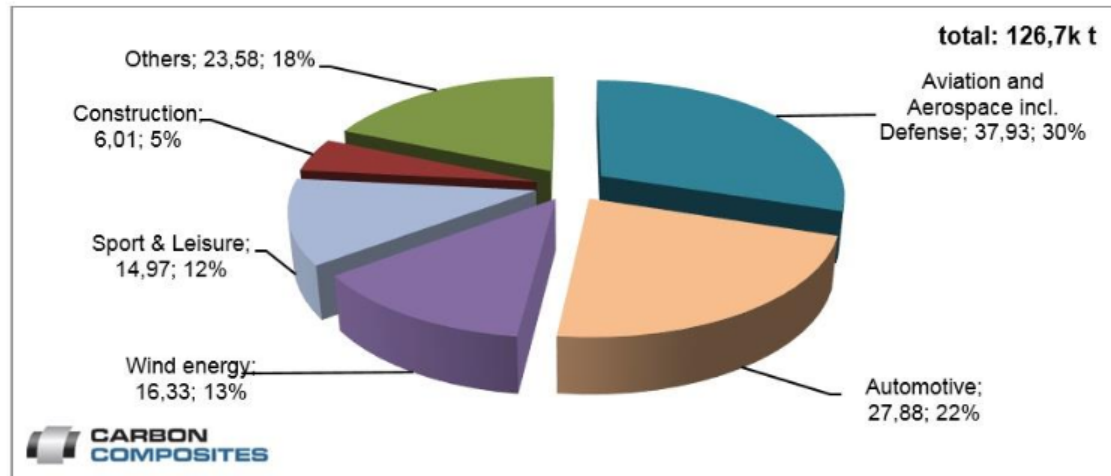
In <http://www.eurekamagazine.co.uk/design-engineering-features/technology/instant-fix-with-hidden-costs/88085/>

LIGAÇÕES COLADAS ENTRE COMPÓSITOS DE FRP E OUTROS MATERIAIS ESTRUTURAIS

» ESTUDO EXPERIMENTAL VS. TEÓRICO

Introdução | Compósitos de FRP, Adesivos e Outros Materiais Estruturais | Avaliação experimental da aderência | Modelação | (Breves) Conclusões gerais

Breve contexto da investigação



In <https://www.carbon-composites.eu/media/2997/ccev-avk-market-report-2017.pdf>

Breve contexto da investigação

Desvantagens importantes:

- (i) a utilização da capacidade mecânica dos compósitos de FRP é fortemente limitada pelo seu descolamento prematuro do substrato, isto é, o descolamento do FRP ocorre quando a extensão máxima nele instalada está ainda muito longe do seu valor de ruptura;
- (ii) susceptibilidade às variações (positivas) de temperatura;
- (iii) falta de ductilidade do FRP.

Possíveis soluções (em alternativa à técnica EBR, Externally Bonded Reinforcement): EBRIG, EBROG, NSM, CREatE, aumentar a largura do compósito, usar fixações adicionais de FRP, usar buchas, recorrer a ancoragens mecânicas (chapas de aço), melhorar os adesivos existentes, etc.

Desafio: eliminar o descolamento prematuro do compósito de FRP do substrato mediante qualquer acção a que a ligação esteja sujeita.

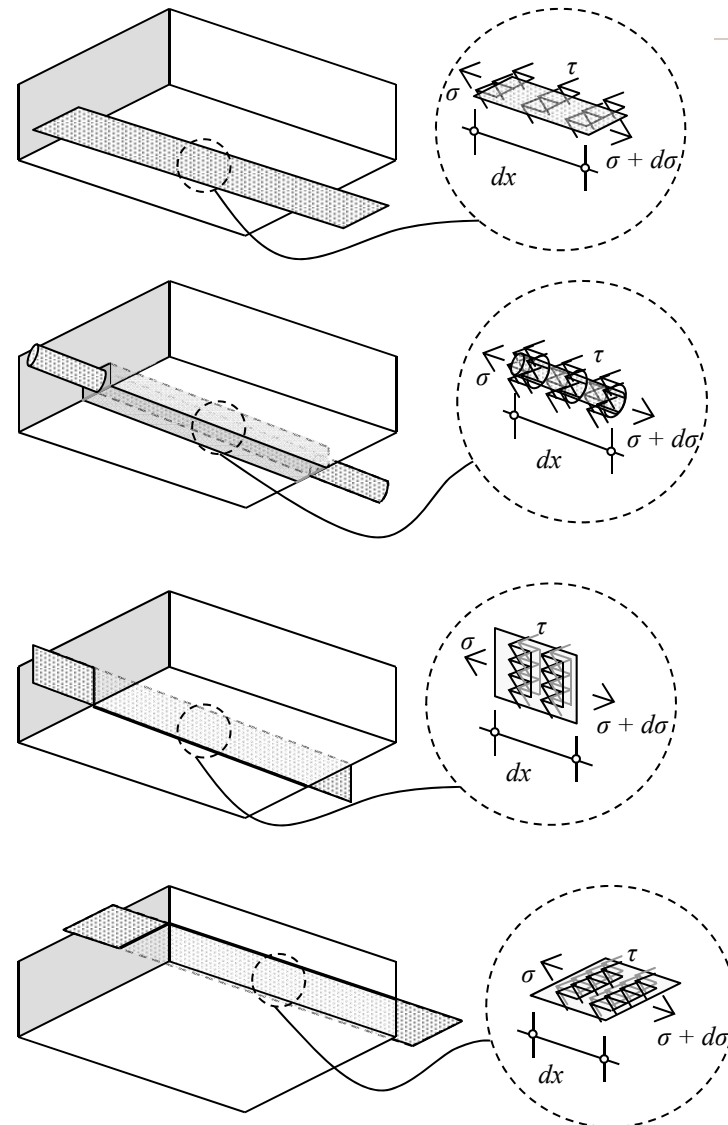
Técnicas convencionais de colagem

Externally Bonded Reinforcement (EBR): colagem do FRP pelo exterior do betão.

Near Surface Mounted (NSM) with composite rods: colagem pelo interior do betão de varões de FRP.

Vertical Near Surface Mounted (VNSM): colagem pelo interior do betão de laminados de FRP. A colocação do FRP faz-se pela maior inércia.

Horizontal Near Surface Mounted (HNSM): colagem pelo interior do betão de laminados de FRP. A colocação do FRP faz-se pela menor inércia.

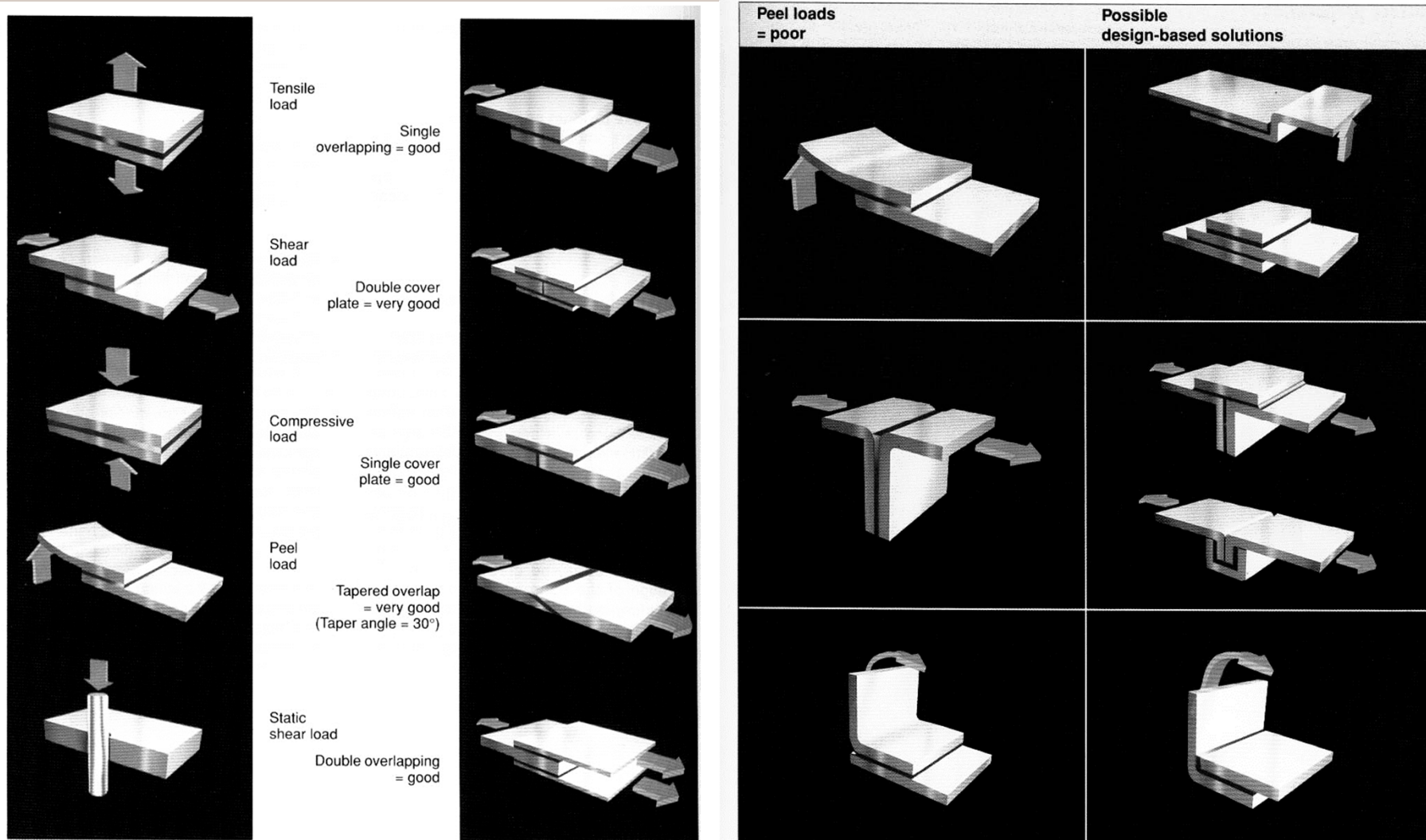


LIGAÇÕES COLADAS ENTRE COMPÓSITOS DE FRP E OUTROS MATERIAIS ESTRUTURAIS

» ESTUDO EXPERIMENTAL VS. TEÓRICO

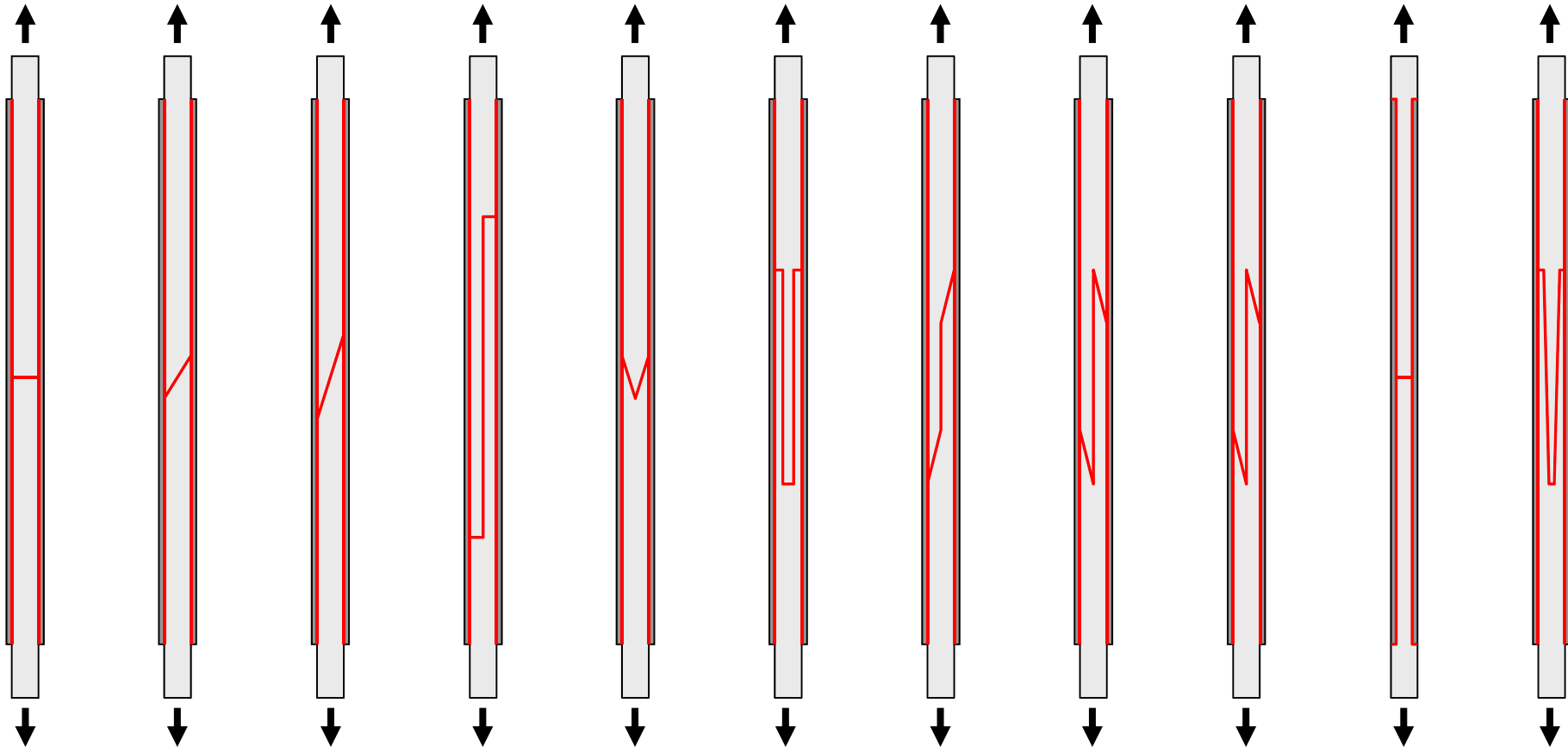
Introdução | Compósitos de FRP, Adesivos e Outros Materiais Estruturais | Avaliação experimental da aderência | Modelação | (Breves) Conclusões gerais

Tipos de ligações » Da literatura...



In <https://www.google.com> (search for: bonded joints)

Tipos de ligações

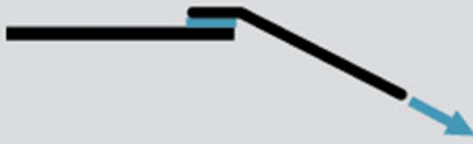

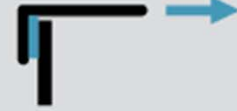
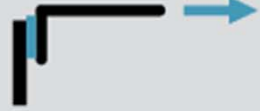






LIGAÇÕES COLADAS ENTRE COMPÓSITOS DE FRP E OUTROS MATERIAIS ESTRUTURAIS

» ESTUDO EXPERIMENTAL VS. TEÓRICO

Introdução | Compósitos de FRP, Adesivos e Outros Materiais Estruturais | Avaliação experimental da aderência | Modelação | (Breves) Conclusões gerais

Tipos de ligações » (Ainda) Da literatura...

Do	Don't
Compression & Shear 	Peel, Tension & Shear 
Compression 	Tension 
Compression & Shear 	Peel & Shear 
Compression & Shear 	Tension & Shear 

In <https://www.lord.com/products-and-solutions/adhesives/automotive-assembly-adhesives-joint-design-guidelines>

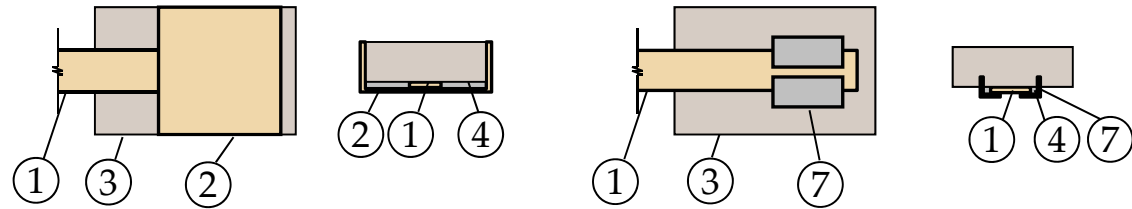
LIGAÇÕES COLADAS ENTRE COMPÓSITOS DE FRP E OUTROS MATERIAIS ESTRUTURAIS

» ESTUDO EXPERIMENTAL VS. TEÓRICO

Introdução | Compósitos de FRP, Adesivos e Outros Materiais Estruturais | Avaliação experimental da aderência | Modelação | (Breves) Conclusões gerais

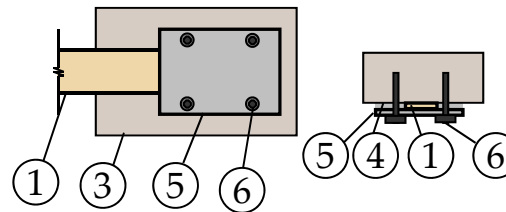
Algumas soluções de amarração

- 1 – Compósito de FRP.
- 2 – Tecido de FRP adicional.
- 3 – Substrato.
- 4 – Adesivo.
- 5 – Chapa de aço.
- 6 – Parafuso ou bucha (metálica ou química).
- 7 – Chapa de aço em “L” (cantoneira).
- 8 – Cilindro de aço.
- 9 – Fixação em FRP.

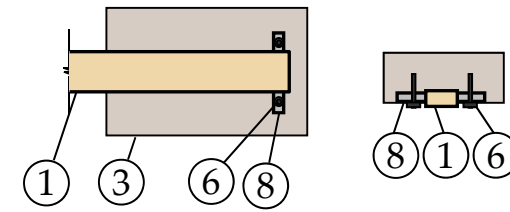


(a)

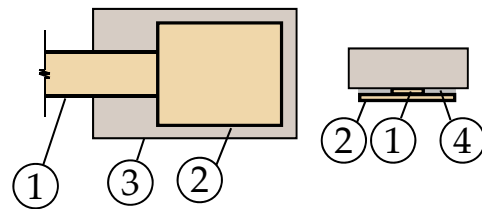
(e)



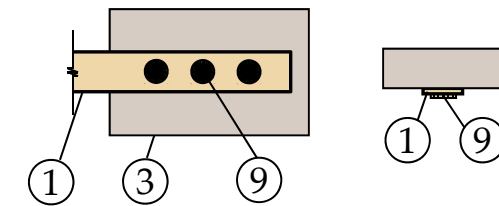
(b)



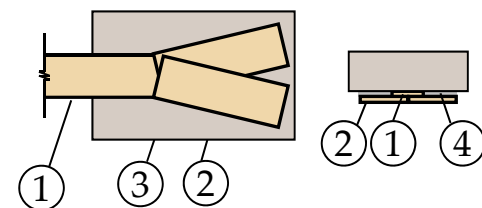
(f)



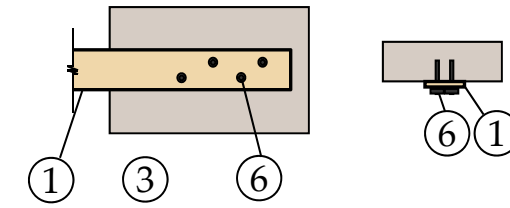
(c)



(g)



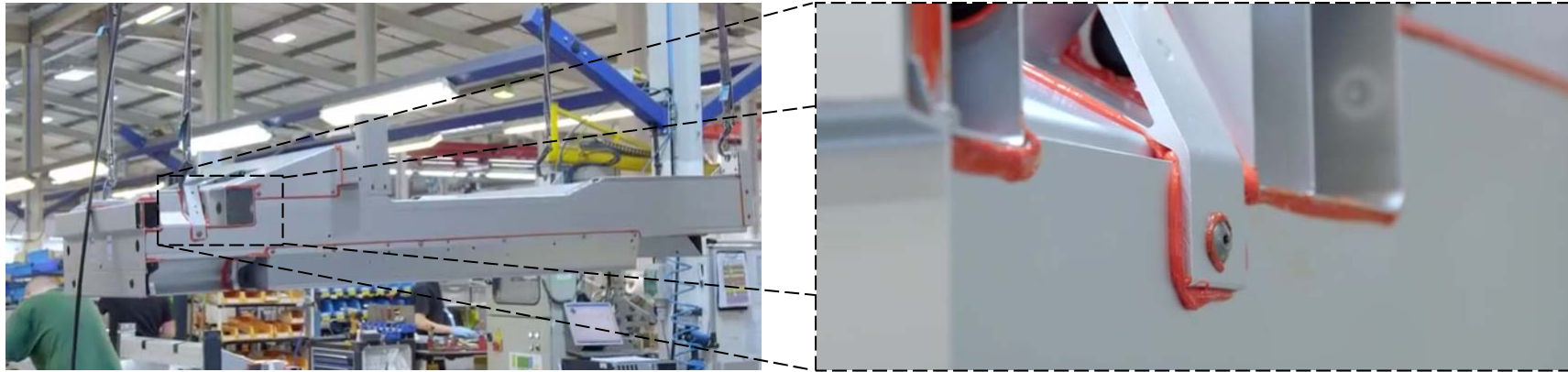
(d)



(h)

Exemplo prático na indústria automóvel

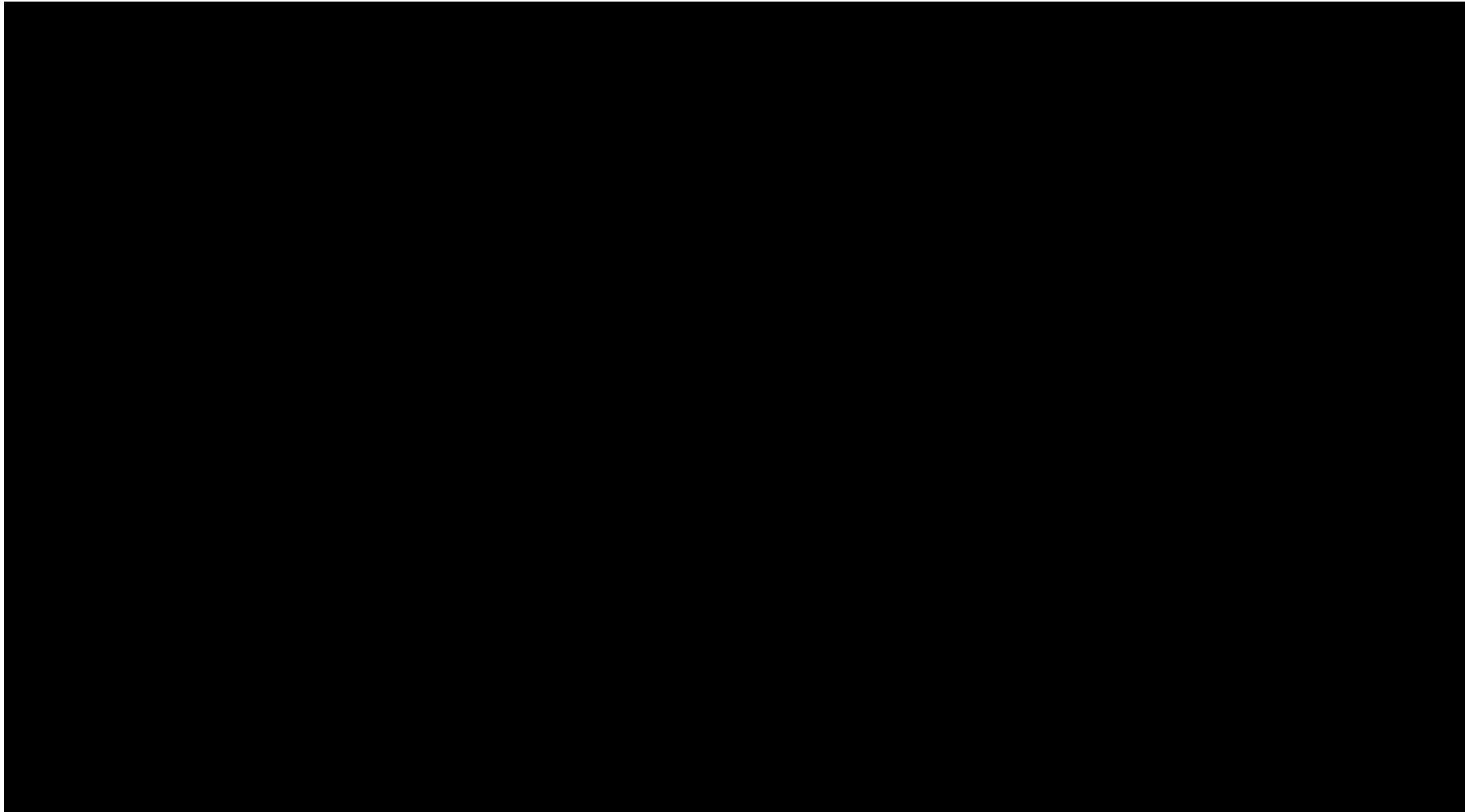
O **recurso a ligações coladas** permite **diminuir o peso dos automóveis**, diminuindo os consumos de combustível e, por conseguinte, **diminuindo as emissões de CO₂** (mais amigo do ambiente).



From the epicenter of the Lotus factory (England): “the top secret production line”.

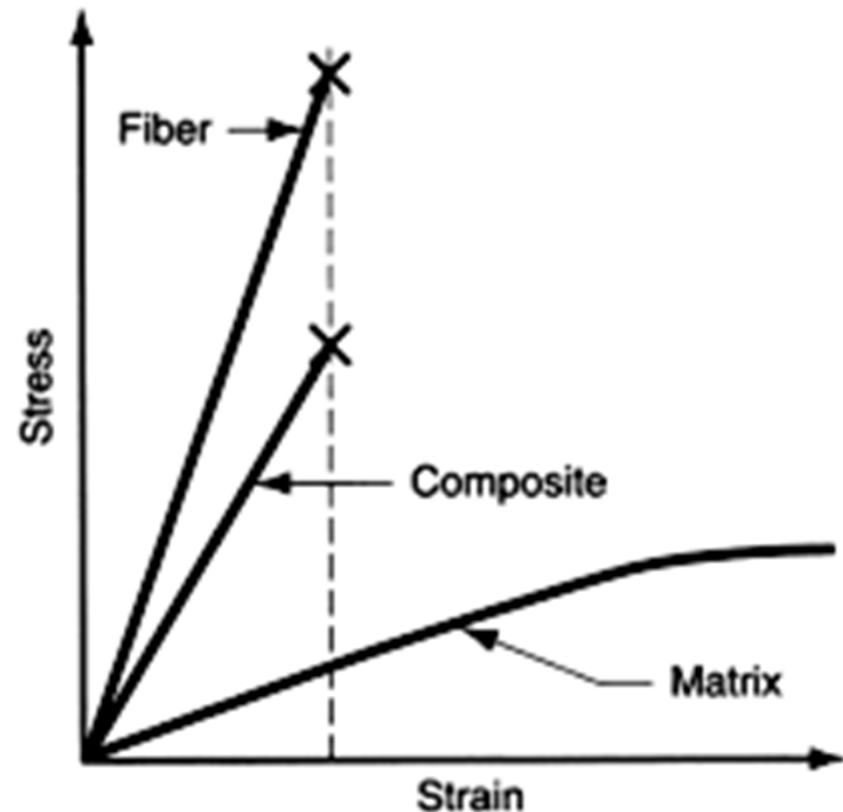
In [Car SOS, S07E03](#)

Exemplo prático na indústria automóvel



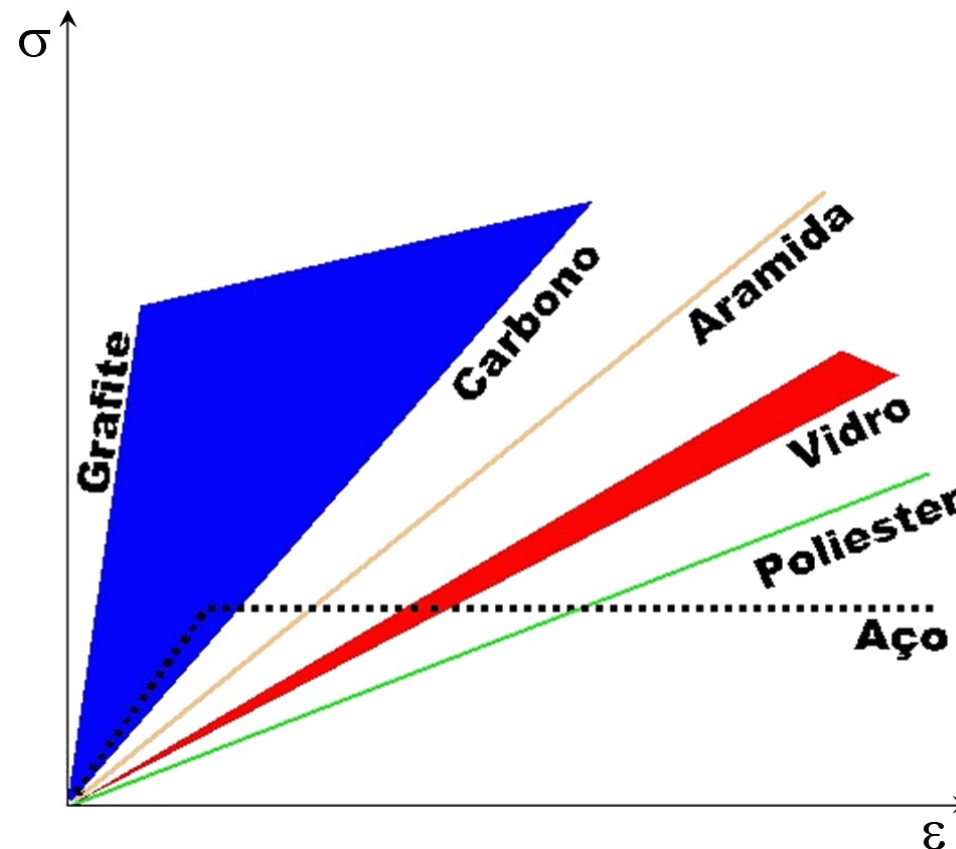
Compósitos de FRP » CFRP, GFRP, AFRP

Um compósito de FRP é constituído pelas fibras (e.g. carbono, vidro, aramida ou outra) e que são impregnadas numa matriz (e.g. resina epoxídica). As fibras têm propriedades mecânicas superiores à matriz e 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.



In SE Günaslan, A Karaşin and ME Öncü (2014), Properties of FRP Materials for Strengthening, International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, 1(9), 656-660

Compósitos de FRP » CFRP, GFRP, AFRP



LIGAÇÕES COLADAS ENTRE COMPÓSITOS DE FRP E OUTROS MATERIAIS ESTRUTURAIS

» ESTUDO EXPERIMENTAL VS. TEÓRICO

Introdução | [Compósitos de FRP, Adesivos e Outros Materiais Estruturais](#) | Avaliação experimental da aderência | Modelação | (Breves) Conclusões gerais

Compósitos de FRP » CFRP, GFRP, AFRP

TIPO DE FIBRA	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	TENSÃO DE ROTURA (MPa)	EXTENSÃO MÍNIMA NA ROTURA (%)
CARBONO			
Geral	220 a 235	2050 a 3790	1,2
Alta resistência	220 a 235	3790 a 4825	1,4
Muito alta resistência	220 a 235	4825 a 6200	1,5
Alto módulo de elasticidade	345 a 515	1725 a 3100	0,5
Muito alto módulo de elasticidade	515 a 690	1375 a 2400	0,2
VIDRO			
Tipo E	69 a 72	1860 a 2685	4,5
Tipo S	86 a 90	3445 a 4135	5,4
Tipo AR	70 a 76	1800 a 3500	2 a 3
ARAMÍDICAS			
Geral	69 a 83	3445 a 4135	2,5
Alta performance	110 a 124	3445 a 4135	1,6

Adesivos

Resinas (dois grandes grupos):

Termoplásticas

Com ligações fracas com pontes de hidrogénio, não possuindo as ligações covalentes;

Muito susceptíveis a variações de temperatura;

Permitem a reciclagem e reutilização (com + temperatura amolecem; com – temperatura solidificam);

Exemplos: o polipropileno, a poliamida, o polietileno, o polibutileno e o PVC (policloreto de vinila).

Termoendurecíveis

Com ligações moleculares covalentes, que lhes garante uma estrutura quimicamente resistente;

Baixa viscosidade, permitindo uma boa capacidade de impregnação nas fibras;

Temperatura de transição vítrea (T_g) bastante superior à das resinas termoplásticas, i.e. menos susceptíveis a variações de temperatura do que as resinas termoplásticas.

Exemplos: de poliéster, de viniléster, **epoxídicas** e fenólicas.

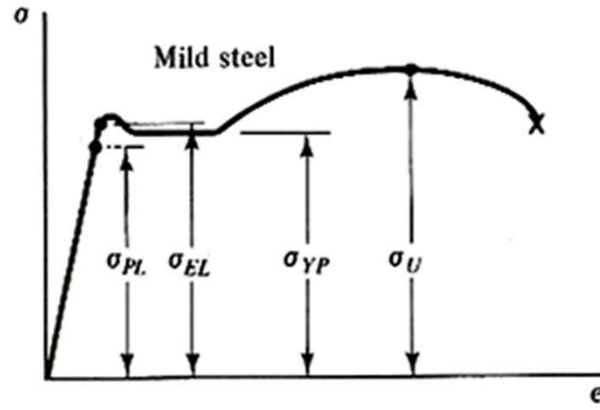
LIGAÇÕES COLADAS ENTRE COMPÓSITOS DE FRP E OUTROS MATERIAIS ESTRUTURAIS

» ESTUDO EXPERIMENTAL VS. TEÓRICO

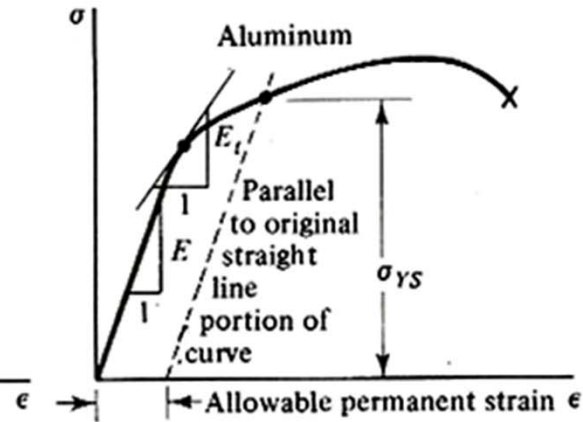
Introdução | **Compósitos de FRP, Adesivos e Outros Materiais Estruturais** | Avaliação experimental da aderência | Modelação | (Breves) Conclusões gerais

Exemplos de materiais estruturais

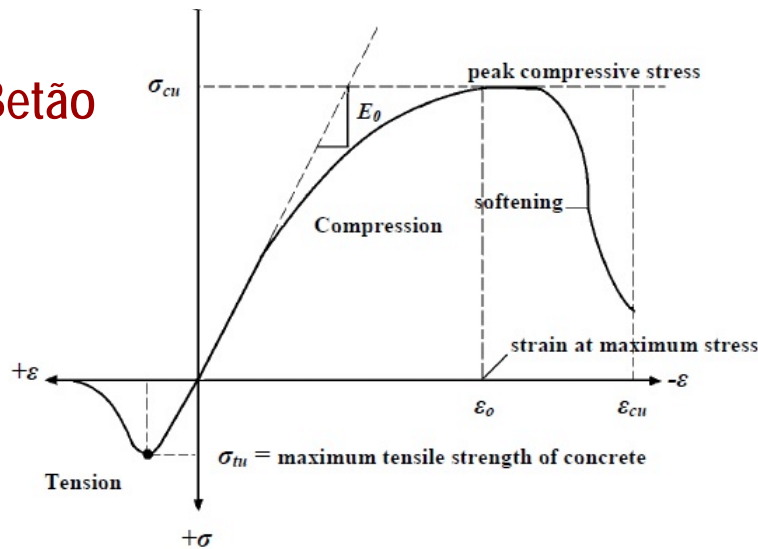
Aço



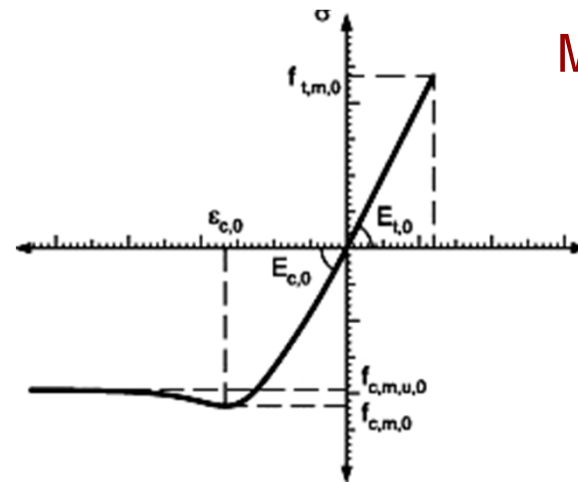
Alumínio



Betão

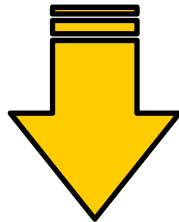


Madeira

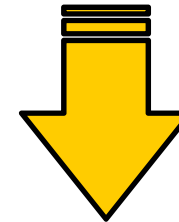


Ligação rígida vs. Ligação não rígida

No exercício da engenharia, muitas vezes torna-se necessário analisar elementos estruturais constituídos por mais do que um material.

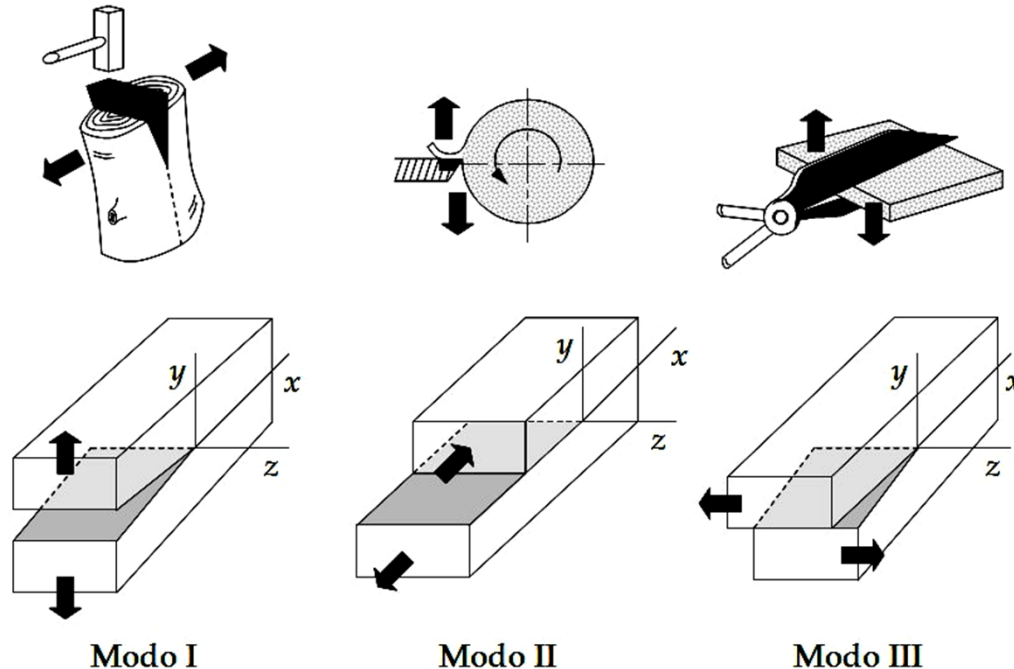


A hipótese de que a **interface é rígida** é bastante confortável.
(Do ponto de vista do dimensionamento é uma solução bastante questionável)



A hipótese de que a **interface não é rígida** pretende ter em linha de conta o que acontece na realidade, i.e., considera que existem deslocamentos relativos entre os materiais envolvidos na ligação.

Modos de fractura

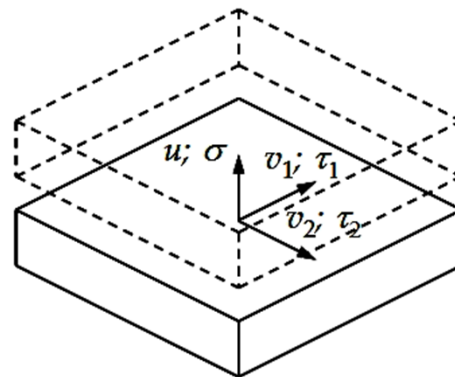
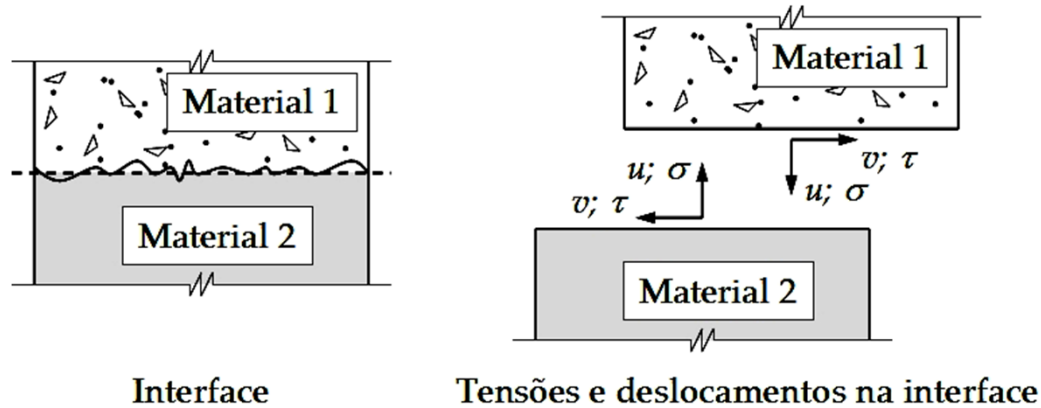


Modo I (*opening ou tension mode*): a interface da ligação separa-se perpendicularmente ao plano de ruptura;

Modo II (*sliding mode*): a interface da ligação desliza no plano de ruptura proporcionando deslocamentos relativos entre os materiais ligados;

Modo III (*tearing mode*): a interface da ligação separa-se ainda que no plano de ruptura, perpendicularmente ao desenvolvimento da fendilhação.

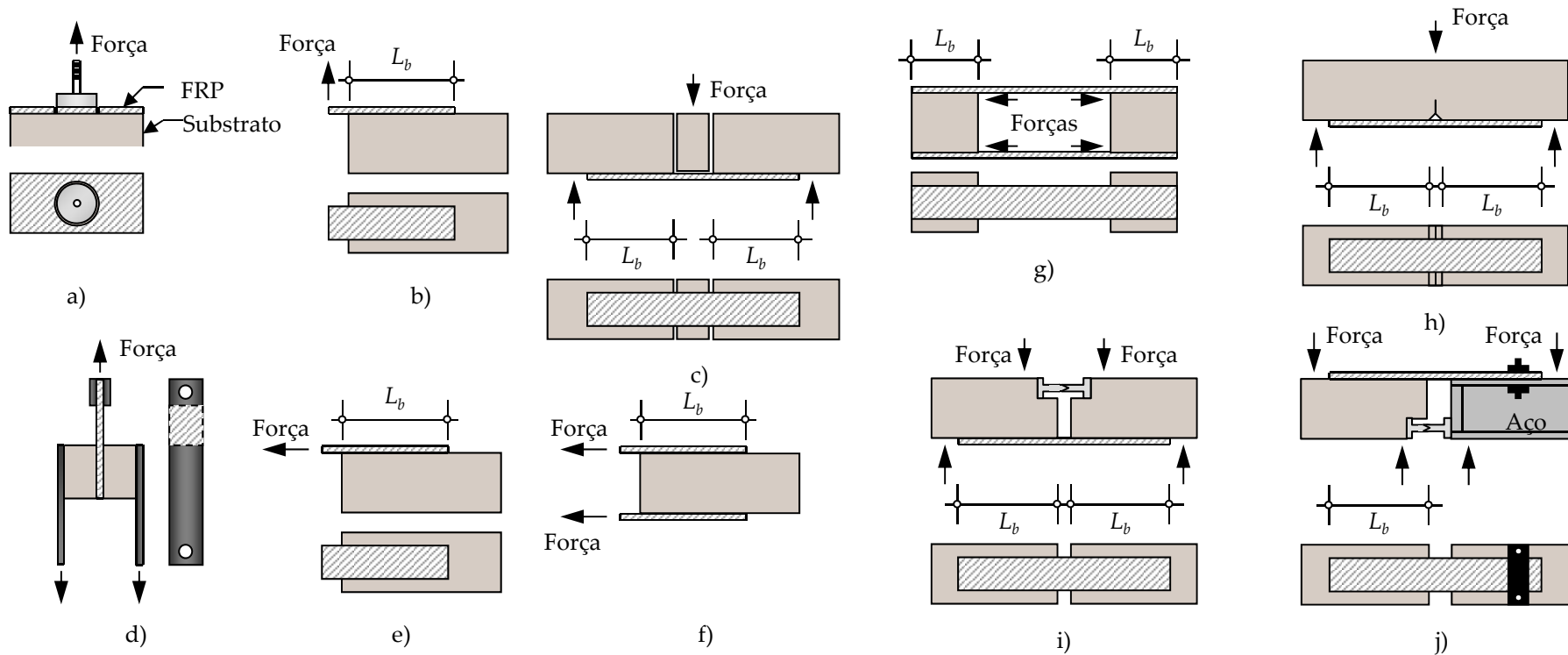
Idealização da ligação não rígida



Como definir os campos de tensões e de deslocamentos na interface?

Esquemas de ensaio para avaliar a aderência

Ensaios de aderência que se encontram frequentemente na literatura:



Determinação da Curva Extensão vs. Deslizamento

Determinação das extensões, e.g.:

- (i) Extensómetros eléctricos;
- (ii) Correlação de Imagem Digital (DIC – Digital Image Correlation);
- (iii) Com base nas leituras das células de pressão (FRP tem comportamento elástico e linear até à rotura).

Deslizamento:

Deslocamento relativo entre dois materiais, i.e.:

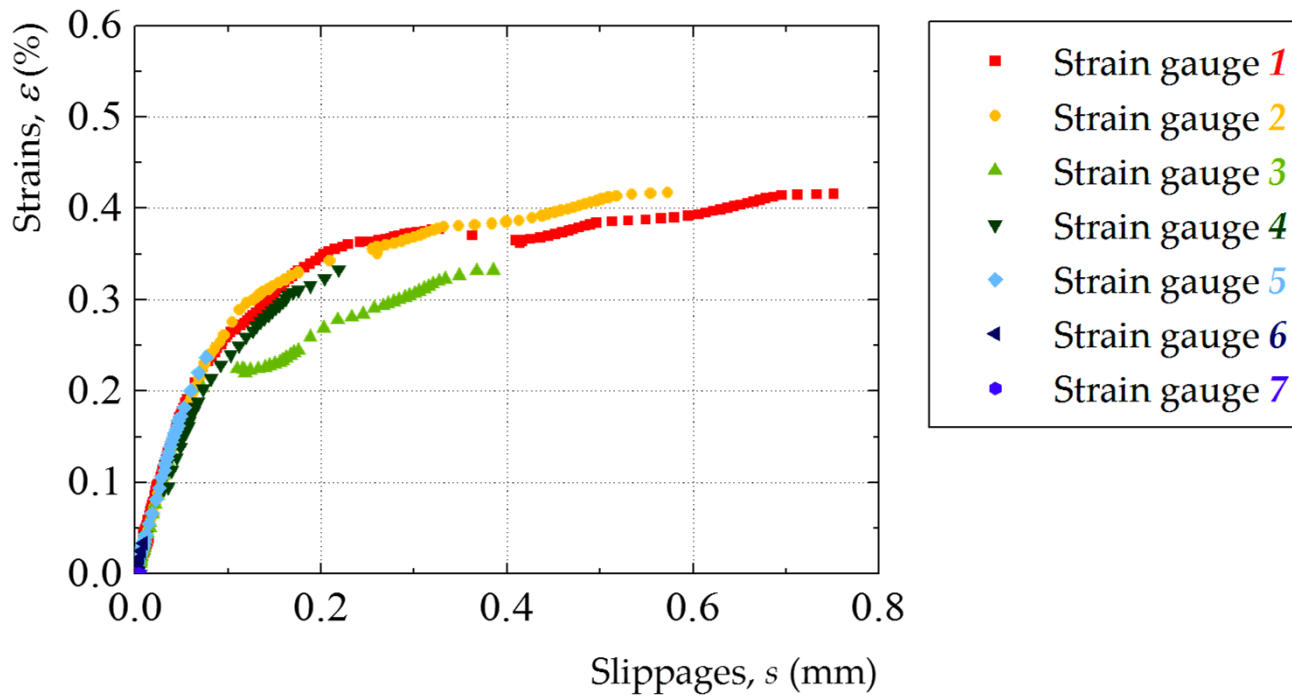
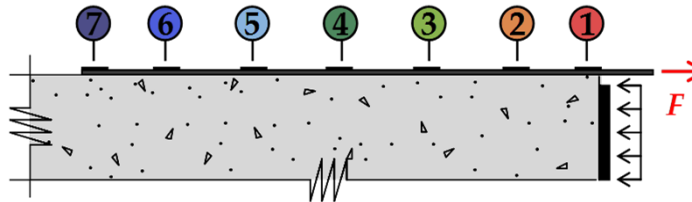
$$s = u_f - u_s$$

onde u_f e u_s são os deslocamentos do FRP e do substrato, respectivamente.

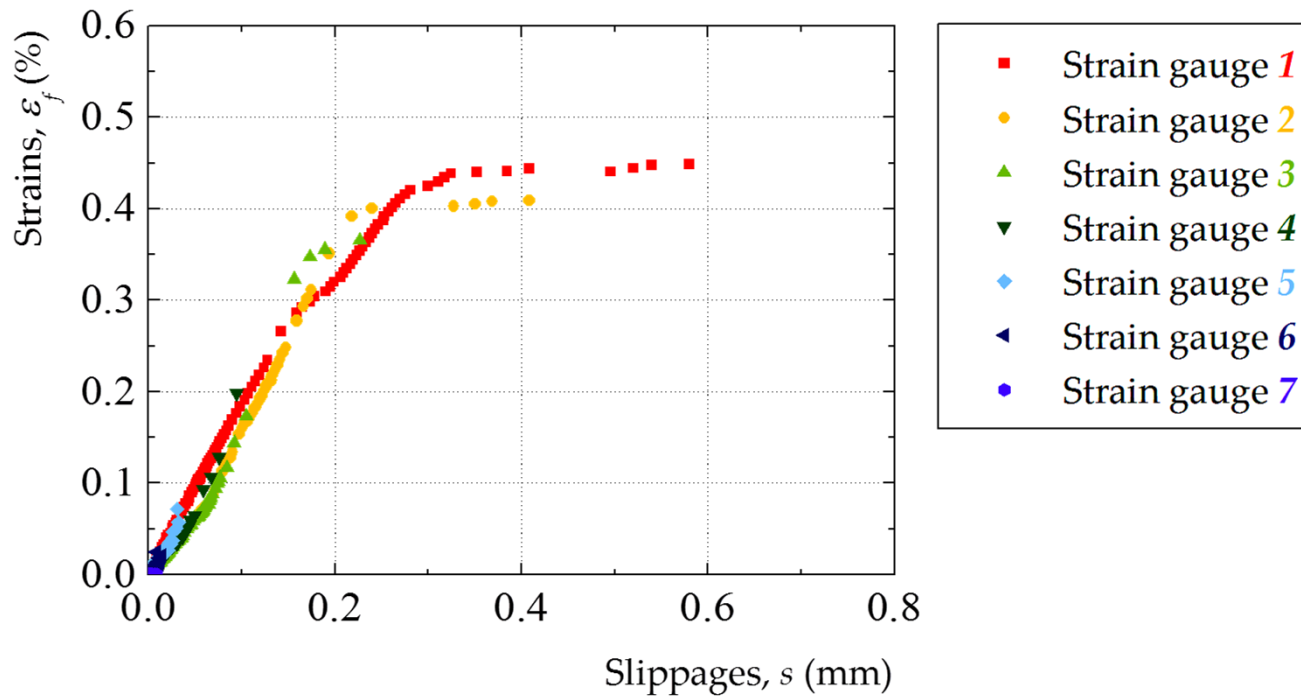
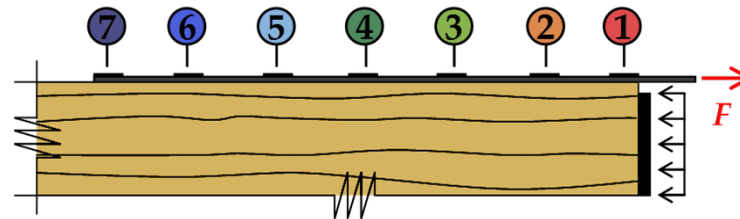
Da primeira derivada de u relativamente a x obtém-se (e se se assumir ainda que as deformações no substrato são desprezáveis):

$$\frac{ds}{dx} = \frac{du_f}{dx} - \frac{du_s}{dx} \approx \frac{du_f}{dx} = \varepsilon_f \quad \text{logo} \quad s = \int \varepsilon_f \cdot dx \quad (\text{resolver numericamente})$$

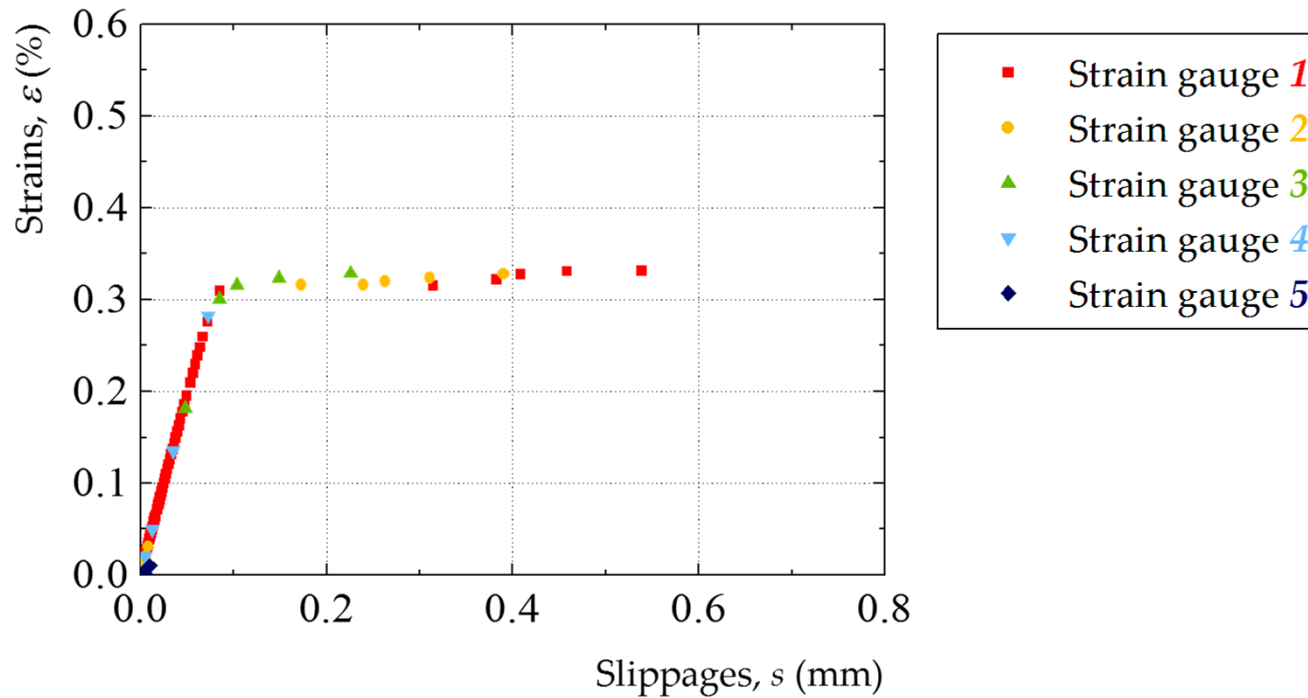
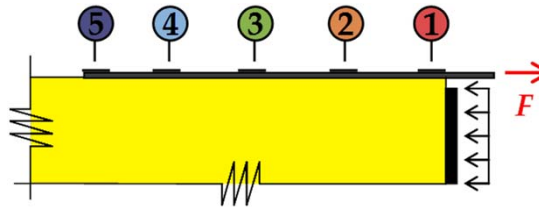
Curva Extensão vs. Deslizamento » Ligação CFRP/betão



Curva Extensão vs. Deslizamento » Ligação CFRP/madeira



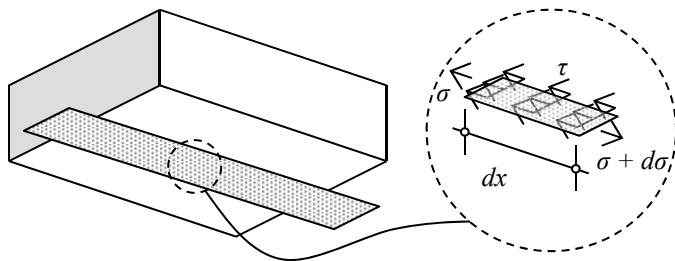
Curva Extensão vs. Deslizamento » Ligação CFRP/aço



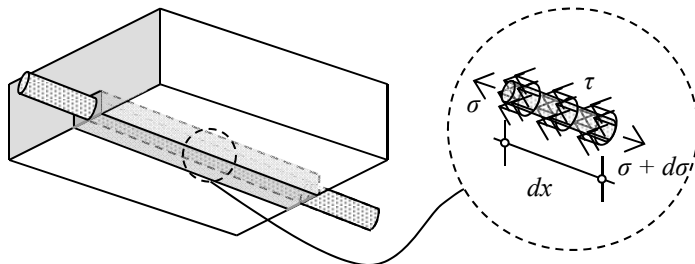
Determinação da relação Tensão de Aderência vs. Deslizamento

As tensões de aderência podem ser calculadas assumindo que entre duas medições consecutivas das extensões no compósito de FRP estas se desenvolvem de forma uniforme pelo que, é importante assumir medições entre dois pontos próximos um do outro.

Assumindo comportamento elástico dos materiais, do equilíbrio de um comprimento dx da ligação obtém-se:

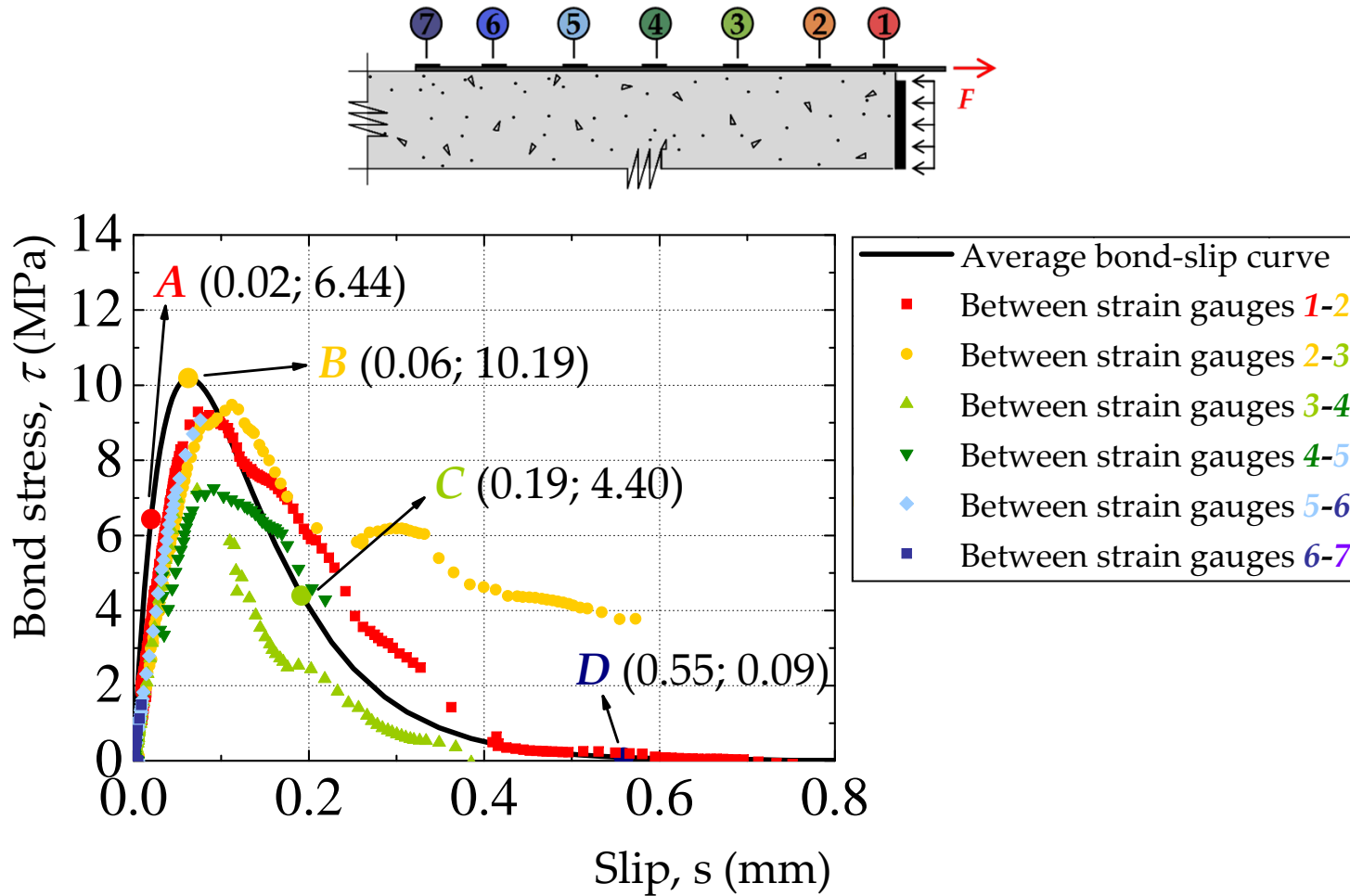


$$\tau = E_f \cdot t_f \cdot \frac{d\varepsilon_f}{dx} \quad \text{ou} \quad \tau = E_f \cdot t_f \cdot \frac{\varepsilon_{f,i+1} - \varepsilon_{f,i}}{x_{i+1} - x_i}$$

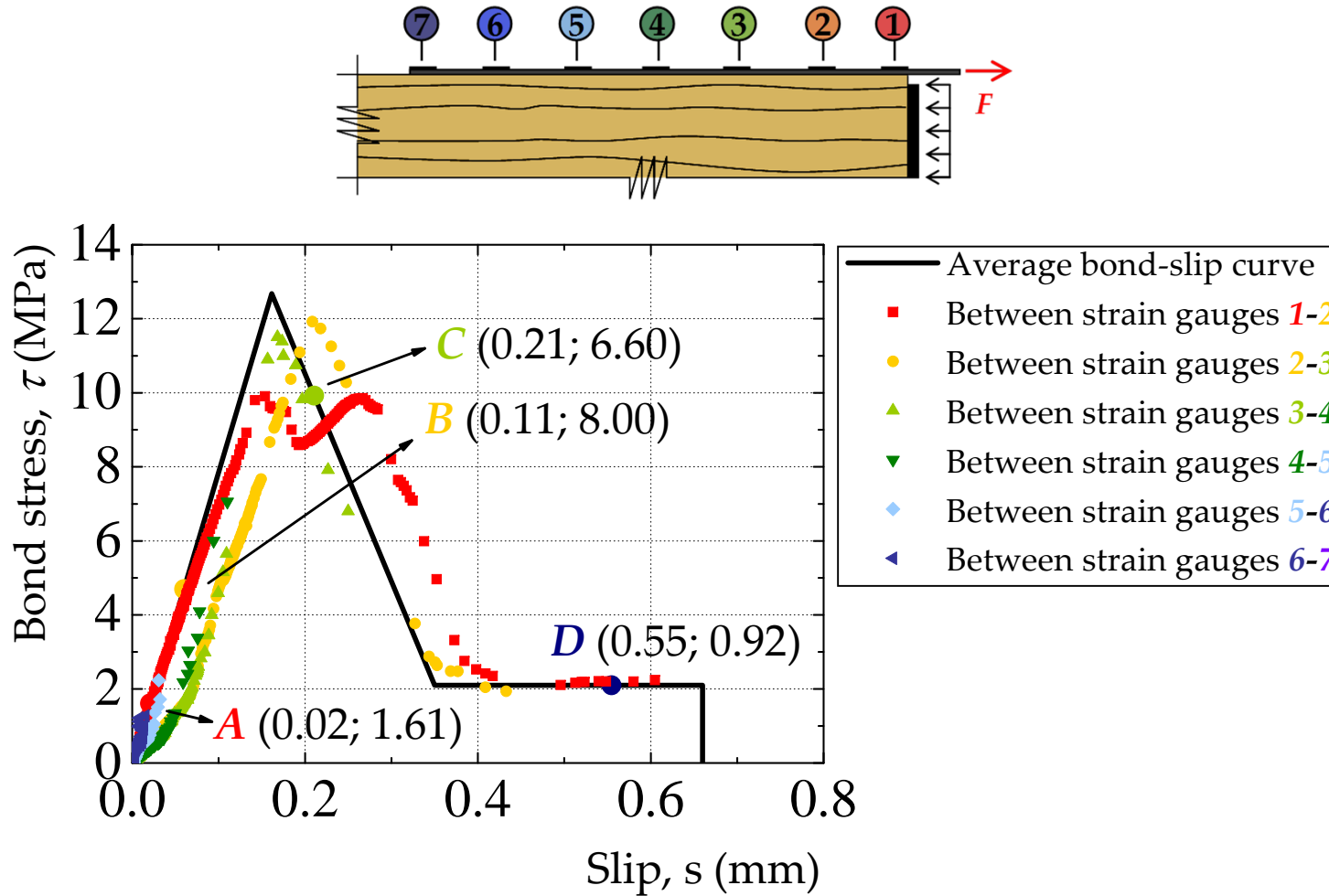


$$\tau = E_f \cdot \frac{\phi_f}{4} \cdot \frac{d\varepsilon_f}{dx} \quad \text{ou} \quad \tau = E_f \cdot \frac{\phi_f}{4} \cdot \frac{\varepsilon_{f,i+1} - \varepsilon_{f,i}}{x_{i+1} - x_i}$$

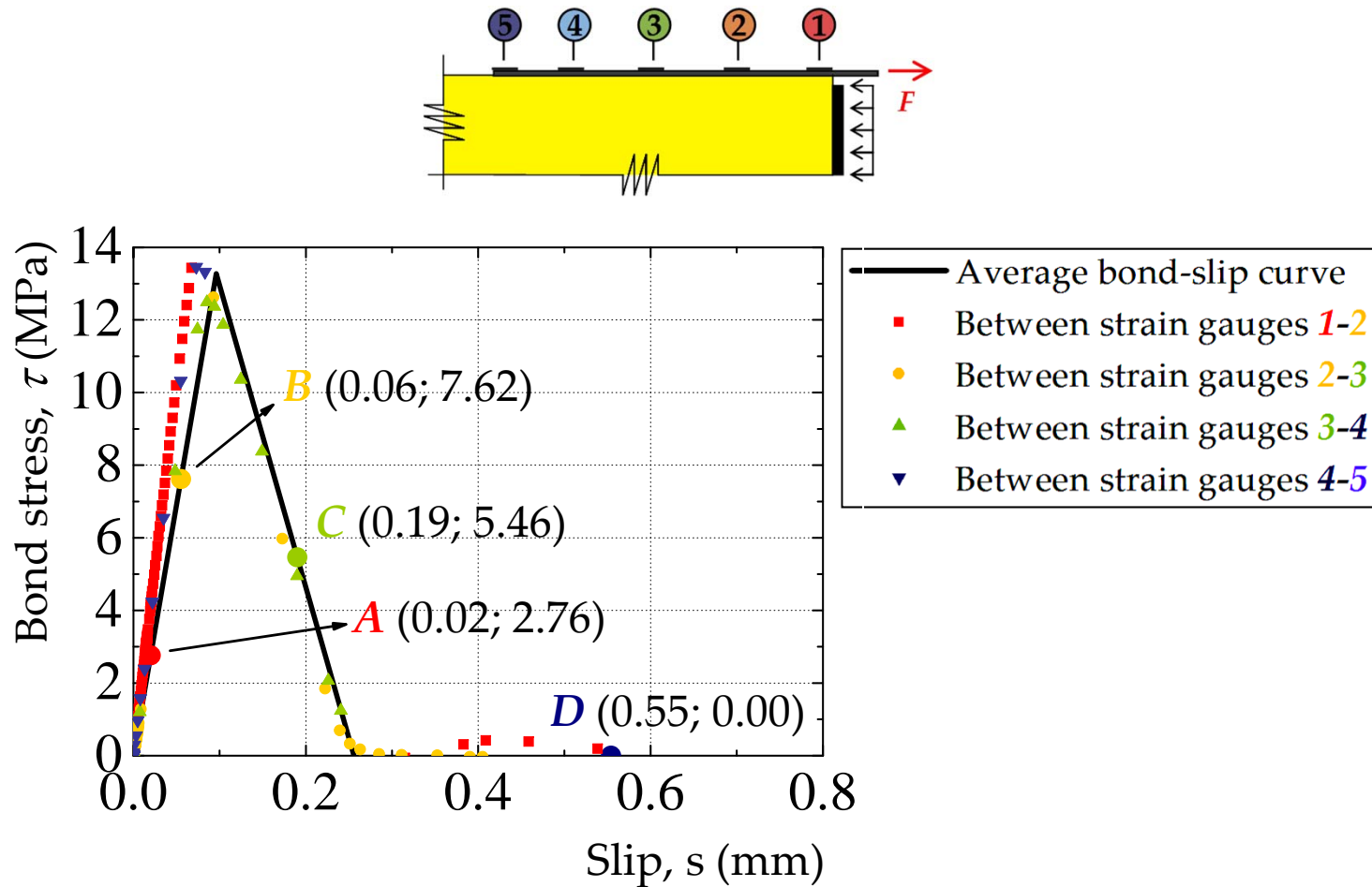
Curva local de aderência, Tensão de Aderência vs. Deslizamento » Ligação CFRP/betão



Curva local de aderência, Tensão de Aderência vs. Deslizamento » Ligação CFRP/madeira

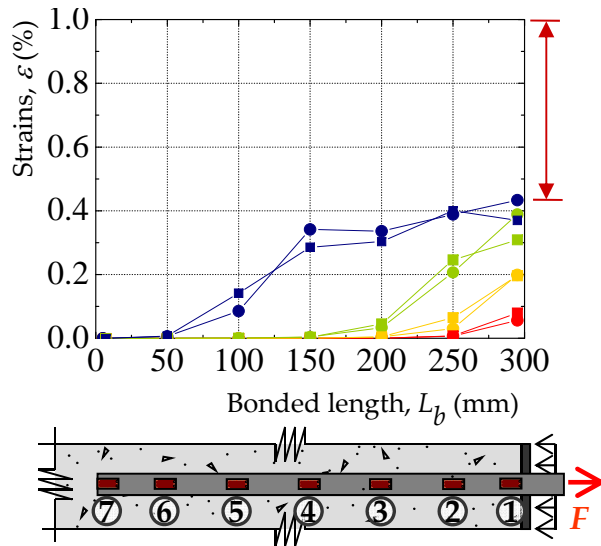


Curva local de aderência, Tensão de Aderência vs. Deslizamento » Ligação CFRP/aço

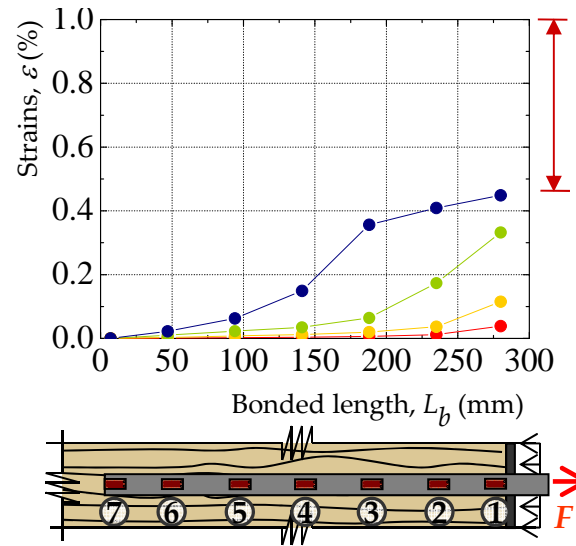


Distribuição das extensões no FRP ao longo do comprimento de colagem

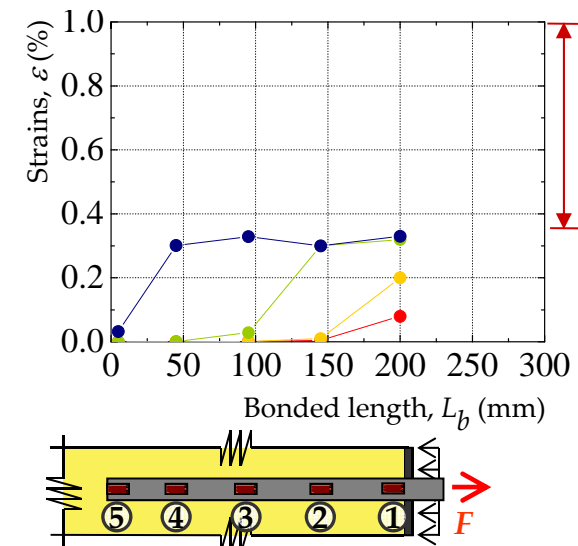
CFRP/betão



CFRP/madeira



CFRP/aço



Extensão de rotura média do CFRP, ε_{fu} (%) = 1.03%.

Outras formas de determinação da lei local de aderência

(i) Com base na curva experimental Extensão vs. Deslizamento

Define-se uma função que se aproxime da curva Extensão vs. Deslizamento. Por exemplo, admita-se a função exponencial:

$$\varepsilon = f(s) = \varepsilon_{\max} \cdot (1 - e^{-B \cdot s})$$

onde B é obtido experimentalmente para aproximar a função (teórica) ao resultado experimental.

Como (EBR):

$$\tau = E_f \cdot t_f \cdot \frac{d\varepsilon}{dx}$$

e desprezando as deformações no substrato, vem:

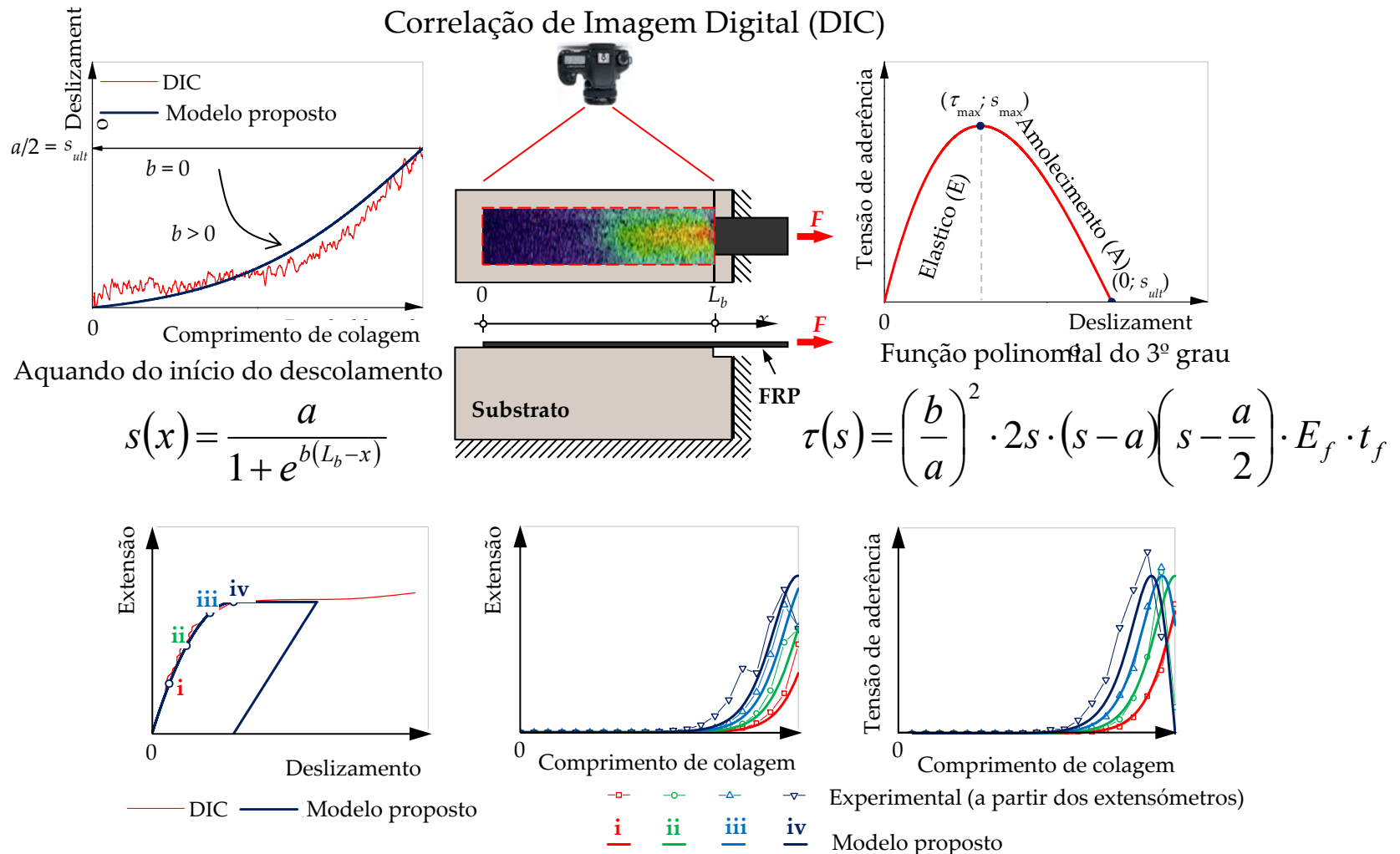
$$\tau = E_f \cdot t_f \cdot \frac{d\varepsilon}{ds} \cdot \frac{ds}{dx} = E_f \cdot t_f \cdot \frac{d\varepsilon}{ds} \cdot \varepsilon(s)$$

a curva local de aderência (Tensão de Aderência vs. Deslizamento) resulta:

$$\tau(s) = E_f \cdot t_f \cdot \varepsilon_{\max}^2 \cdot B \cdot e^{(-B \cdot s)} \cdot (1 - e^{-B \cdot s})$$

Outras formas de determinação da lei local de aderência

(ii) Com base na distribuição dos deslocamentos ao longo do comprimento de colagem

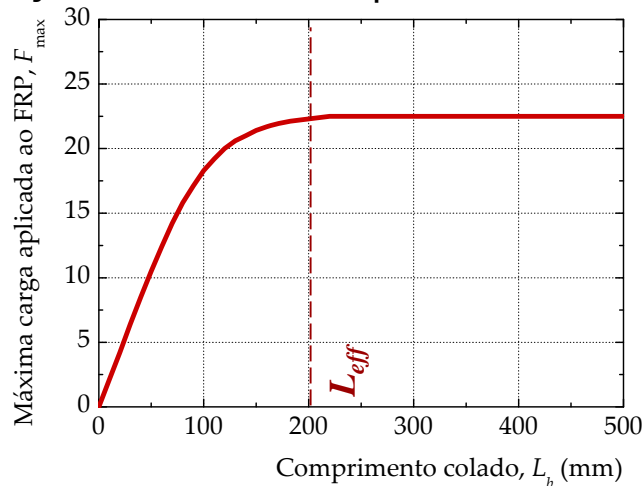


O comprimento efectivo

Definição: é o comprimento a partir do qual a resistência da ligação deixa de aumentar.

Determinação do comprimento efectivo:

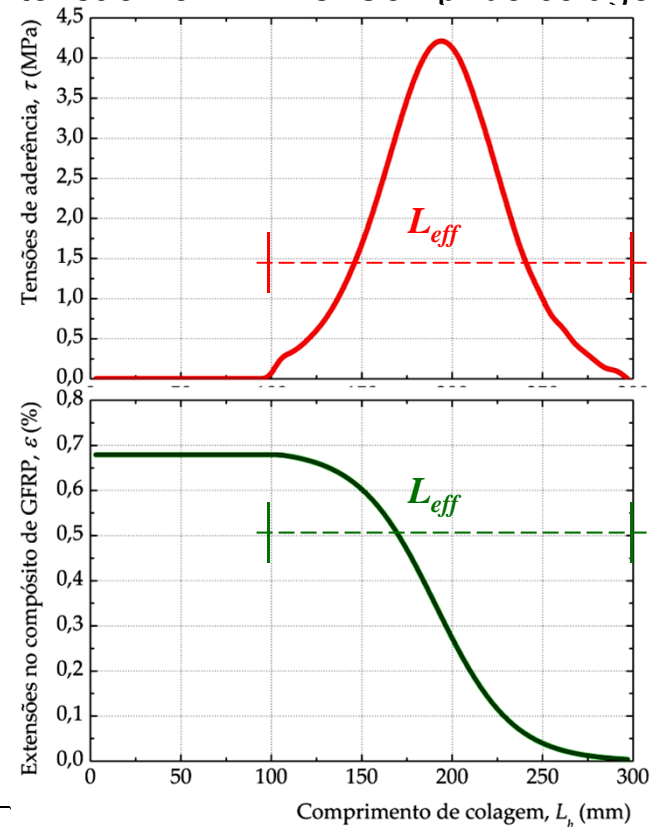
Força máxima vs. Comprimento de colagem



$$F_{\max} = \begin{cases} b_f \cdot \sqrt{2G_F \cdot E_f \cdot t_f} & \text{if } \frac{L_b}{L_{eff}} \geq 1 \\ \beta_L \cdot b_f \cdot \sqrt{2G_F \cdot E_f \cdot t_f} & \text{if } \frac{L_b}{L_{eff}} < 1 \end{cases}$$

Tensão de aderência vs. Comp. de colagem

Extensão no FRP vs. Comp. de colagem

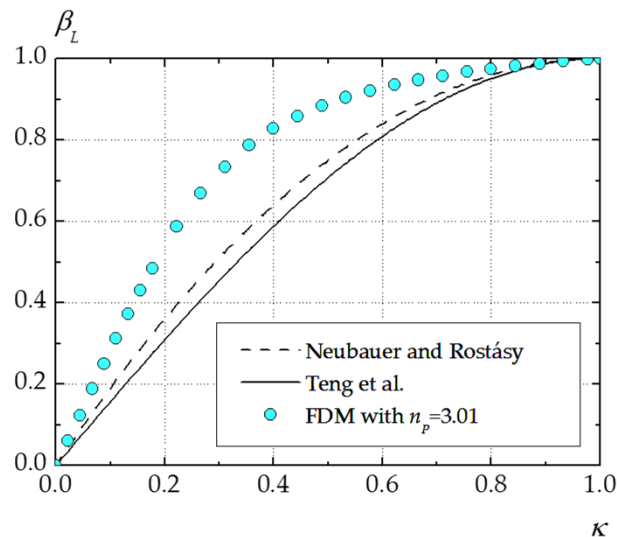


O comprimento efectivo

Propostas para definir a força máxima para comprimentos inferiores ao comprimento efectivo

Neubauer and Rostásy¹:

$$\beta_L = \kappa \cdot (2 - \kappa)$$



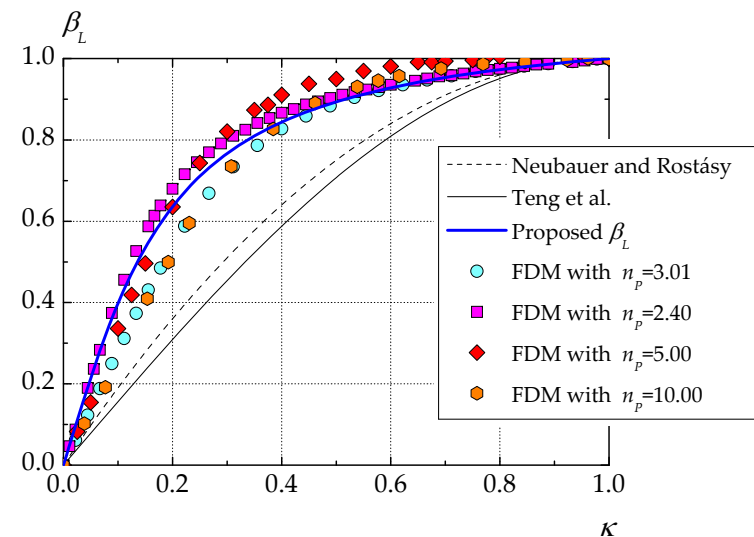
Teng et al.²:

$$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \kappa\right)$$

$$\kappa = \frac{L_b}{L_{eff}}$$

Biscaia et al.³:

$$\beta_L = \frac{\arctan(2\pi \cdot \kappa)}{\arctan(2\pi)}$$



¹Neubauer, U. and Rostásy, F.S.: "Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP-plates", Proceedings of the 7th International Conference on Structural Faults and Repairs, Vol. 2, 1997, pp. 109-118

²Teng, J.G.; Chen, J.F.; Smith, S.T. and Lam, L.: "FRP strengthened RC structures", John Wiley and Sons Ltd. Chichester, England, 2001

³HC Biscaia, C Chastre, MAG Silva, Nonlinear numerical analysis of the debonding failure process of FRP-to-concrete interfaces, Composites Part B: Engineering 50, 210-223

O comprimento efectivo

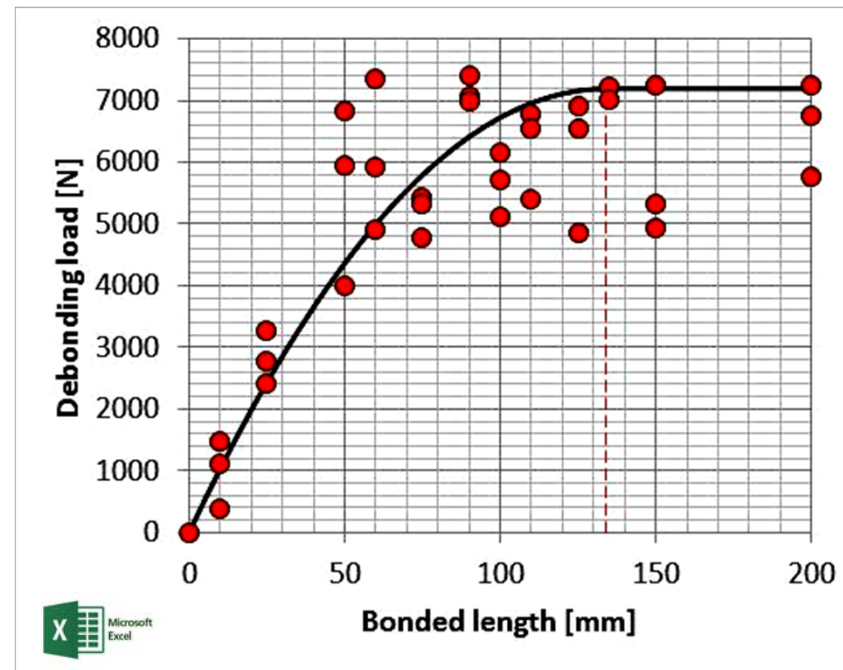
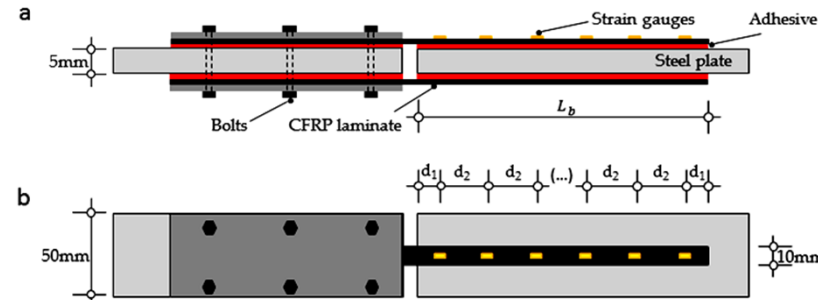
Neubauer and Rostásy¹:

Processo de minimização:

$$\min_{F_{\max}, L_{\text{eff}}} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{F_{\text{exp},j}}{F_{\text{pred},j}} - \beta_L \right)^2$$

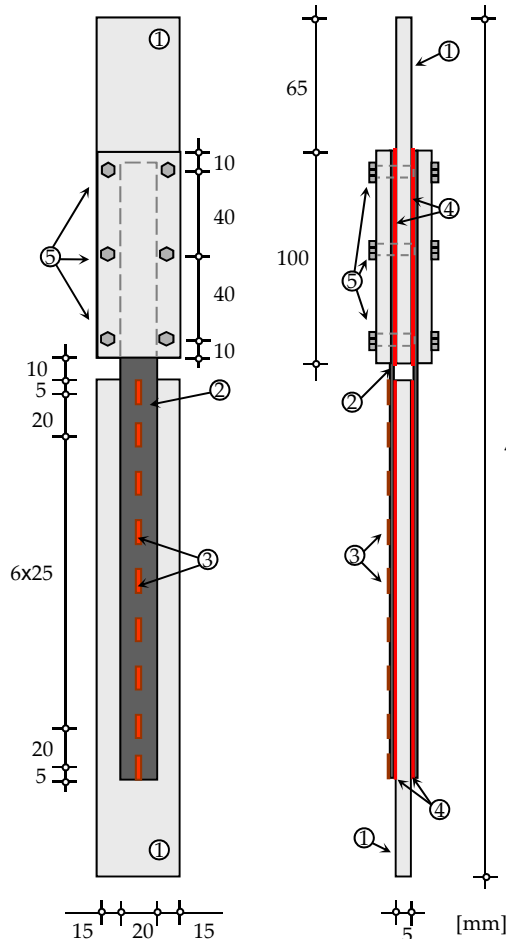
onde $F_{\text{exp},j}$ e $F_{\text{pred},j}$ são, respectivamente, as forças máximas experimental e estimada obtidas no provete j ; e

$$\beta_L = \begin{cases} \frac{L_b}{L_{\text{eff}}} \cdot \left(2 - \frac{L_b}{L_{\text{eff}}} \right) & \text{se } \frac{F_{\text{exp}}}{F_{\text{pred}}} < 1 \\ 1 & \text{se } \frac{F_{\text{exp}}}{F_{\text{pred}}} \geq 1 \end{cases}$$

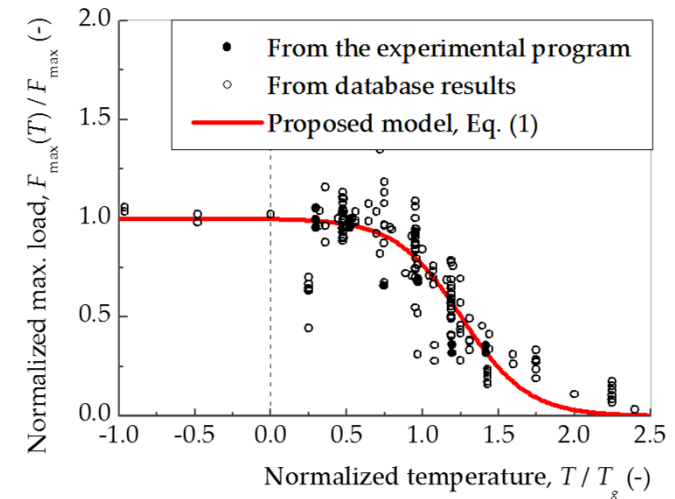
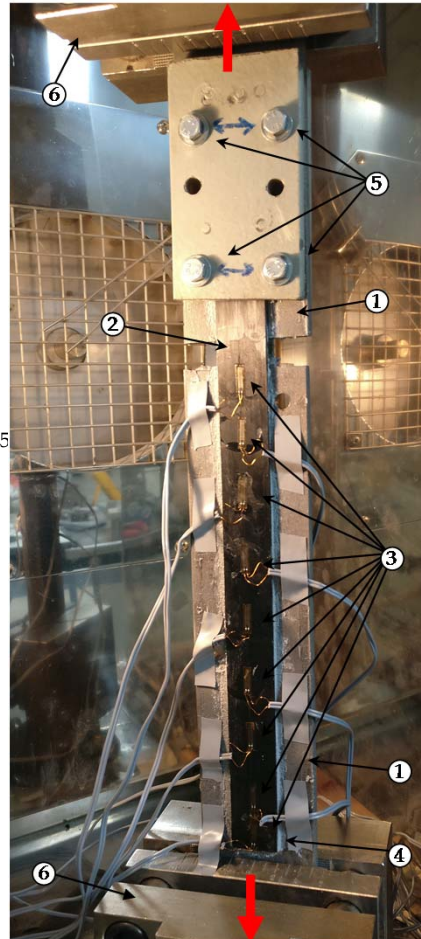


¹Neubauer, U. and Rostásy, F.S.: "Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP-plates", Proceedings of the 7th International Conference on Structural Faults and Repairs, Vol. 2, 1997, pp. 109-118

Influência da temperatura



1 – Chapa de aço; 2 – laminado de CFRP; 3 – Extensómetros; 4 - Adesivo (SIKADUR-30); 5 - Parafusos; 6 – Garras da máquina de tracção.



Modelo semi-empirico proposto:

$$\frac{F_{\max}(T)}{F_{\max}} = 1 - \frac{1}{1 + e^{-f_1 \left(\frac{T}{T_g} - f_2 \right)}}$$

$$f_1 = 4,804 \text{ e } f_2 = 1,258$$

(valores obtidos com recurso a vários ensaios experimentais)

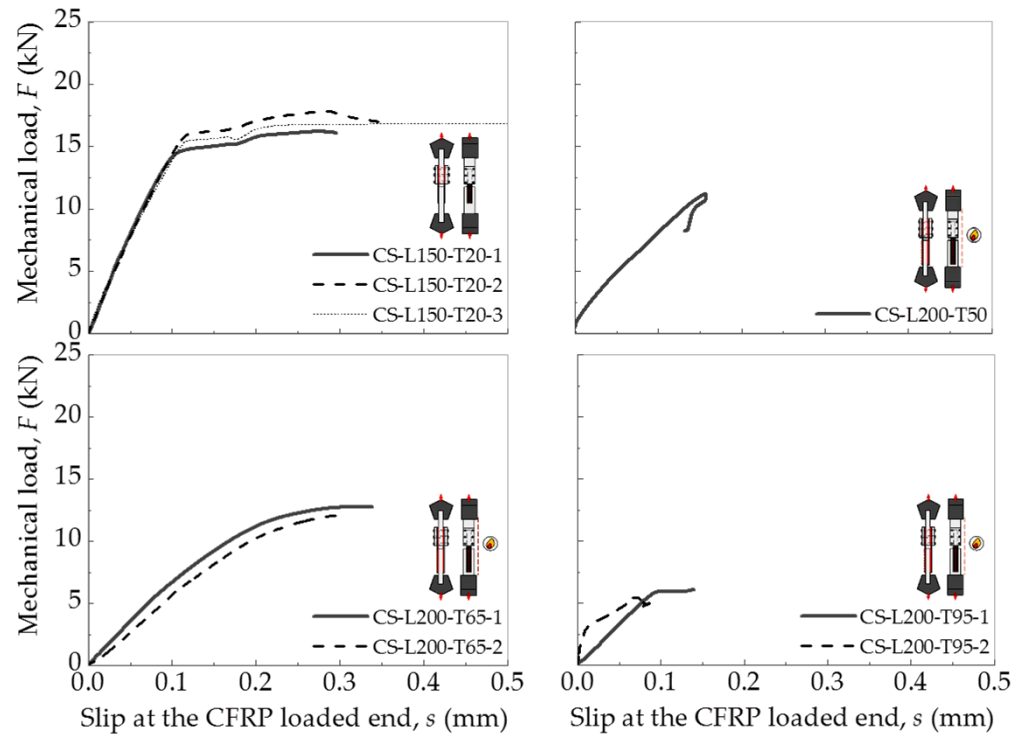
¹H Biscaia, P Ribeiro (2019), A temperature-dependent bond-slip model for CFRP-to-steel joints, Composite Structures 217, 186-205

Influência da temperatura

Determinação dos deslizamentos (expressão genérica¹):

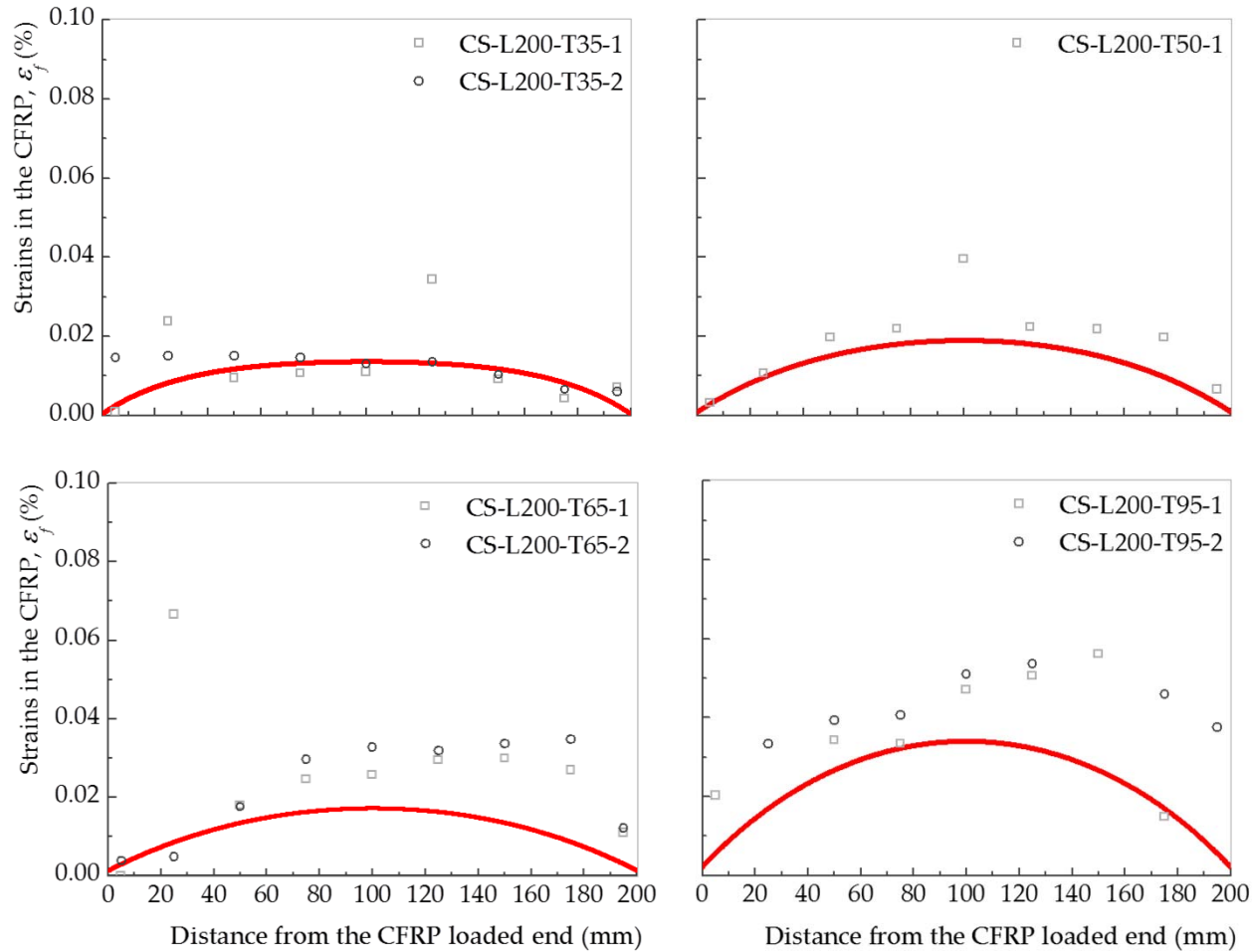
$$\frac{ds}{dx} = (1 + \beta) \cdot \varepsilon_f - (\beta \cdot \alpha_f + \alpha_s) \cdot \Delta T \quad \text{com} \quad \beta = \frac{E_f b_f t_f}{E_s b_s t_s}$$

onde α_f e α_s são os coeficientes de dilatação térmica linear do FRP e do substrato, respectivamente.

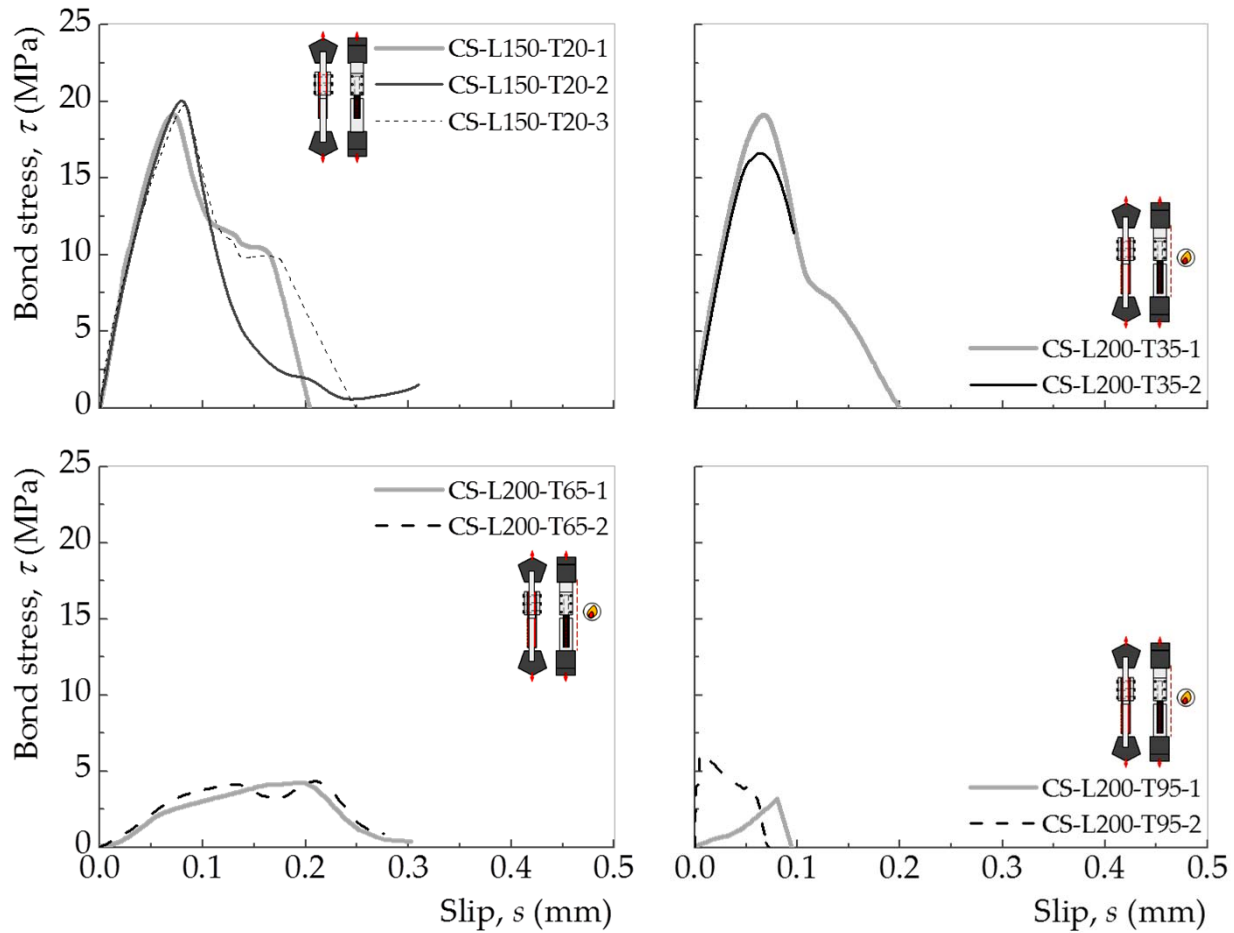


¹H Biscaia (2019), The influence of temperature variations on adhesively bonded structures: A non-linear theoretical perspective, International Journal of Non-Linear Mechanics 113, 67-85.

Influência da temperatura



Influência da temperatura



Tipos de modelação

(i) Modelos orientados para o dimensionamento

Têm como objectivo obter expressões com grande potencial de serem adoptadas em códigos ou em regras de dimensionamento.

Algumas simplificações são adoptadas, por exemplo:

- a) o compósito de FRP não sofre deformações transversais (perpendiculares à direcção da carga);
- b) a espessura do FRP não varia durante o processo de descolamento;
- c) a ligação FRP/substrato está sujeita apenas a deformações de corte (paralelas à direcção da carga) conduzindo a roturas consistentes com o 2º Modo de Fractura;
- d) o adesivo e as respectivas interfaces são modeladas através de uma única lei de aderência;
- e) as tensões de aderência são constantes ao longo da largura do compósito de FRP.

(ii) Modelos orientados para a análise numérica

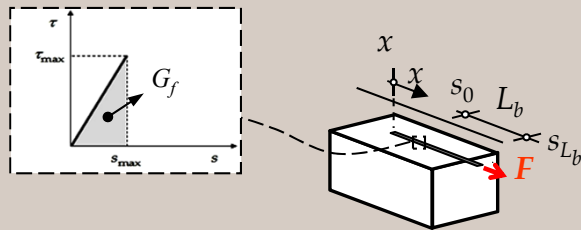
Permitem analisar várias situações que de outra forma seriam impossíveis de virem a ser estudadas.

Baseiam-se em procedimentos numéricos iterativos e incrementais, como são:

- a) Método das Diferenças Finitas (MDF);
- b) Método da Rigidez com base em elementos não lineares de molas;
- c) Método dos Elementos Finitos (MEF);
- d) Método dos Elementos Discretos (MED).

Exemplo » Modelos orientados para o dimensionamento

Assumindo uma lei de aderência linear com rotura frágil, obtém-se a equação diferencial:



$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} - \alpha_1^2 \cdot s = 0 \quad \text{onde} \quad \alpha_1^2 = \frac{\tau_{\max}}{s_{\max} \cdot E_f \cdot t_f}$$

Solução: $s(x) = A \cdot \cosh(\alpha_1 \cdot x) + B \cdot \sinh(\alpha_1 \cdot x)$

A primeira derivada de $s(x)$ relativamente a x é: $\frac{ds}{dx} = \alpha_1 A \cdot \sinh(\alpha_1 \cdot x) + \alpha_1 B \cdot \cosh(\alpha_1 \cdot x)$

Da primeira derivada dos deslizamentos relativamente a x , obtém-se as extensões no compósito de FRP:

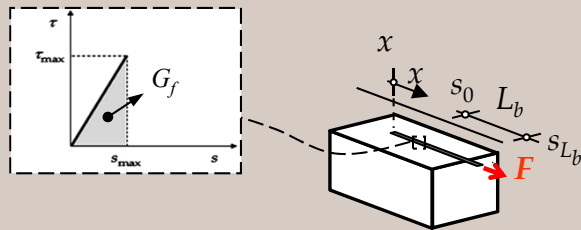
$$\varepsilon_f = \frac{ds}{dx}$$

Applying the boundary conditions of the problem @ $x = 0$: $\varepsilon_f = 0$ gives $B = 0$;

and @ $x = L_b$: $\varepsilon_f = \frac{F}{E_f A_f}$ gives $A = \frac{F}{\alpha_1 \cdot E_f \cdot A_f \cdot \sinh(\alpha_1 \cdot L_b)}$

Exemplo » Modelos orientados para o dimensionamento

Assumindo uma lei de aderência linear com rotura frágil, obtém-se a equação diferencial:



$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} - \alpha_1^2 \cdot s = 0 \quad \text{onde} \quad \alpha_1^2 = \frac{\tau_{\max}}{s_{\max} \cdot E_f \cdot t_f}$$

Aplicando as condições de fronteira do problema @ $x = 0$:

$$\frac{ds}{dx} = \varepsilon_f = 0 \quad \text{conduz a} \quad B = 0$$

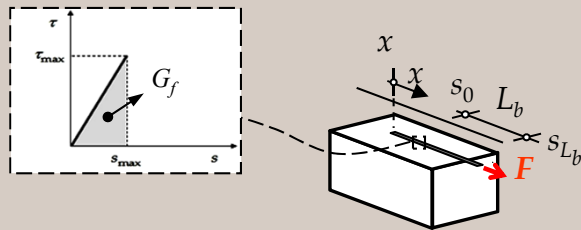
e @ $x = L_b$:

$$\varepsilon_f = \frac{F}{E_f A_f} \quad \text{conduz a} \quad A = \frac{F}{\alpha_1 \cdot E_f \cdot A_f \cdot \sinh(\alpha_1 \cdot L_b)}$$

A solução do problema fica então dada por:
$$s(x) = \frac{F}{\alpha_1 \cdot E_f \cdot A_f} \cdot \frac{\cosh(\alpha_1 \cdot x)}{\sinh(\alpha_1 \cdot L_b)}$$

Exemplo » Modelos orientados para o dimensionamento

Assumindo uma lei de aderência linear com rotura frágil, obtém-se a equação diferencial:



$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} - \alpha_1^2 \cdot s = 0 \quad \text{onde} \quad \alpha_1^2 = \frac{\tau_{\max}}{s_{\max} \cdot E_f \cdot t_f}$$

As distribuições das extensões no FRP e as tensões de aderência são:

$$\varepsilon_f(x) = \frac{F}{E_f \cdot b_f \cdot t_f} \cdot \frac{\sinh(\alpha_1 \cdot x)}{\sinh(\alpha_1 \cdot L_b)} \quad \tau(x) = \frac{F \cdot \alpha_1}{b_f} \cdot \frac{\cosh(\alpha_1 \cdot x)}{\sinh(\alpha_1 \cdot L_b)}$$

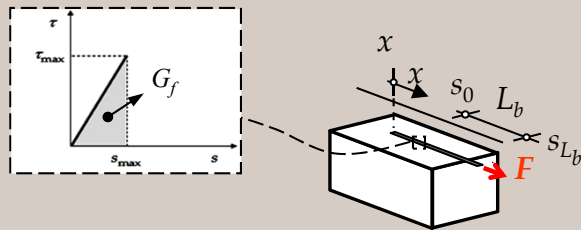
A força máxima transmitida ao compósito de FRP atinge-se quando a tensão de aderência máxima desenvolve-se @ $x = L_b$ e a igualdade $L_b = L_{eff}$ é satisfeita, logo:

$$F = \frac{\tau_{\max} \cdot b_f}{\alpha_1} \cdot \tanh(\alpha_1 \cdot L_{eff}) \rightarrow F_{\max} = \frac{\tau_{\max} \cdot b_f}{\alpha_1} = b_f \cdot \sqrt{2G_f \cdot E_f \cdot t_f}$$

$$\tanh(\alpha_1 \cdot L_{eff}) = 1 \rightarrow \alpha_1 \cdot L_{eff} \approx 4 \Rightarrow L_{eff} = 4s_{\max} \cdot \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2G_f}}$$

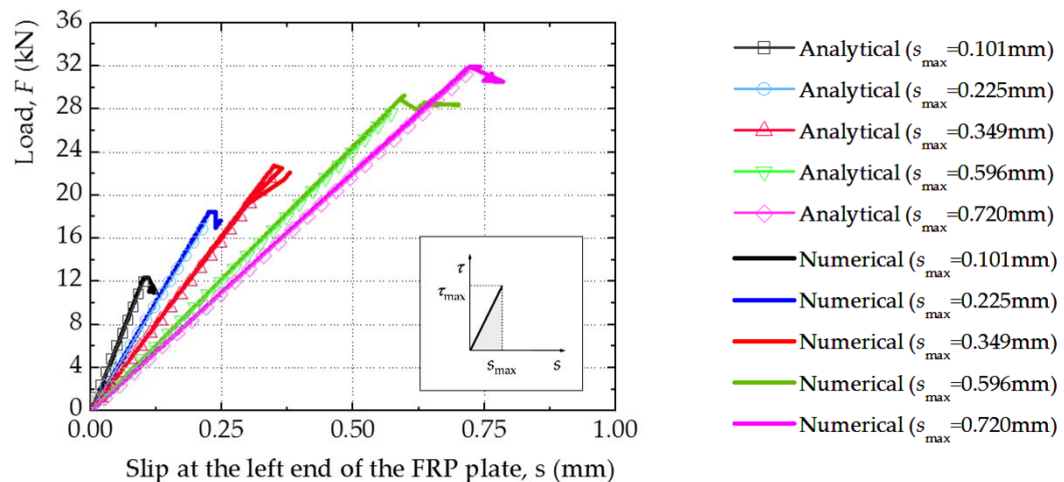
Exemplo » Modelos orientados para o dimensionamento

Assumindo uma lei de aderência linear com rotura frágil, obtém-se a equação diferencial:



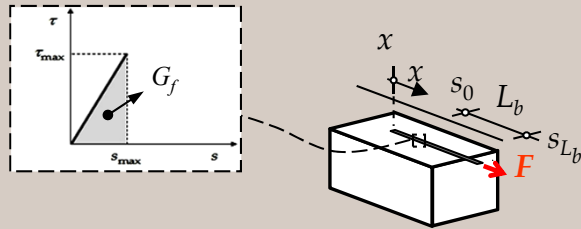
$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} - \alpha_1^2 \cdot s = 0 \quad \text{onde} \quad \alpha_1^2 = \frac{\tau_{\max}}{s_{\max} \cdot E_f \cdot t_f}$$

Assumindo, e.g., $\tau_{\max} = 4.24 \text{ MPa}$, $E_f = 23.24 \text{ GPa}$ (GFRP), $t_f = 2.54 \text{ mm}$, $b_f = 80 \text{ mm}$ e comprimento de colagem $L_b = 250 \text{ mm}$.

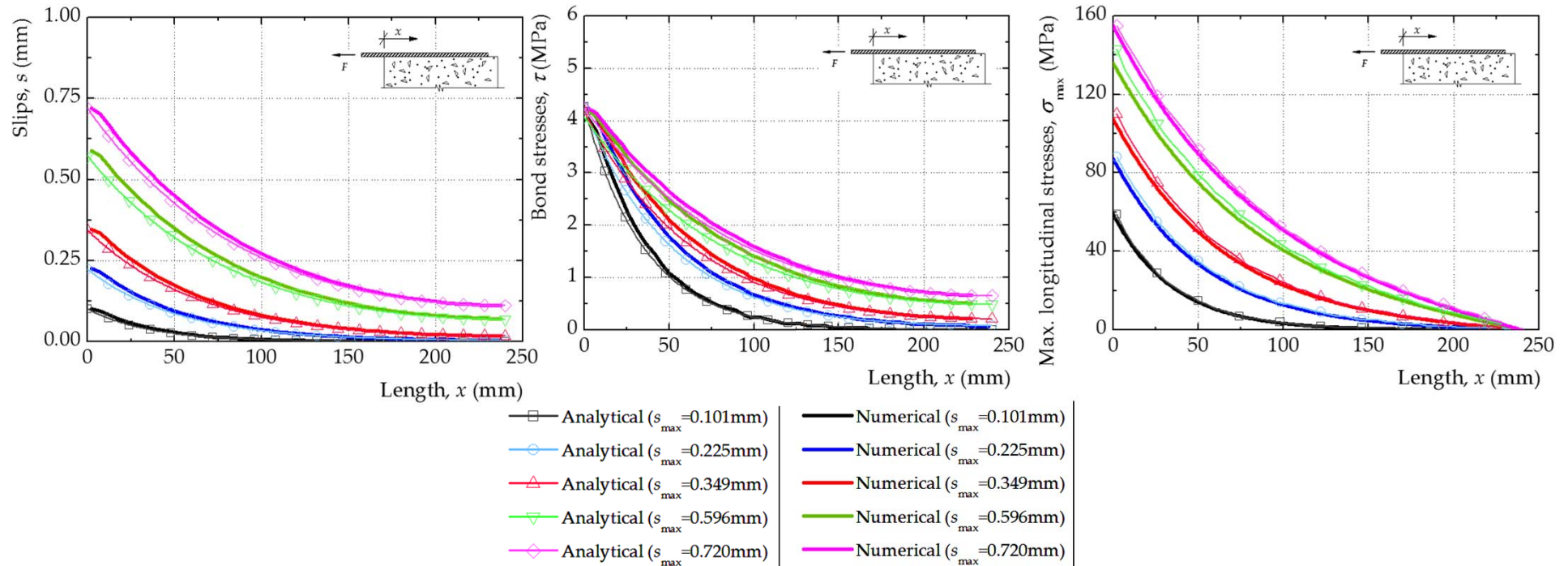


Exemplo » Modelos orientados para o dimensionamento

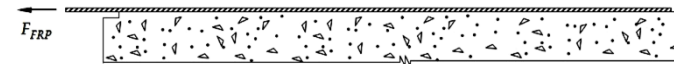
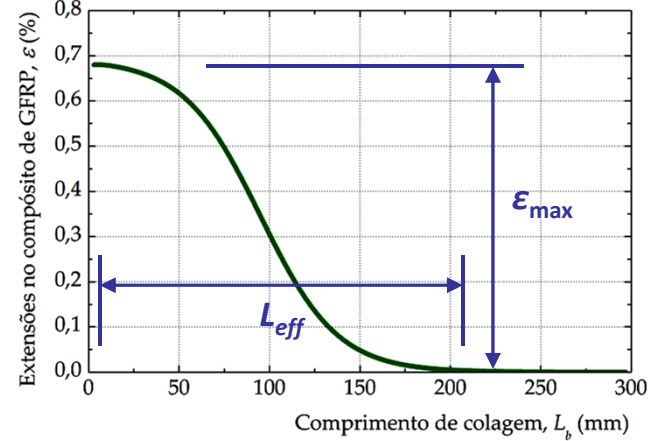
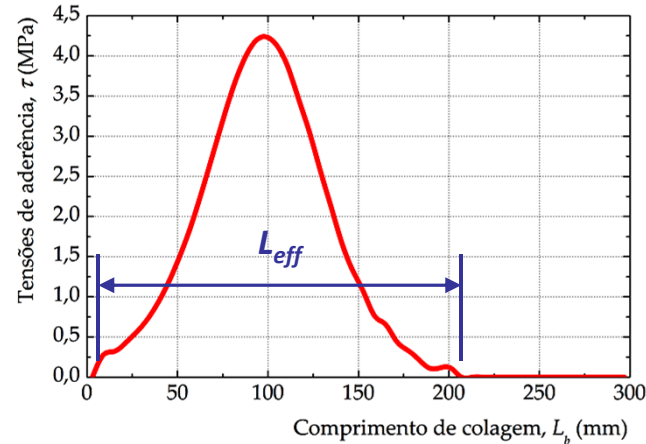
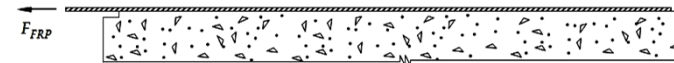
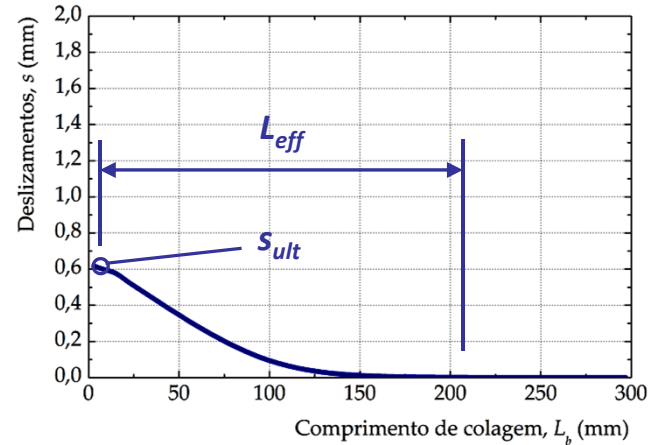
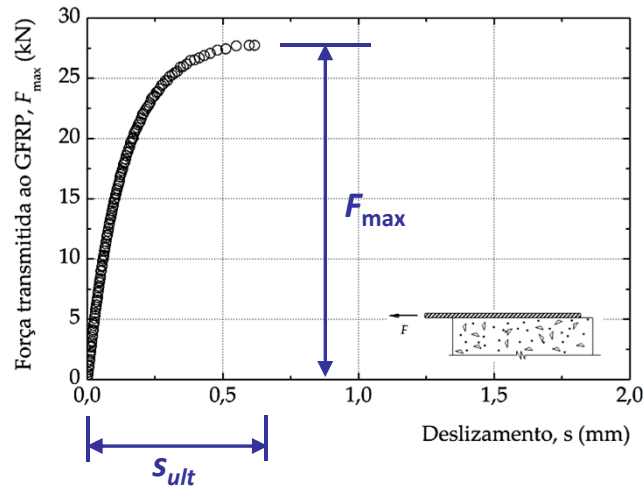
Assumindo uma lei de aderência linear com rotura frágil, obtém-se a equação diferencial:



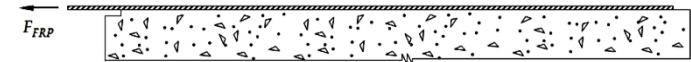
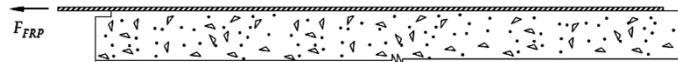
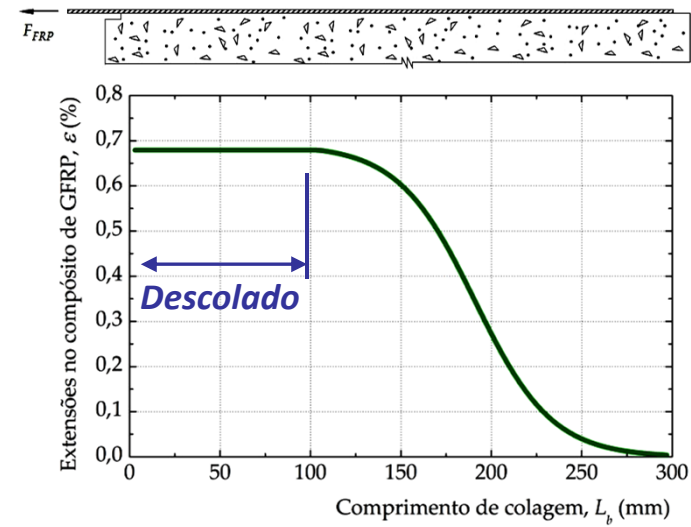
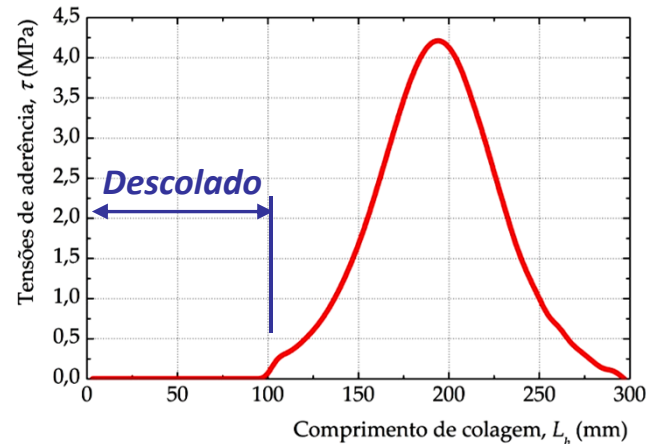
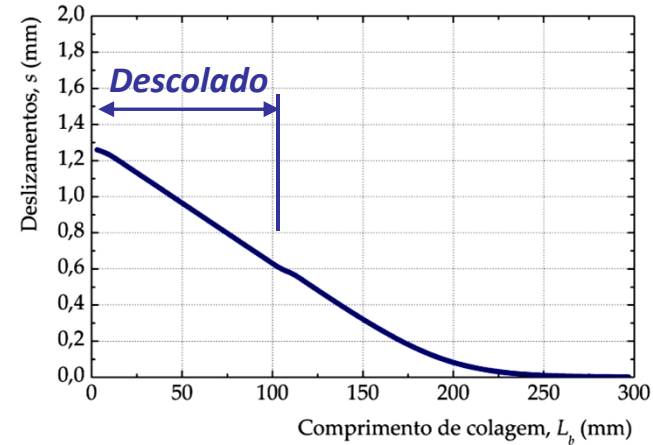
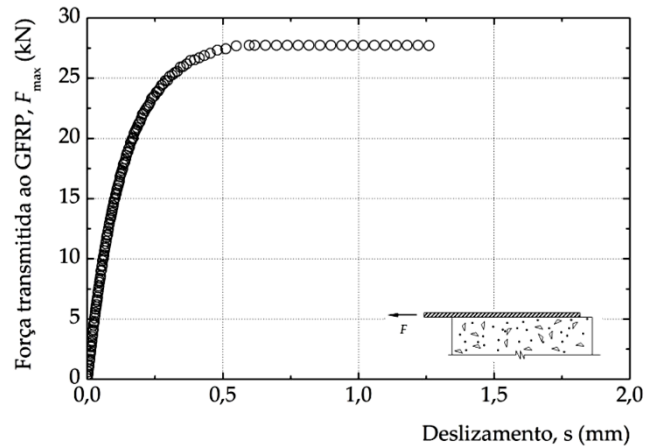
$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} - \alpha_1^2 \cdot s = 0 \quad \text{onde} \quad \alpha_1^2 = \frac{\tau_{\max}}{s_{\max} \cdot E_f \cdot t_f}$$



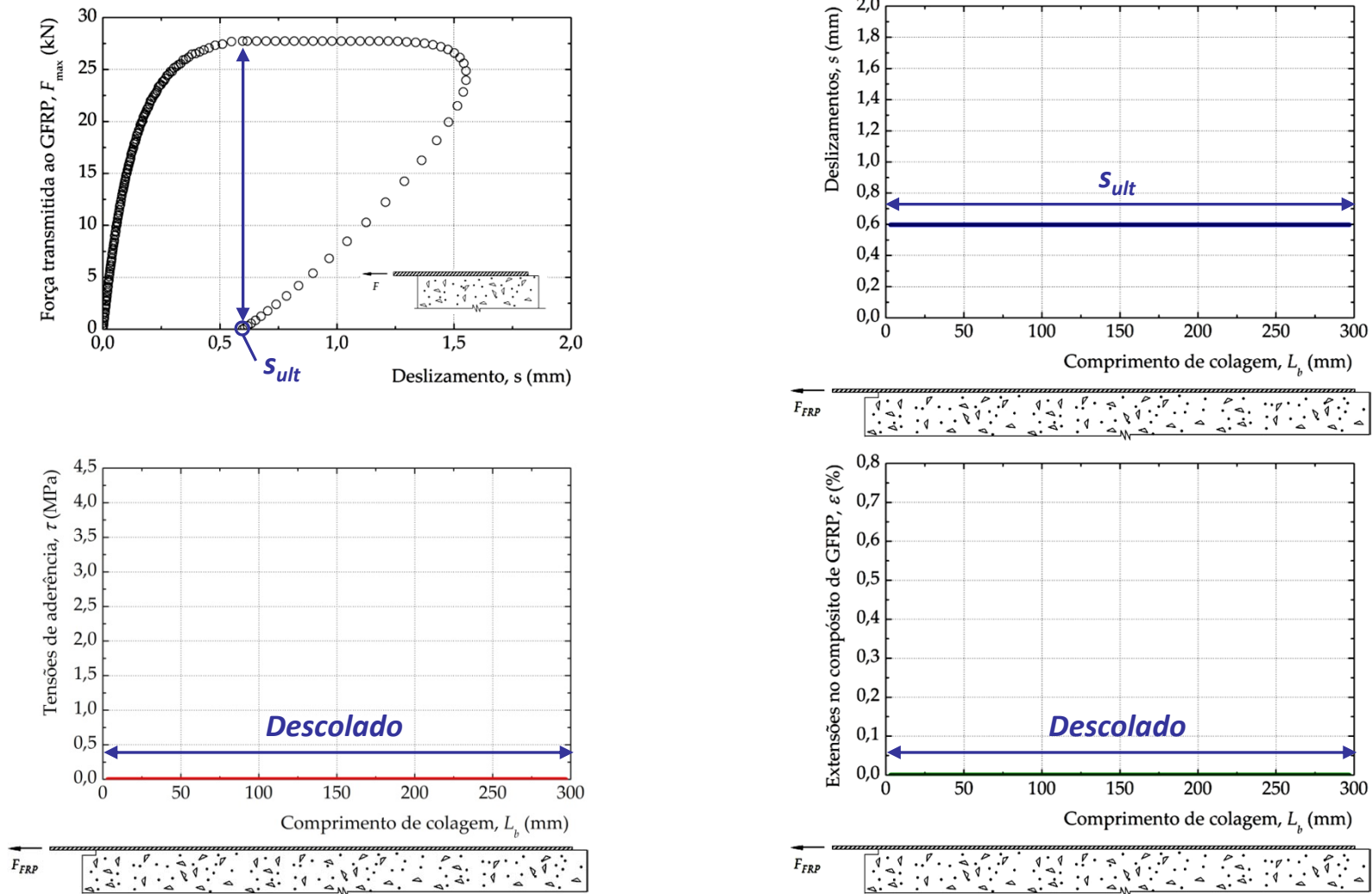
Simulação do descolamento numa ligação colada FRP/substrato



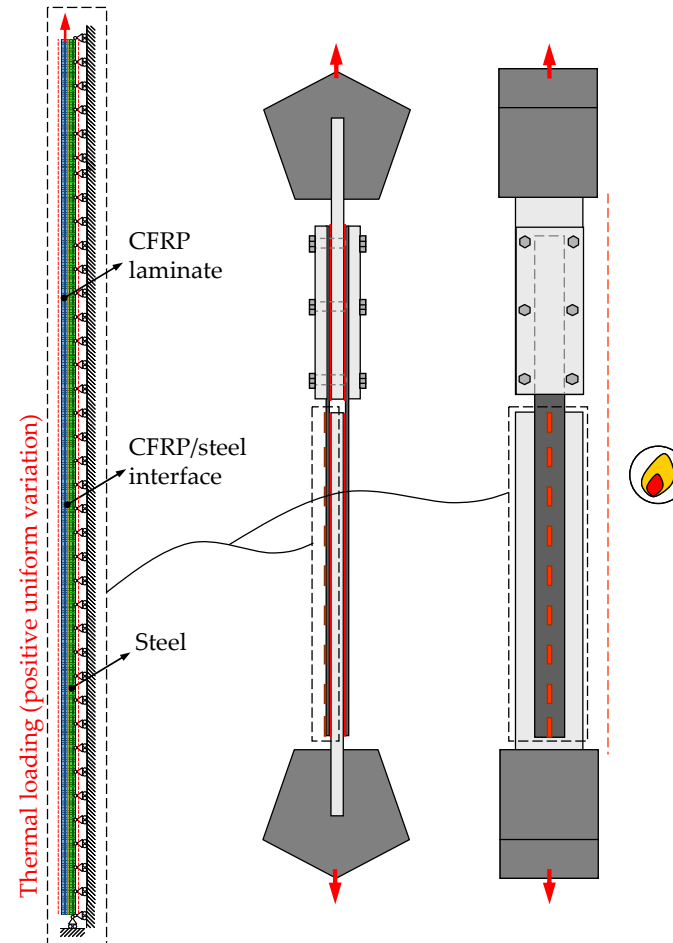
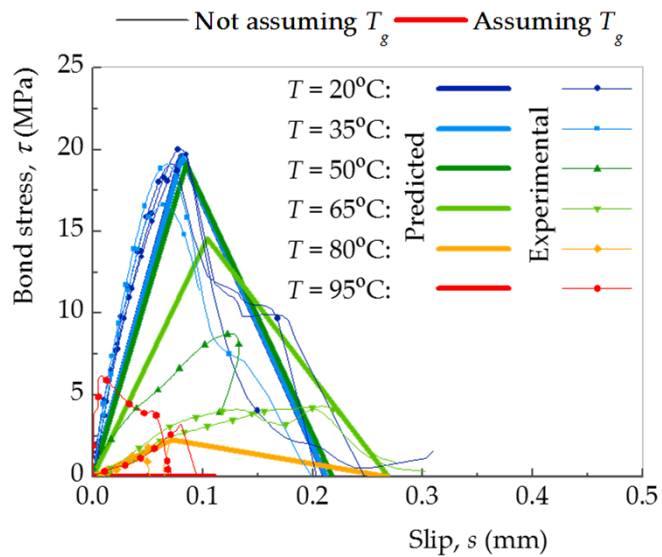
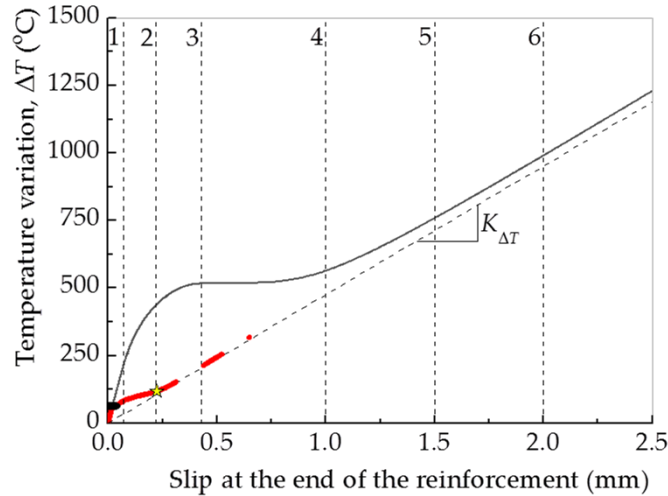
Simulação do descolamento numa ligação colada FRP/substrato



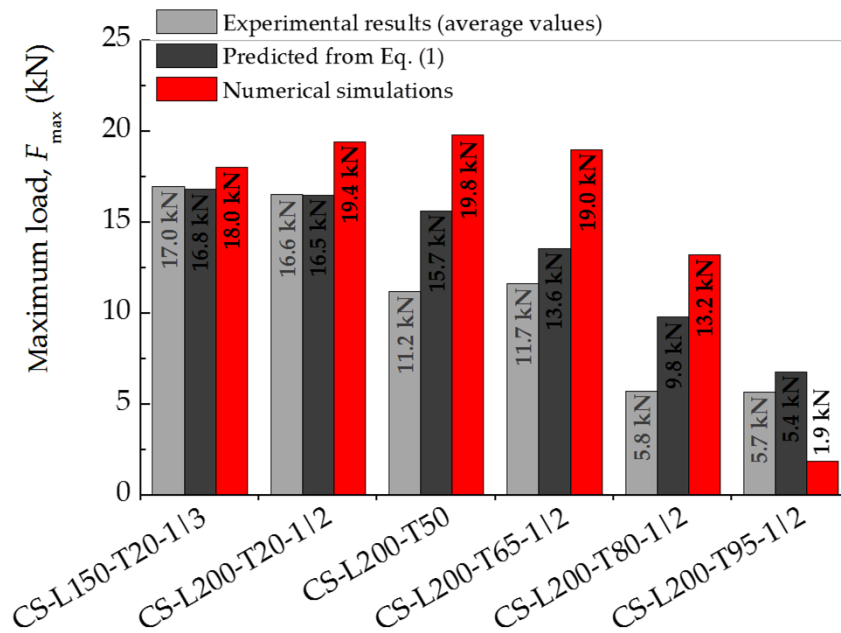
Simulação do descolamento numa ligação colada FRP/substrato



Analisando a performance numa ligação colada sob influência da temperatura

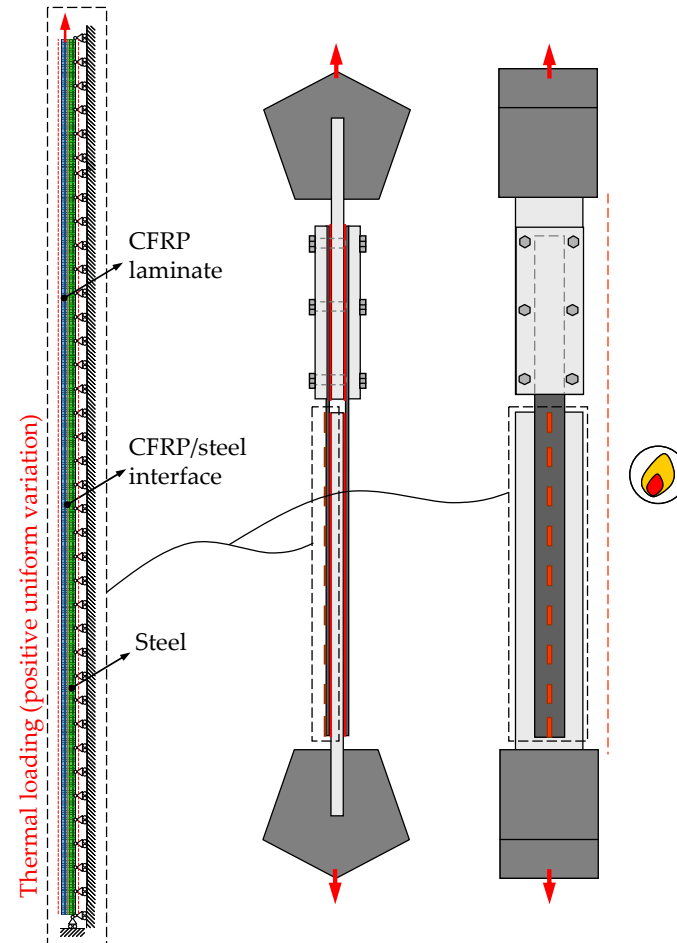


Analisando a performance numa ligação colada sob influência da temperatura



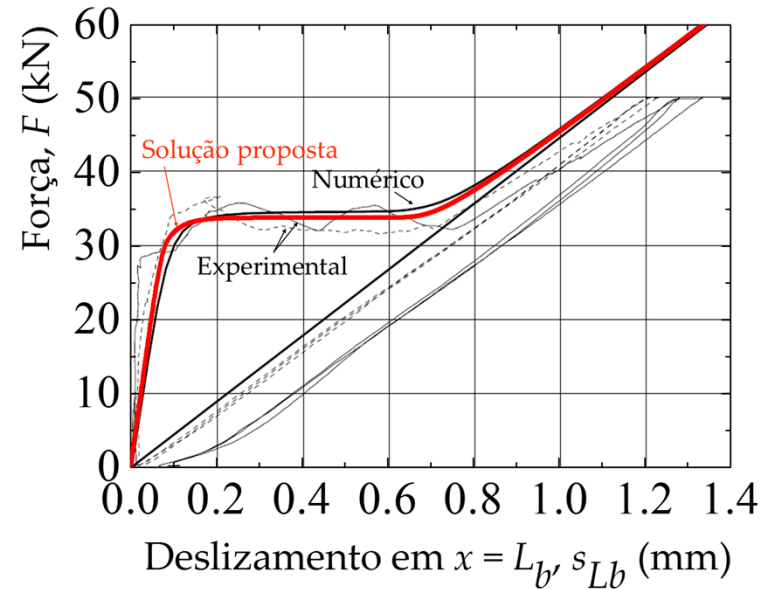
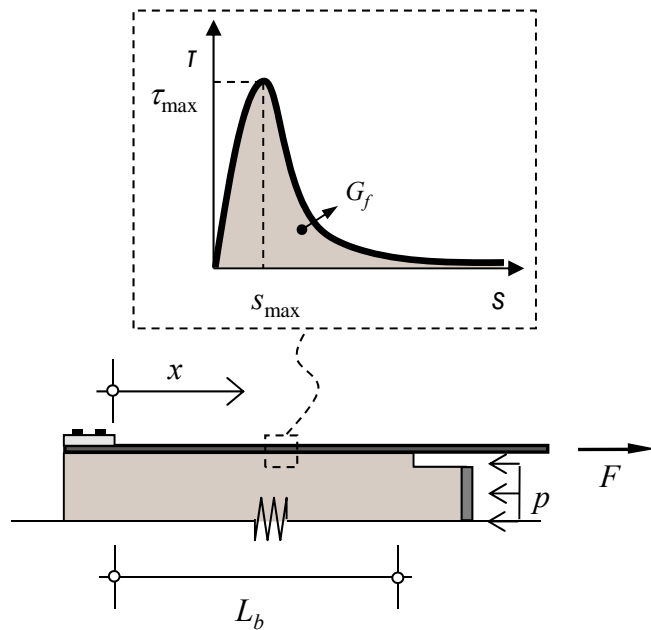
$$F_{\max} = \frac{b_f}{\lambda^2} \cdot \left[\lambda \cdot \sqrt{2G_f} - (\alpha_f - \alpha_s) \cdot \Delta T \right]$$

$$\lambda^2 = \frac{1}{E_f \cdot t_f} + \frac{b_f}{E_s \cdot b_s \cdot t_s}$$



Analisando a performance duma ligação colada através da instalação de ancoragem mecânica

$$\tau(s) = E_f \cdot t_f \cdot \varepsilon_{\max}^2 \cdot B \cdot e^{-B \cdot s} \cdot (1 - e^{-B \cdot s})$$

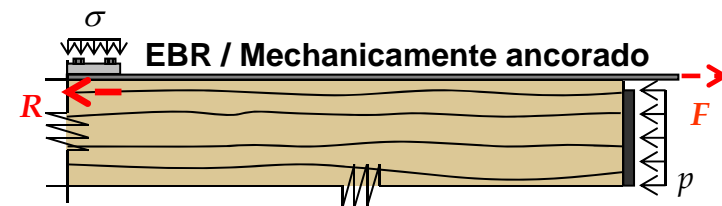
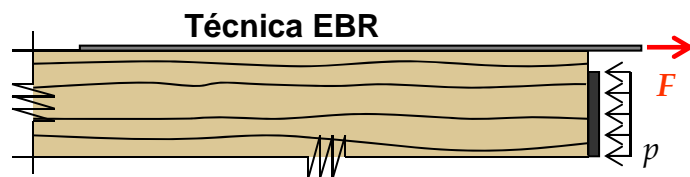
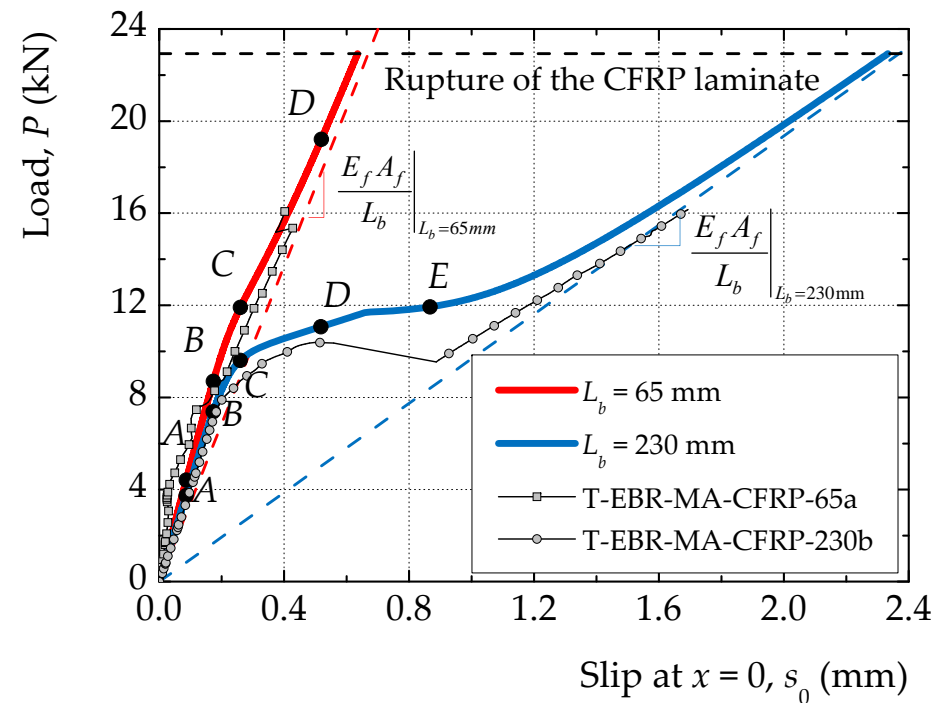
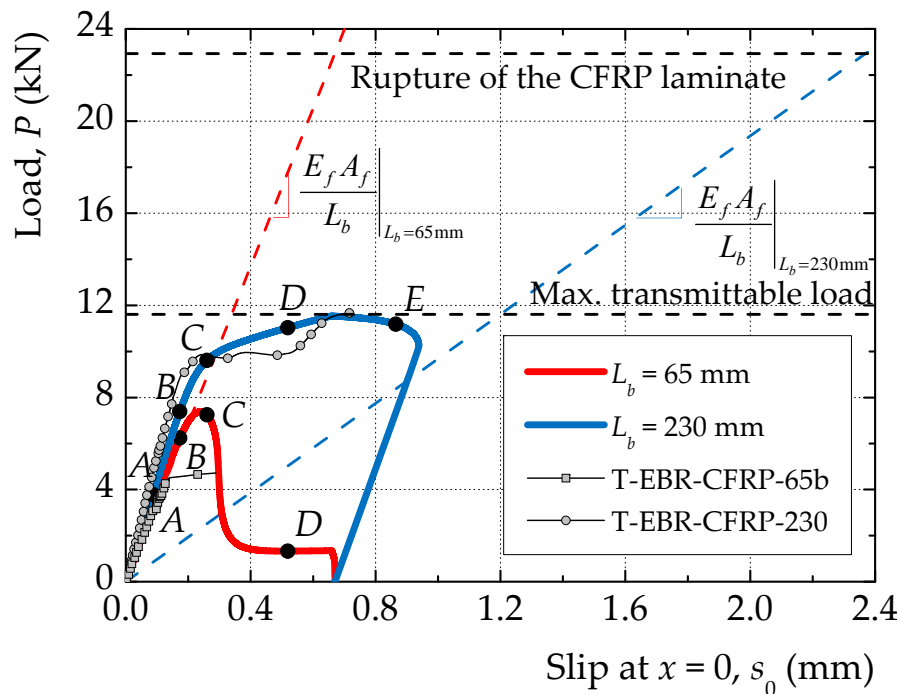


$$s(x) = \frac{1}{B} \cdot \ln \left[\frac{\sinh \left((D \cdot x + C) \cdot B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1} \right) + D}{\frac{\varepsilon_0}{D} + \frac{D}{\varepsilon_0}} \right]$$

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

$$D = \sqrt{\frac{2G_f}{t_f} \cdot \left(\frac{1}{E_f} + \frac{b_f \cdot t_f}{E_s \cdot t_s \cdot b_s} \right)}$$

Melhorando a performance da ligação CFRP/madeira através da instalação de ancoragem mecânica



Considerações finais

Diferentes factores que influenciam a ligação FRP/substrato

- Comprimento de colagem (L_b) igual ou superior ao comprimento efectivo (L_{eff});
- Temperatura;
- Tensões (fora do plano de colagem) impostas à ligação FRP/substrato, e.g. amarração mecânica;
- Preparação das superfícies a colar;
- Resistência (à tracção) do substrato;
- Tipo e espessura do adesivo;
- Geometria da ligação;
- Exposição a agentes ambientais agressivos;
- Fadiga (acções cíclicas);
- Fluência.

LIGAÇÕES COLADAS ENTRE COMPÓSITOS DE FRP E OUTROS MATERIAIS ESTRUTURAIS

» ESTUDO EXPERIMENTAL VS. TEÓRICO

Introdução | Compósitos de FRP, Adesivos e Outros Materiais Estruturais | Avaliação experimental da aderência | Modelação | (Breves) Conclusões gerais

LIGAÇÕES COLADAS ENTRE COMPÓSITOS DE FRP E OUTROS MATERIAIS ESTRUTURAIS ESTUDO EXPERIMENTAL VS. TEÓRICO

Obrigado pela vossa atenção!

Hugo C. Biscaia

Fluid and Structures Engineering, UNIDEMI

NOVA University of Lisbon, Portugal. E-mail: hb@fct.unl.pt



Tertúlias sobre experimentação
8 Maio 2019 | Escola Superior de Tecnologia de Setúbal