

ESTRUTURAS DE MADEIRA REFORÇADAS COM SISTEMAS FRP ANÁLISE DA ADERÊNCIA ENTRE MATERIAIS

L. F. P. Juvandes¹, R. M. T. Barbosa²

¹LABEST, Lab. de Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural, DEC, FEUP.

²Departamento de Engenharia Civil (DEC), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP)



RESUMO

A aplicação conjunta de madeira com materiais compósitos de FRP permite obter elementos estruturais de maior resistência última, propriedades mecânicas estáveis e controladas, originando dimensionamentos otimizados em projecto. Este trabalho incide especificamente na análise da aderência de ligações coladas entre madeira de Pinho Nórdico e compósitos de fibras de carbono (CFRP), numa perspectiva de viabilidade de aplicação deste reforço em estruturas de madeira. A via experimental foi o método preconizado neste trabalho, recorrendo a uma campanha de ensaios de arrancamento por “Pull-Off” e outro de aderência em flexão da ligação madeira-CFRP. Posteriormente, recorreu-se ao ajuste de um modelo analítico para previsão do comportamento da junta colada.

1 - INTRODUÇÃO

Este trabalho incide na análise da aderência de ligações coladas entre madeira estrutural de Pinho Nórdico “*Picea abies*” e compósitos unidireccionais curados *in situ* (mantas) de fibras de carbono (CFRP).

Por via experimental, procurou-se avaliar os parâmetros como a tensão de aderência por arrancamento entre materiais ($f_{wtm,p}$), a força máxima de amarração do compósito à madeira (F_t^R), o comprimento efectivo de colagem entre os materiais ($l_{t,ef}$), a tensão tangencial média desenvolvida na interface de ligação entre os materiais (τ_{med}^{max}), o máximo rendimento possível de ser obtido com o compósito (ϵ_f^R) e a sua dependência com os modos de ruína.

De forma a interpretar os resultados experimentais, realizou-se um estudo analítico de previsão do comportamento de

juntas madeira-CFRP calibrando, de acordo com os ensaios realizados, um modelo preconizado no Fib Bulletin nº 14 (2001), originalmente indicado para betão.

2 - REFORÇO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA COM COMPÓSITOS DE FRP

Os defeitos localizados da madeira, como nós e bolsas de resina, e as suas dimensões máximas em elementos estruturais constituíam limitações da aplicação da madeira, que foram já superadas com o aparecimento da madeira lamelada colada (MLC). A MLC é um produto derivado de madeira, formado pela colagem justaposta e de topo de lamelas de madeira maciça (Natterer, et al, 2000).

Com os avanços no uso da MLC, foram surgindo novos desafios, como a realização de obras com grandes vãos, nomeadamente

pontes ou naves desportivas. Nesta perspectiva, tornou-se de particular importância proceder à melhoria das propriedades mecânicas da MLC, com valores de resistência e rigidez que permitam a produção de elementos capazes de unir maiores vãos com secções transversais cada vez menores.

Neste trabalho, avalia-se a possibilidade de melhoramento estrutural da MLC, através da adição de um elemento de reforço, que tanto pode ser aplicado em reabilitação de estruturas existentes, como em projecto de estruturas novas.

Os materiais compósitos de FRP possuem uma tensão última e um módulo de elasticidade altos que servem claramente os propósitos da aplicação do reforço. Para além disso, possuem a vantagem de ser materiais leves, resistentes à corrosão e apresentarem alguma flexibilidade, facilitando a sua colocação e transporte.

A ligação estrutural entre estes 2 materiais é executada por colagem, com recurso a resinas epoxídicas. Os níveis de esforço a que resistem estas ligações em madeira são ainda pouco estudados, e por isso relativamente desconhecidos visto que se trata de uma aplicação pouco usada dos compósitos de FRP.

Para se reforçar madeira com FRP é importante perceber se os materiais em questão têm capacidade de transferir esforços entre eles. A resistência da interface madeira-adesivo-compósito (ou junta) resulta da comparação dos valores das resistências ao corte e à tracção na camada superficial da madeira, da resistência coesiva do adesivo e da resistência interlaminar do compósito. Dos três casos, o condicionante será o que apresentar menor valor que, em termos correntes, é a madeira. A determinação do valor da resistência à aderência é indispensável para a compreensão dos mecanismos de transmissão de esforços na junta e, nestas condições, permitir estabelecer modelos de interpretação experimentais e analíticos de um reforço (Juvandes (1999), CNR-DT 201 (2007)).

Os materiais constituintes da ligação maioritariamente analisada neste trabalho

são a madeira da espécie Pinho Nórdico “*Picea abies*” e um sistema FRP unidireccional, curado *in situ*, constituído por fibras de carbono (CFRP).

A técnica de reforço base é a colagem externa do compósito (EBR – External Bounded Reinforcement) (Fig. 1.a), mas para além desta, a inserção do reforço em pequenas ranhuras perto da superfície da madeira (NSM – Near Surface Mounted) (Fig. 1.b) pode constituir uma melhoria na técnica de aplicação deste fino e moldável reforço. Esta última técnica de reforço traz, à partida, evidentes vantagens estéticas na aplicação de FRPs em madeira, porque não perturba o aspecto natural da madeira, factor que tantas vezes é decisivo na opção por este material em detrimento, por exemplo, do betão. Haverá mais vantagens se inserir o reforço na própria madeira (técnica NSM), como a protecção contra radiações UV que deterioram a matriz polimérica, protecção contra actos de vandalismo, e ainda a protecção ao fogo, utilizando as capacidades de isolamento térmico e a própria resistência à combustão da madeira, que cria uma camada carbonizada externa protegendo o seu núcleo.

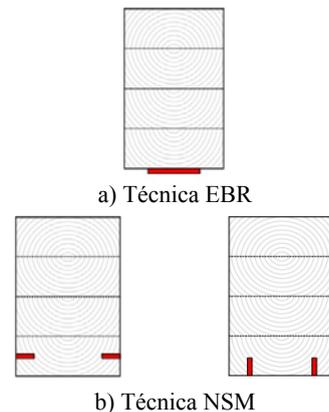


Fig. 1 – Secção transversal de MLC reforçada com FRP.

Como contributo para o conhecimento do uso dos compósitos nas estruturas de madeira, face aos bons resultados já conhecidos da ligação de FRPs a elementos de betão, apresentam-se algumas questões chave que sintetizam os objectivos do presente trabalho:

- Qual é o nível máximo de tensões de corte (em termos médios " τ_{med} ") que é possível mobilizar nas juntas coladas madeira-FRP?
- Qual é a ordem de grandeza do rendimento (" ϵ_f^R/ϵ_f ") esperado para o desempenho do compósito de FRP na ligação à madeira?
- Qual é o comprimento efectivo de ancoragem (" $l_{t,ef}$ ") que mobiliza a máxima força de ancoragem (" $F_{t,max}^R$ ") na junta madeira-FRP?
- Qual é a diferença no desempenho dos modelos de MLC reforçados pelas técnicas EBR e NSM?

3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 - Metodologia

Resume-se um programa experimental que contempla 2 ensaios complementares:

- Ensaio de aderência por "Pull-Off" que avalia a resistência da ligação colada ao arrancamento perpendicular à direcção das fibras (da madeira e do reforço de FRP);
- Ensaio de aderência em flexão que avalia a resistência da ligação ao arrancamento na direcção longitudinal das fibras.

Os trabalhos experimentais de aderência por "Pull-Off" resumidos neste documento foram os de Martins Sá et al. (2005), Vidal Ferreira et al. (2006) e Cruz et al. (2004) no que diz respeito à ligação madeira-FRP, e o trabalho de Costa et al. (2005) como base de dados de ensaios na ligação betão-FRP para termo de comparação. O trabalho experimental de aderência em flexão, aqui resumido, foi o realizado por Silva et al.

(2004) e analisado por Barbosa (2008) respeitante à ligação madeira-CFRP, havendo ainda a comparação de algumas grandezas máximas obtidas em ligações betão-CFRP nos trabalhos de Dimande (2003), Travassos (2005) e Sena-Cruz (2004).

3.2 - Ensaios de aderência por "pull-off"

A campanha de ensaios de "Pull-Off" (EN 1542, 1999) analisada para a ligação madeira-FRP dividiu-se em 2 modelos reforçados tipo, e 1 modelo de controlo sem reforço (Fig. 2). O total de ensaios tratados foi de 44 provetes EBR, 36 provetes NSM e 20 provetes de arrancamento directo em madeira. Analisou-se uma larga variação de juntas, conjugando diferentes tipos de fibra, diferentes adesivos e duas classes diferentes de madeira (Tabela 1).

Os valores de tensão de aderência por "Pull-Off", médios para cada série de ensaios dentro de cada interface analisada, apresentam-se na Fig. 3 e Tabela 2. Às interfaces descritas na Tabela 1 acrescentam-se os valores homólogos obtidos em pastilhas arrancadas directamente do substrato madeira, e outros ainda de pastilhas coladas ao reforço de FRP de elementos de betão por colagem exterior (técnica mais usual).

Da análise da Fig. 3 e da Tabela 2, verifica-se que os níveis de resistência por "Pull-Off" na junta madeira-FRP por EBR são da mesma ordem de grandeza dos obtidos em Betão. Também se conclui que o ensaio de "Pull-Off" não é o indicado para avaliar a aderência da ligação madeira-FRP reforçada pela técnica NSM, sobretudo por imperfeições na execução dos provetes que originou tensões $f_{wtm,p}$ inaceitáveis.



Fig. 2 – Modelos de ensaio "Pull-Off" - tipos de junta.

Tabela 1 – Interfaces analisadas por “Pull-Off”.

Técnica de colagem	Junta			Referência	
	Tipo	Madeira	Compósito		
EBR	A	classe C30	CFRP MBrace Manta	Resin 55	Martins Sá et al.
	B			Resorcinol	Vidal Ferreira et al.
	C		CFRP SikaWrap	Sikadur 330	Martins Sá et al.
	D			Resorcinol	Vidal Ferreira et al.
	E	classe C18	GFRP INEGI Tecido	Resin 55	Vidal Ferreira et al.
	F			Resorcinol	Vidal Ferreira et al.
	G		CFRP MBrace Manta	Resin 55	Cruz et al.
	H		CFRP MBrace Laminado	Resin 220	Cruz et al.
NSM	I	classe C30	CFRP MBrace Manta	Resin 55	Martins Sá et al.
	J			Resorcinol	
	K	CFRP SikaWrap	Sikadur 330	Martins Sá et al.	
	L		Resorcinol		
	M	GFRP INEGI Tecido	Resin 55	Vidal Ferreira et al.	
	N		Resorcinol		

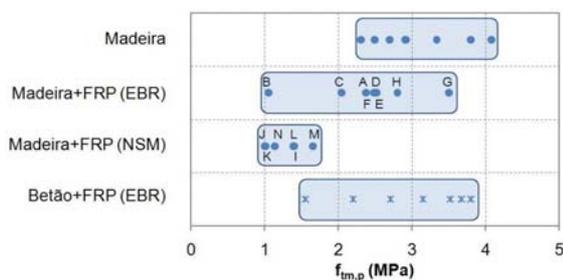
**Fig.3** – Resultados da resistência por “Pull-Off” para madeira e betão.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de “Pull-Off”.

Técnica	Junta	$f_{wtm,p}$ (MPa)	
		Intervalo	Média (DP)
s. reforço	Madeira	2.31 - 4.08	3.07 (0.58)
EBR	Madeira-FRP	1.05 - 3.50	2.41 (0.65)
	Betão-FRP	1.55 - 3.80	2.94 (0.77)
NSM	Madeira-FRP	1.00 - 1.66	1.27 (0.24)

Da análise da Fig. 3 e da Tabela 2, verifica-se que os níveis de resistência por “Pull-Off” na junta madeira-FRP por EBR são da mesma ordem de grandeza dos obtidos em Betão. Também se conclui que o ensaio de “Pull-Off” não é o indicado para avaliar a aderência da ligação madeira-FRP reforçada pela técnica NSM, sobretudo por imperfeições na execução dos provetes que originou tensões $f_{wtm,p}$ inaceitáveis.

Os “Pull-Off” executados na madeira provam ainda que este material tem características de coesão superficial bastante boas, obtendo-se valores de tensão de tracção por “Pull-Off” de $f_{wtm,p}=4.08\text{MPa}$.

3.3 - Ensaio de aderência em flexão

O critério estabelecido para definir o ensaio de aderência em flexão deve-se a ter sido testado anteriormente por vários autores e ser indicado na literatura técnica para avaliação de parâmetros de aderência de ligações coladas entre 2 materiais estruturais (Barbosa, 2008).

3.3.1- Modelos de ensaio

Analisou-se uma só junta madeira-CFRP, constituída por madeira MLC, de Pinho Nórdico “*Picea abies*” da classe C30 (EN338, 2003), reforçada com um sistema FRP de fibras unidireccionais de carbono curadas *in situ*, constituído por manta SikaWrap Hex 230C e resina de impregnação Sikadur 330.

Os parâmetros em análise nos ensaios de aderência em flexão foram a técnica de reforço (3 modelos tipo diferentes) e o comprimento de colagem (3 séries de diferentes comprimentos de colagem). Procurou manter-se a mesma percentagem de reforço em todos os modelos (área de CFRP constante), pelo que a largura total (em secção transversal) de manta de fibras de carbono aplicada foi de 60mm para todas as técnicas (Tabela 3).

O esquema do ensaio de aderência em flexão está ilustrado na Fig. 4, onde só se representou o da técnica EBR. Além da instrumentação visível, também se utilizou 1 LVDT vertical posicionado ao centro. Quanto ao procedimento de carga, o avanço

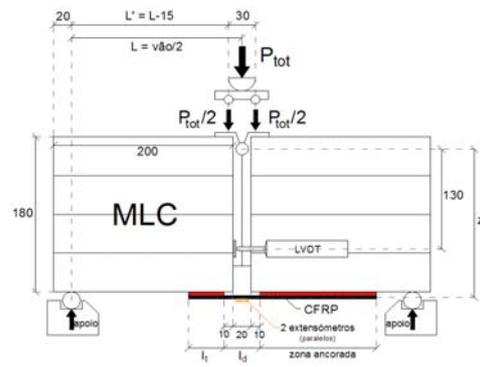
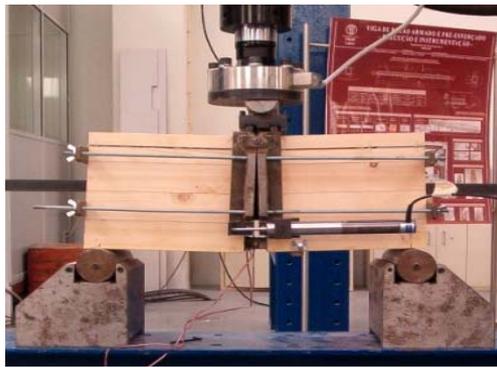


Fig.4 – Ensaio de aderência em flexão para a técnica EBR.

Tabela 3 – Campanha de ensaios de aderência em flexão.

Técnica de reforço	Modelo de ensaio	Série (mm)	Designação do provete
EBR		$l_t = 20$	EBR20.1
			EBR20.2
			EBR20.3
			EBR20.4
		$l_t = 40$	EBR40.1
			EBR40.2
			EBR40.3
			EBR40.4
		$l_t = 60$	EBR60.1
			EBR60.2
			EBR60.3
			EBR60.4
HNSM		$l_t = 20$	HNSM20.1
			HNSM20.2
			HNSM20.3
			HNSM20.4
		$l_t = 40$	HNSM40.1
			HNSM40.2
			HNSM40.3
			HNSM40.4
		$l_t = 60$	HNSM60.1
			HNSM60.2
			HNSM60.3
			HNSM60.4
VNSM		$l_t = 20$	VNSM20.1
			VNSM20.2
			VNSM20.3
			VNSM20.4
		$l_t = 40$	VNSM40.1
			VNSM40.2
			VNSM40.3
			VNSM40.4
		$l_t = 60$	VNSM60.1
			VNSM60.2
			VNSM60.3
			VNSM60.4

foi controlado por velocidade imposta do actuador, a uma taxa de $2\mu\text{m/s}$, critério esse que foi estabelecido para cumprir os 300 ± 120 segundos (5 ± 2 minutos) de tempo até a rotura.

3.3.2- Resultados e análise

O comportamento global dos modelos pode ser avaliado através das curvas Momento vs Deslocamento Vertical (Fig.5).

Cada curva é representativa do desempenho de um grupo de 4 provetes ensaiados em cada série. As curvas apresentam duas fases, sendo a inicial de incremento rápido de carga, com pequena deformação do provete e a seguinte de aspecto praticamente linear e acentuada deformação até à ruína. Por esse motivo, os valores máximos medidos para as grandezas físicas de caracterização da ligação madeira-CFRP coincidem com

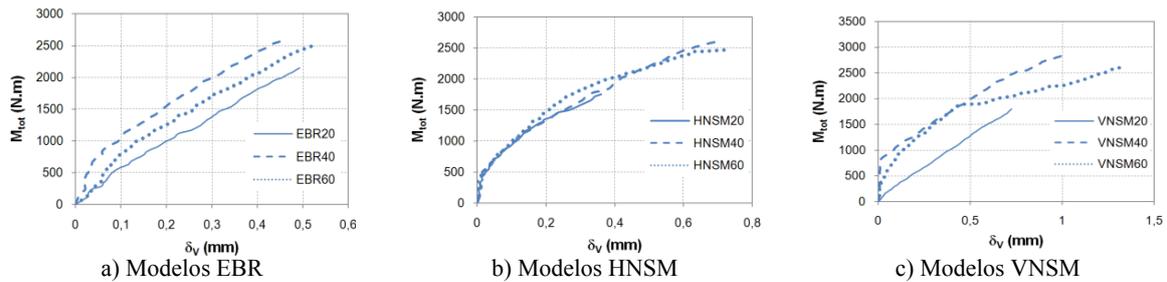


Fig. 5 – Curvas Momento vs Deslocamento Vertical representativas de cada série.

os valores na rotura do modelo. Ao longo deste trabalho, apenas serão apresentados os valores máximos (na rotura) das grandezas físicas relevantes, referenciados com o índice “R”. Na Tabela 4, expõem-se os valores médios do momento último (rotura), para cada série de colagem, e os incrementos desses relativos ao caso $l_t=20\text{mm}$ (ΔM_{tot}^R), face à variação dos comprimentos de colagem, segundo as 3 técnicas de

dos modos de ruína admissíveis nos ensaios de flexão está esquematizada na Tabela 5, atribuindo-lhes as designações de R1 a R5.

O desempenho do compósito é avaliado pela força/tensão de tracção (F_t^R/σ_t^R) e extensão máximas (ε_f^R) que se atingiram, em comparação com os valores resistentes máximos tabelados pelo fabricante das fibras. A partir das curvas de valores

Tabela 4 – Momentos últimos observados por Técnica de Reforço. (valor médio)

Série	EBR		HNSM		VNSM	
	M_{tot}^R (N.m)	ΔM_{tot}^R (N.m)	M_{tot}^R (N.m)	ΔM_{tot}^R (N.m)	M_{tot}^R (N.m)	ΔM_{tot}^R (N.m)
$l_t=20\text{mm}$	2000	-	1556	-	1654	-
$l_t=40\text{mm}$	2452	452	2497	941	2593	939
$l_t=60\text{mm}$	2242	242	2619	1063	2462	808

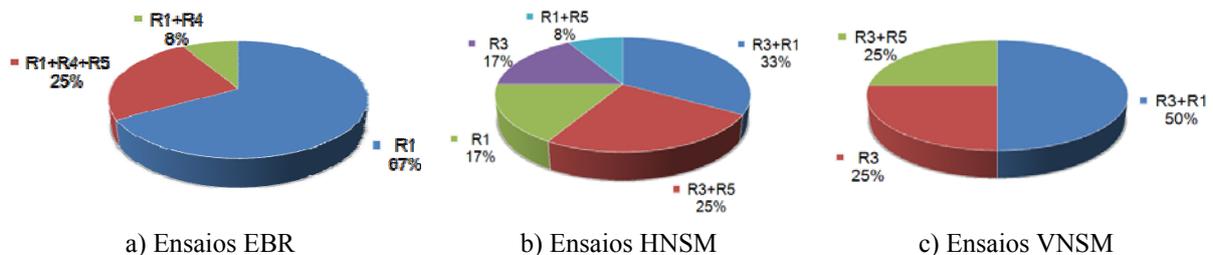


Fig. 6 – Distribuição dos modos de ruína dos ensaios de aderência em flexão.

reforço. Verifica-se que, nos casos NSM, este valor é o dobro do obtido no caso EBR.

Os diagramas da Fig. 6, de distribuição percentual dos modos de ruína registados nos ensaios, revelam que o modo de rotura predominante nos provetes EBR foi o corte pela madeira (tipo R1). Nos provetes NSM a rotura foi sobretudo do tipo mista, com escorregamento numa das fiadas e corte na madeira na outra fiada (tipo R3+R1), ou mesmo escorregamento e rotura por tracção do compósito (tipo R3+R5). A exposição

médios representativos da variação da força máxima (ou tensão máxima) e da extensão máxima no compósito com o comprimento de colagem l_t (3 séries), para as 3 técnicas de reforço, construíram-se os gráficos ilustrados na Fig. 7.

Pela análise da forma e da posição relativa dos picos nas curvas F_t^R vs l_t e ε_f^R vs l_t determinam-se os comprimentos efectivos de colagem ($l_{t,ef}$), a partir dos quais o

Tabela 5 – Modos de ruína admissíveis nos ensaios de aderência em flexão.

Tipo	Descrição	Técnicas / Esquemas	
		EBR	NSM
R1	Rotura por corte na madeira		
R2	Rotura por escorregamento na interface madeira-resina		
R3	Rotura por corte na resina		
R4	Rotura por corte de uma película muito fina de fibras		
R5	Rotura por tracção do compósito		

aumento do comprimento de colagem não se traduz num aumento de resistência da ligação. Para as técnicas EBR e VNSM situa-se perto dos 40mm e para a técnica HNSM atinge-se apenas aos 60mm.

A Tabela 6 apresenta os valores máximos das grandezas σ_t^R , ϵ_f^R e $l_{t,ef}$ observados nos ensaios, com a respectiva percentagem do aproveitamento de compósito que se conseguiu colando-o à madeira. Os resultados apresentados englobam as 3 séries de comprimentos de colagem testadas em cada uma das 3 técnicas de reforço. Estes valores demonstram o bom resultado da aderência mobilizada na transferência de esforços madeira-CFRP, sobretudo no comporta-

mento da técnica NSM, relativamente aos menores valores observados no caso EBR.

O desempenho da junta analisa-se pela tensão tangencial média (τ_{med}^R), que se conseguiu instalar na interface madeira-CFRP no instante da rotura, cujos valores médios estão representados na Fig. 8.

Os valores máximos das tensões tangenciais médias obtiveram-se nos comprimentos de colagem menores ($l_t=20mm$), com os modos de rotura por corte pela madeira (R1). Na técnica EBR atingiu-se tensões de 10.2MPa e nas técnicas HNSM e VNSM obtiveram-se tensões na ordem de 9.1MPa. É relevante constatar a mobilização de tensões de corte na madeira na ordem dos 10MPa, em

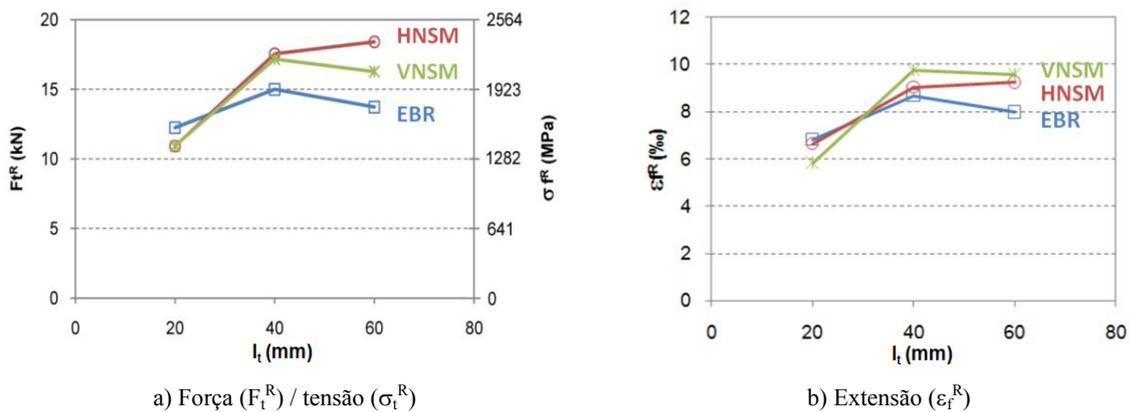


Fig. 7 – Variação das F_t^R , σ_t^R e ϵ_f^R máximas no compósito com o comprimento l_t e a técnica de reforço.

Tabela 6 – Valores indicativos do desempenho do compósito em cada técnica de reforço.

Técnica	$\sigma_{t \max}^R$ [MPa]	$\sigma_{t \max}^R / \sigma_{t \text{ Fabricante}}^R$	$\epsilon_{f \max}^R$ [%]	$\epsilon_{f \max}^R / \epsilon_{f \text{ Fabricante}}^R$	$l_{t,ef}$ [mm]	Nº provetes
EBR	1900	54%	8.7	58%	40	12
HNSM	2350	68%	9.3	62%	40 ↔ 60	12
VNSM	2200	63%	9.8	65%	40 ↔ 60	12
Fabricante (tracção)	$f_{tu}=3500$	100%	$\epsilon_{fu}=15$	100%	-	-

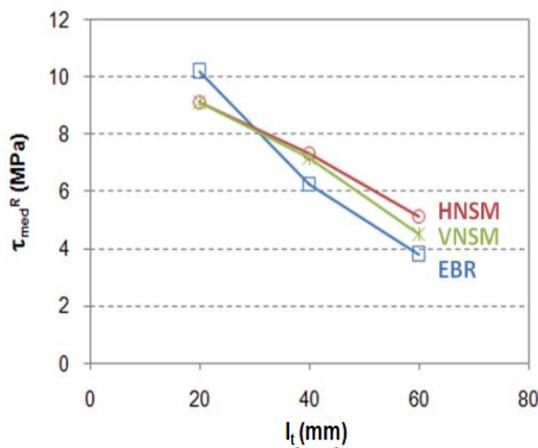


Fig. 8 – Variação do valor máximo da τ_{med}^R com o comprimento l_t e a técnica de reforço.

contraste com as características resistentes da madeira de classe C30 (EN 338, 2003), presentes na Tabela 7. Duas razões podem explicar tal facto:

- Por um lado, a heterogeneidade da madeira, enquanto material natural, justifica a diferença entre os valores médio (τ_{med}) e característico ($f_{v,k}$) da resistência ao corte, face aos resultados médios registados nos ensaios de aderência em flexão;
- Por outro, o mecanismo de aderência aqui testado pode solicitar de forma mista a madeira ao corte e à tracção, devido provavelmente à penetração de resina nos poros da madeira que forma um bloco rígido nas primeiras camadas de fibras desta, formando uma “base” para poderem ser solicitadas à tracção, onde a madeira apresenta um valor de resistência muito superior.

Não foi possível avaliar o pico de tensão tangencial na interface, mas só a tensão tangencial média porque, para cada modelo, foi colado um extensómetro na zona descolada do CFRP correspondente à solicitação máxima no compósito. Segundo a literatura técnica, a distribuição real das tensões tangenciais ao longo do comprimento colado não é constante, apresentando picos nas extremidades de ligação dos materiais, como ilustrado na Fig. 9.

3.3.3- Comparação com juntas de Betão-CFRP

Nesta secção, procura-se comparar as

Tabela 7 – Madeira de Pinho Nórdico (*Picea abies*).

	Resistência da madeira	Observações
Corte	$f_{v,k} = 3.0$ MPa	classe C30 (EN 338, 2003)
	$\tau_{med} = 8.3-9.8$ MPa	Pinho Nórdico (Ukyo et al., 2006)
Tracção	$f_{t,0,k} = 18.0$ MPa	classe C30 (EN 338, 2003)
	$f_{t,90,k} = 0.6$ MPa	

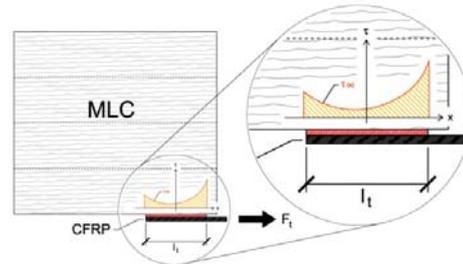


Fig. 9 – Esquema de distribuição das tensões tangenciais na ligação madeira-CFRP.

conclusões obtidas para o comportamento de juntas madeira-CFRP com o estado actual dos conhecimentos retratados em vários documentos relativamente a juntas coladas betão-CFRP, em circunstâncias semelhantes de reforço pelas técnicas EBR e NSM (tipo VNSM). Para o efeito, seleccionaram-se os trabalhos de Dimande (2003) e Travassos (2005) no domínio da técnica EBR e o documento de Sena-Cruz (2004) para o âmbito da técnica NSM (tipo VNSM).

O trabalho de Barbosa (2008) expõe as principais conclusões desta comparação relativamente ao comportamento geral dos modelos e ao desempenho do compósito e da junta colada em estudo.

Na técnica EBR, o substrato de madeira tem um comportamento pior do que o de betão, embora se tenha obtido escorregamento máximo na ligação da mesma ordem de grandeza. Para a madeira, a tensão de tracção máxima que se desenvolveu no compósito foi de 1600MPa, contra os 2600MPa observados no betão, ou seja, na madeira desenvolveram-se forças que só chegaram a 60% das desenvolvidas no betão. Verifica-se que, na técnica EBR, o reforço de estruturas de madeira com CFRP é medianamente eficaz, porque se admite existir uma concentração de esforços na ligação e a textura ortotrópica da madeira não permite dissipar essa energia tão bem como o betão. Uma ressalva para o facto de se ter conseguido,

na madeira, um bom rendimento do compósito de $\approx 50\%$. Esta análise foi efectuada em modelos de ensaio, semelhantes entre os documentos estudados.

Em termos de desempenho do compósito, quer em juntas madeira-CFRP quer betão-CFRP, constata-se que a técnica NSM mobilizou um maior rendimento do compósito relativamente à EBR, sendo o nível de valores da extensão última do compósito (ε_f^R) maior para o caso das juntas betão-CFRP, do que a ligação desse à madeira (Barbosa, 2008).

No âmbito da análise do desempenho das juntas coladas, ilustra-se na Fig. 10 a variação da tensão normal máxima no CFRP (valor médio na rotura) em função do comprimento de colagem da junta, para os modelos madeira-CFRP e betão-CFRP e segundo as duas técnicas de reforço EBR e NSM. Faz-se representar, também, as curvas de previsão da variação da tensão no compósito para as juntas, de acordo com o modelo analítico recomendado no documento Fib Bulletin 14 (2001).

Na Tabela 8, resumem-se os valores esperados máximos da tensão (σ_f^R) e da

extensão (ε_f^R) que se conseguem transmitir ao compósito e a indicação do comprimento mínimo de colagem ($l_{t,ef}$) necessário para se garantir essa aderência máxima.

Na técnica EBR, a aplicação do CFRP na madeira consegue obter valores de eficiência no compósito maiores que 86% dos alcançados na ligação ao substrato betão. Realce-se que estes valores foram obtidos nos reforços de madeira, utilizando apenas um comprimento de colagem que é 3 vezes inferior ao necessário no betão. Na técnica NSM em geral, a tensão máxima transmitida ao reforço de CFRP apresenta um aumento considerável da conseguida na técnica EBR, atingindo, no caso da madeira, valores da mesma ordem de grandeza da aplicação no betão. O comprimento necessário de colagem ($l_{t,ef}$) nos dois substratos aumenta ligeiramente na técnica NSM relativamente à técnica EBR. Mantém-se, contudo, que o comprimento de colagem efectivo na madeira é 3 vezes menor do que o equivalente no betão. Pelo exposto, a técnica NSM (caso VNSM) apresenta-se como o tipo de reforço mais eficiente para os dois substratos.

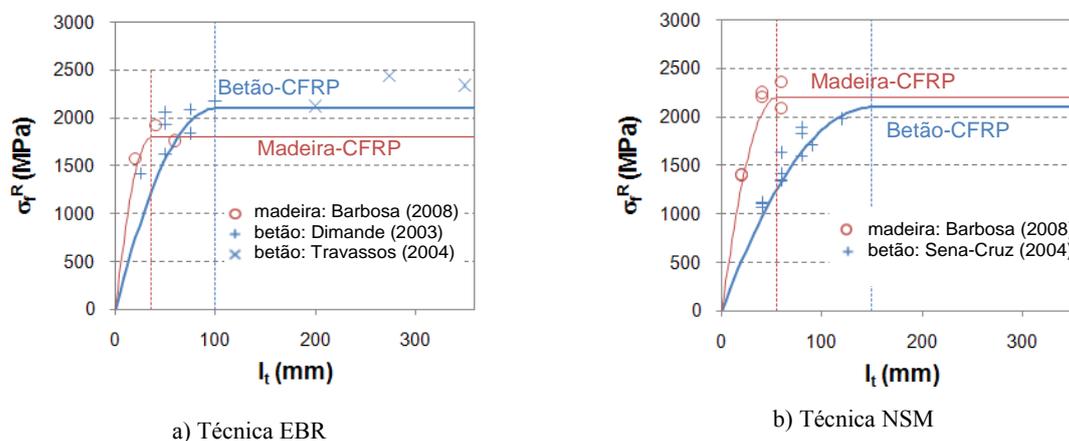


Fig. 10 – Variação da σ_f^R no compósito com o comprimento l_t para juntas de madeira-CFRP e betão-CFRP.

Tabela 8 – Comparação de rendimentos de juntas madeira-CFRP e betão-CFRP.

Grandezas	Técnica EBR / Juntas			Técnica NSM / Juntas		
	Madeira	Betão	Mad/Bet	Madeira	Betão	Mad/Bet
σ_f^R max (MPa)	1800	2100	86%	2200	2100	105%
ε_f^R max (%)	7.8	8.8	89%	9.6	14	69%
$l_{t,ef}$ (mm)	36	100	36%	55	150	37%

4 - MODELO ANALÍTICO

4.1 - Modelo FIB ajustado

De acordo com a campanha experimental de análise da aderência da ligação madeira-CFRP, calibrou-se o modelo teórico proposto no documento da Fib Bulletin n.º14 (2001) para previsão da força máxima de ancoragem (F_t^R) do FRP à madeira, em função do seu comprimento de colagem (l_t).

As equações base deste modelo são definidas por dois ramos:

- Equação 1: ramo parabólico crescente enquanto o comprimento l_t é menor que o comprimento efectivo de colagem da ligação ($l_t < l_{t,ef}$);
- Equação 2: ramo horizontal na força máxima de ancoragem da ligação ($F_t^R \text{ max}$) para comprimentos de colagem superiores ao comprimento efectivo ($l_t \geq l_{t,ef}$).

Por sua vez, a equação 3 define o comprimento efectivo de colagem ($l_{t,ef}$) e a equação 4 os parâmetros auxiliares de geometria da zona de ancoragem.

$$F_t^R = F_t^R \text{ max} \cdot \frac{l_t}{l_{t,ef}} \cdot \left(2 - \frac{l_t}{l_{t,ef}}\right) \quad [N] \quad (1)$$

$$F_t^R \text{ max} = c_1 \cdot k_b \cdot k_o \cdot b_f \cdot \sqrt{E_f \cdot t_f \cdot f_{wcm,p} \cdot k_{\mu}} \quad (2)$$

$$l_{t,ef} = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{c_2 \cdot f_{wcm,p}}} \quad [mm] \quad (3)$$

$$k_b = 1.06 \cdot \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \quad \text{A } 1 \leq k_b \leq 1.29 \quad (4)$$

A Fig. 11 ilustra os esquemas de ligação colada madeira-CFRP e identifica as variáveis geométricas constituintes das equações dos modelos associados às

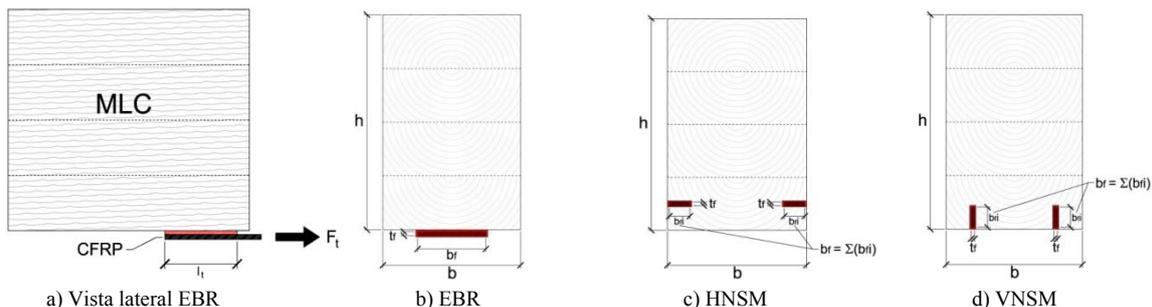


Fig. 11 – Esquemas de ligação madeira-CFRP nas várias técnicas de reforço (alçado e secção transversal).

técnicas de reforço. A Tabela 9 define e quantifica todas as variáveis que constam das equações 1 a 4, de modo a calibrar o modelo teórico face aos resultados obtidos nos provetes testados para a técnica EBR, técnica HNSM e técnica VNSM (Barbosa, 2008).

4.2 - Interpretação de resultados

Os gráficos ilustrados na Fig. 12 representam, para cada técnica de reforço, a “curva de previsão” da relação F_t^R / l_t pela aproximação do modelo Fib ajustado na Tabela 9 aos resultados experimentais dos ensaios de aderência em flexão (item 3.3).

As curvas “envolvente superior” e “envolvente inferior” foram adicionadas como resposta à limitada base de dados de resultados experimentais estudada, na tentativa de sugerir um intervalo de dados seguro dos parâmetros de calibração deste modelo analítico (resumido na Tabela 10).

A Tabela 11 e a Fig. 13 mostram a boa aproximação entre a teoria e a prática, evidenciando o ajuste adequado do modelo teórico do fib Bulletin N.º14 à ligação madeira-CFRP. Por ser limitada a campanha experimental usada nessa calibração, alguma prudência e maior discussão deverá existir no futuro aquando a utilização dos resultados teóricos obtidos.

5 - CONCLUSÕES

A conjugação Análise Experimental vs. Interpretação Analítica provou ser uma metodologia adequada para o estudo de avaliação da aderência na ligação colada madeira-CFRP.

Os ensaios de “Pull-Off” são indicados para avaliar aderência de juntas coladas à

Tabela 9 – Definição e quantificação das variáveis para o modelo Fib ajustado (Barbosa, 2008).

Variáveis	Definição	Quantificação / Técnica		
		EBR	HNSM	VNSM
c_1	Factor obtido por calibração de resultados de ensaios	0.7	1.05	0.9
c_2	Factor obtido por calibração de resultados de ensaios	10	7	10
t_f	Espessura de compósito colado (medida na secção transversal) [mm]	0.13	0.26	0.26
k_c	Factor que representa o efeito da preparação da superfície (varia de 0.67 até 1.0 para melhores e mais compactas superfícies)	1	1	1
k_{μ}	É afecto ao tipo de ensaio e grau de reforço	1	1	1
$f_{wtm,p}$	Resistência de aderência de arrancamento da madeira pelo Ensaio de Pull-Off: valor médio dos ensaios onde a rotura ocorreu pela madeira (característica da madeira) – substitui o valor de resistência à tracção f_{ctm} da fórmula original para betão [MPa]	2.5	2.5	2.5
E_f	Módulo de elasticidade à tracção das fibras de reforço (tabelado pelo fabricante) [MPa]	230000	230000	230000
b_f	Largura de compósito colado (medida na secção transversal) [mm]	60	30	30
b	Largura da madeira onde é feita a colagem (medida na secção transversal) [mm]	115	não aplicável	não aplicável
k_b	Factor que representa a geometria da zona de ancoragem (eq. 6)	1.2018	1.5	1.5

Tabela 10 – Valores recomendados para as variáveis do modelo Fib ajustado.

Variável	Técnica	Intervalo admissível	Valor recomendado
c_1	EBR	0.6 - 0.8	0.7
	HNSM	0.95 - 1.15	1.05
	VNSM	0.8 - 1.1	0.9
c_2	EBR	6 - 12	10
	HNSM	5 - 10	7
	VNSM	7 - 11	10

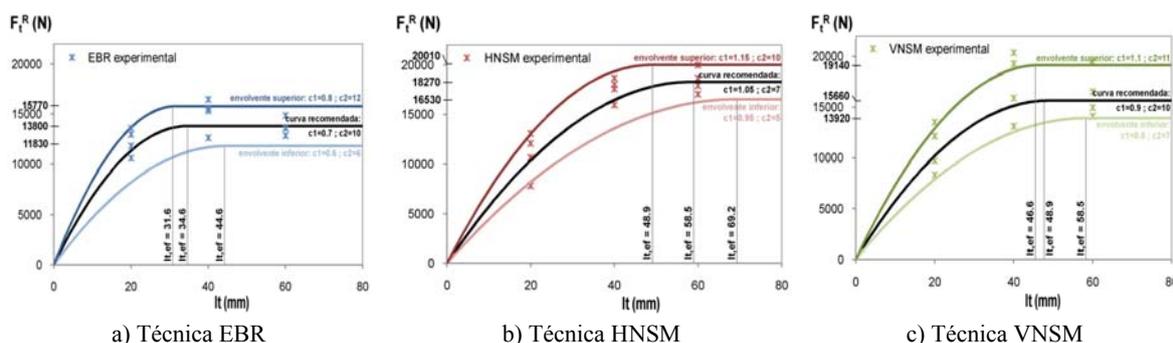
Tabela 11 – Valores teóricos vs experimentais

Método	Grandeza	EBR	HNSM	VNSM
Teórico	F_t^R [N]	13800	18296	15659
	$l_{t,ef}$ [mm]	35	59	49
Experimental	F_t^R [N]	14990	18390	17160
	$l_{t,ef}$ [mm]	40	60	40 a 60

superfície do material (caso da técnica EBR) e pouco adequados para o caso de juntas inseridas em rasgos não superficiais do material (caso da técnica NSM).

Comparativamente com o comportamento de juntas de betão-FRP, o programa experimental conduziu a tensões de aderência por “Pull-Off” da mesma ordem de grandeza dos primeiros, quer sobre a superfície da madeira, quer sobre juntas de madeira-FRP executadas sobretudo pela técnica EBR. Deste estudo, concluíram-se os seguintes valores médios da tensão de aderência por arrancamento ($f_{wtm,p}$): 3.07 MPa (madeira), 2.41 MPa (juntas madeira-FRP com EBR) e 1.27 MPa (juntas madeira-FRP com NSM).

Os ensaios de aderência em flexão demonstraram ser um método adequado de avaliação, para as 3 técnicas de reforço (EBR, HNSM e VNSM), de informações como: as curvas de variação dos momentos últimos com o comprimento de colagem, o índice de desempenho do CFRP (em termos de deformação ε_f^{\max}), o comprimento

**Fig.12** – Previsão teórica da força de ancoragem da ligação em função do comprimento de colagem.

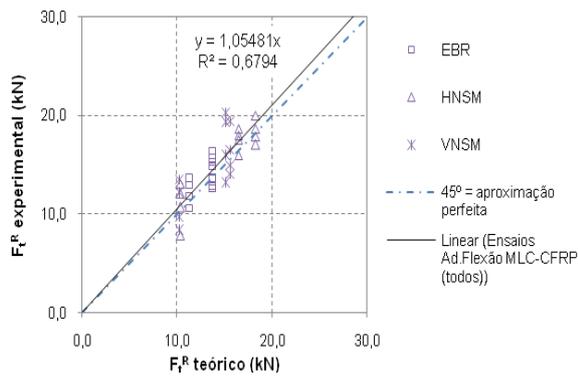


Fig. 13 – Correlação entre os valores experimentais e teóricos da força de ancoragem da ligação.

efectivo de colagem ($l_{t,ef}$), o valor da tensão de corte na junta (τ_{med}^{max}) e os modos de ruína espectáveis na ligação madeira-FRP.

Nesses ensaios, comprovou-se que o compósito conseguiu mobilizar extensões máximas (ε_f^{max}) na ordem de 8‰ a 10‰ (EBR – 8.7‰; HNSM – 9.3‰; VNSM – 9.8‰), ou seja, até próximo de 70% da extensão última do material à tracção ($\varepsilon_{f,u}=15\%$).

Neste trabalho, será admissível avançar com a informação de que os comprimentos efectivos de colagem ($l_{t,ef}$) entre o Pinho Norueguês e Polímero Reforçado com CFRP curado *in situ*, sejam os seguintes: 35mm (juntas EBR), 60mm (juntas HNSM) e 50mm (juntas VNSM),

Em termos de desempenho da junta madeira-CFRP, sublinha-se que o valor máximo da tensão tangencial média (τ_{med}^R) na interface atingiu os 9MPa, na técnica NSM e ultrapassou os 10MPa, na técnica EBR.

O modelo analítico fib Bulletin N°14 (2001) aqui ajustado mostrou ser capaz de prever o comportamento de juntas madeira-CFRP, nomeadamente, a força de máxima de ancoragem ($F_t^R_{max}$) e o correspondente comprimento efectivo de colagem ($l_{t,ef}$), naturalmente, condicionado à reduzida base de dados experimentais que se dispunha para o calibrar.

Em termos globais, o programa experimental permite avançar com os seguintes valores médios: $f_{wtm,p} = 2.5\text{MPa}$; $l_{t,ef} = 35\text{mm}$ (EBR) e $l_{t,ef} = 60\text{mm}$ (NSM); $\tau_{med}^{max} = 9\text{MPa}$; $\varepsilon_f^{max} = 8\%$ (70% $\varepsilon_{f,u}$). Estas conclusões podem ser interpretadas como

recomendações a ter presente no projecto de reforço de estruturas de madeira com sistemas CFRP.

6 - AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam os seus agradecimentos ao apoio prestado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), ao empenho do Eng° Sérgio P. L. Silva (Labest) na campanha experimental e à colaboração das empresas FLEXILAM, que disponibilizou todos os provetes de madeira, S&P Reinforcement e Sika Portugal SA pela sua prestabilidade e fornecimento dos sistemas compósitos de reforço.

7 - REFERÊNCIAS

- Barbosa, R. M. T., 2008, Estruturas de Madeira Lamelada Colada reforçada com Sistemas Compósitos de FRP, análise da aderência entre os materiais, Dissertação de Mestrado Integrado, FEUP, Porto, 168 pp.
- Costa, M. J. P. M., Barbosa, R. e Juvandes, L. F. P., 2005, Análise de aderência das ligações coladas betão-FRP e sua correlação com as propriedades mecânicas do betão, Relatório de investigação, Seminário MPC, Dep. de Eng. Civil (DECivil), FEUP, Porto, Junho, 61p.
- CNR-DT 201/2005 (2007) Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures – Timber Structures, CNR Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Rome, 56p
- Cruz, P., Dias, S. e Branco, J., 2004, Avaliação da aderência da ligação colada madeira-CFRP, Cimad'04 – A Madeira na Construção – 1.º Congresso Ibérico, 25 e 26 Março, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho Portugal, Guimarães, p 469-478.
- Dimande, A. O., 2003, Influência da interface no reforço à flexão de estruturas de betão com sistemas de FRP. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, 253 pp.

- EN 1542, 1999, Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Measurement of bond strength by pull-off, European Standard, CEN, Brussels.
- EN 338, 2003, Structural timber. Strength classe.
- fib Bulletin N°14, 2001, Externally Bonded FRP Reinforcement for RC, Technical report, FIB, Lausanne, Suíça, Julho, 138 pp.
- Juvandes, L.F.P., 1999. Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP, Tese de Doutoramento, FEUP, Porto, 395 pp.
- Martins Sá, I. B., Branco, L. A. M. V. e Juvandes, L. F. P., 2005, Análise da aderência de Ligações coladas entre sistemas de FRP e elementos de Madeira Lamelada Colada - ensaios de “Pull-Off”, Relatório de investigação, Seminário MPC, Dep. de Eng. Civil (DECivil), FEUP, Porto, Junho, 67pp.
- Natterer, J., Sandoz, J.L. and Rey, M. (2000) Construction en bois – Materiau, technologie et dimensionnement, Traité de Génie Civil, vol 13, Polyt. et Univ. Romandes, Lausanne, 472p.
- Sena-Cruz, J. M., 2004, Strengthening of concrete structures with near-surface mounted CFRP laminate strips, Dissertação de Doutoramento, Escola de Engenharia da Universidade do Minho.
- Silva, S. P. L., Cachim, P. B. e Juvandes, L. F. P., 2004, Técnicas avançadas de reforço de estruturas de madeira com compósitos reforçados com fibras (FRP), Cimad’04 – A Madeira na Construção – 1.º Congresso Ibérico, 25 e 26 Março, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho Portugal, Guimarães, p 613-622.
- Travassos, N. A. C., 2005, Caracterização do comportamento da ligação CFRP-betão, Dissertação de Mestrado, IST, Lisboa.
- Ukyo, S. e Masuda, M., 2006, A New Method for Measuring the True Shear Strength of Wood, WCTE 2006 – 9th World Conference on Timber Engineering, 6 a 10 Agosto, Portland, EUA, 7p..
- Vidal Ferreira, R. B. e Juvandes L. F. P., 2006, Comportamento de juntas coladas madeira-CFRP e madeira-GFRP através de ensaios de “Pull-Off”, Relatório de investigação, Projecto MPC, Dep. de Eng. Civil (DECivil), FEUP, Porto, Julho, 20p.