

COMPORTAMENTO ESTÁTICO E À FADIGA DE JUNTAS COLADAS COM PERFIS PULTRUDIDOS

Ribeiro, A.S.¹; De Jesus, A.M.P.²; Ferreira, A.J.M.¹

¹Prof. Associado, ²Prof. Auxiliar
IDMEC - Instituto de Engenharia Mecânica
Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro - Divisão de Engenharia Mecânica
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial – FEUP



RESUMO

Os problemas de durabilidade dos materiais tradicionais e a exigência das actuais construções têm contribuído para o desenvolvimento de novos materiais e soluções estruturais. Neste domínio, os perfis com barras pultrudidas de fibra de vidro GFRP (Glass Fibre Reinforced Polymer) começam a desempenhar um papel cada vez mais importante no domínio da construção estrutural, tais como coberturas, pontes pedonais e outras aplicações, devido à sua elevada resistência e reduzido peso. Neste trabalho pretende-se determinar o comportamento mecânico de ligações coladas em GFRP, quer em regime estático quer em regime de fadiga. Foram analisadas juntas coladas sobrepostas em corte simples e corte duplo.

1 - INTRODUÇÃO

A durabilidade dos materiais tradicionais tem provocado alterações nas práticas de dimensionamento e na própria regulamentação. Este aspecto, a par das exigências de velocidades de construção crescentes, tem tido um efeito impulsionador no desenvolvimento de novos materiais estruturais, mais leves, menos sujeitos à degradação causada pelos agentes agressivos e com menores exigências de manutenção.

Assim, surgem os perfis de GFRP (“Glass Fibre Reinforced Polymer”), que são materiais compósitos constituídos por fibras de vidro, embebidas numa matriz polimérica, em geral de poliéster ou viniléster, e integram-se no grupo dos materiais FRP (“Fibre Reinforced Polymer”).

Inicialmente, desenvolvidos na década de 1940 pelas indústrias aeroespacial e naval, os materiais FRP começaram a ter, a partir da década de 1980, um número crescente de aplicações no sector da construção, [Bakis (2002)].

Neste contexto surgem as juntas coladas que apresentam algumas vantagens face às uniões tradicionais, nomeadamente a capacidade de obter estruturas mais leves e rígidas, melhor distribuição de tensões, melhor resistência à corrosão, durabilidade em ambientes agressivos, elevadas relações de resistência/peso próprio e rigidez/peso próprio.

Os perfis de GFRP possuem assim um enorme potencial, como materiais de construção, apresentando a possibilidade de se reproduzir qualquer forma, [Karbhari (1999) e Keller (2002)].

Assim o presente trabalho pretende determinar o comportamento mecânico de ligações coladas em GFRP, quer em regime estático quer em regime de fadiga, tendo sido analisadas juntas coladas sobrepostas em corte simples e corte duplo.

2 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS JUNTAS COLADAS

Uma junta colada é constituída no mínimo por duas matérias distintas, nomeadamente o aderente e o adesivo, entre os quais se estabelece uma interface que deve assegurar uma forte ligação ao longo da vida útil da junta.

2.1- Perfis de GFRP

Os polímeros reforçados com fibras são constituídos por fibras embebidas numa matriz polimérica. Enquanto as fibras proporcionam resistência e rigidez, a matriz mantém as fibras unidas, protegendo-as de abrasão e corrosão e garantindo a transferência e distribuição das cargas pelas fibras. As fibras usualmente utilizadas são de vidro, de carbono ou de aramida. A fibra de vidro é a mais popular de todas as fibras usadas no reforço devido ao seu baixo custo.

2.2- Tipos de fibras de vidro

Actualmente, vários tipos de fibras de vidro são produzidas sob a forma de fio, casos dos tipos E, S e R. Os tipos S e R são produzidas a partir de vidros de alta resistência e são aplicados na indústria aeronáutica. A tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas dos tipos E e S, [Tarso

Tabela 1 – Propriedades mecânicas da fibra de vidro tipos E e S [Tarso Mendonça (2005)].

Propriedade	Vidro E	Vidro S
Densidade [kg/m ³]	2540	2490
Tensão de rotura [MPa] a 22°C	3450	2600
Tensão de rotura [MPa] a 540°C	1720	2400
Tensão de cedência [MPa]	830	1900
Módulo de Young [GPa] a 22°C	72,4	85,5
Diâmetro da fibra [µm]	3 - 20	8 - 13
Temperatura de fusão C	845	860
Coef. Delit. Térmica [10 ⁻⁶ /°C]	5	2,9
Deformação na rotura a 22°C [%]	4,8	5,4

Mendonça (2005)]. A fibra de vidro utilizada neste trabalho foi o roving 2400 Tex com filamentos de 16 µm de diâmetro.

2.3- Os adesivos

Segundo Adams e Wake (1991), os adesivos são materiais poliméricos que, quando aplicados às superfícies conseguem para além de as unir resistir à sua separação. A bibliografia especializada, [Trotignon (1982)] refere vários critérios a utilizar para a classificação dos adesivos, nomeadamente segundo a estrutura molecular, origem, processo de endurecimento e desempenho. A classificação segundo o desempenho, a mais utilizada, divide os adesivos em estruturais e não estruturais. Os estruturais devem ser entendidos como parte integrante da estrutura, destacando-se cinco tipos de adesivos estruturais: os fenólicos, os acrílicos, os poliuretanos, as poliamidas e os epóxicos.

2.4- Ensaio em juntas

As ligações com maior utilização entre perfis de GFRP têm sido as aparafusadas, baseando-se nas disposições construtivas da construção metálica.

As ligações coladas, que à partida seriam melhor adaptadas às características específicas dos perfis de GFRP, são menos utilizadas devido às dificuldades associadas ao dimensionamento, ao seu comportamento a longo prazo, quer em regime estático quer em regime dinâmico e em situação de incêndio.

No domínio de ligações aparafusadas salientam-se trabalhos publicados por Erki (1995) e Mottram e Turvey (1998). No comportamento de ligações coladas com perfis de GFRP, salientam-se os estudos de Keller e Vallée (2005).

2.4.1-Análise das juntas coladas

A análise efectuada neste trabalho recai apenas nas juntas coladas sobrepostas, que são as de maior aplicação no sector industrial de construção.

Considerando-se, em primeira aproximação, uma análise simplificada das tensões

na junta, que consiste em assumir que os aderentes são rígidos, devido ao seu módulo de elasticidade ser superior ao da cola e que as juntas se deformam só ao corte, a tensão de corte média apresenta um valor constante ao longo da junta que é dado por,

$$\tau = \frac{P}{bl} \quad (1)$$

onde τ representa a tensão de corte média, P a carga axial aplicada, l a largura da junta e b o comprimento de sobreposição.

No entanto, existem diversos modelos Analíticos e numéricos capazes de prever a distribuição de tensões na junta de uma forma mais precisa do que a apresentada anteriormente. Neste domínio destaca-se o trabalho desenvolvido por Volkersen, que desenvolveu uma análise teórica, para uma junta sobreposta simples, assumindo que os aderentes se deformam elasticamente sob tracção e que a cola se deforma por corte. Esta análise pressupõe uma distribuição não uniforme das tensões de corte ao longo da junta colada, ocorrendo o seu máximo valor nas extremidades da junta, [Volkersen (1938)].

3 - CRITÉRIOS DE RUÍNA

Uma previsão correcta da resistência de uma junta colada, ou mesmo da sua vida em serviço, é uma tarefa de extrema importância e um grande desafio, que surge logo na fase de projecto. Para tal contribuem, por exemplo, as dificuldades inerentes à obtenção de todas as propriedades mecânicas das colas, o conhecimento rigoroso da geometria da extremidade da cola e a consequente alteração das concentrações de tensões, o desconhecimento dos mecanismos de ruína que irão actuar e, consequentemente, a metodologia mais adequada para a sua modelação.

O colapso das juntas coladas pode por seu turno ocorrer a partir de diversos modos de falha e em diversos locais, para o que contribuem a geometria da junta, o processo de manufactura, os materiais dos aderentes e a cola utilizada. Basicamente, podem agrupar-se quatro tipos de ruína, [Moura Branco *et al.* (2005)]:

- i) Ruína nos aderentes por tracção, compressão, flexão;
- ii) Ruína na interface aderente/cola;
- iii) Falha coesiva;
- iv) Arrancamentos ocorridos no aderente devido a delaminações.

A ruína na interface aderente/cola resulta essencialmente do incumprimento de algumas especificações durante o processo de manufactura. A figura 1 ilustra dois modos típicos de rotura, sendo a rotura por delaminação típica das juntas coladas em compósitos laminados.

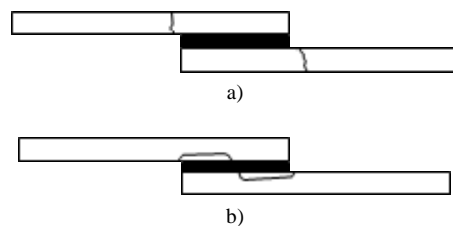


Fig 1 - Modos de ruína em juntas coladas de sobreposição simples: a) Rotura do aderente; b) Rotura por delaminação no aderente, [Moura Branco *et al.* (2005)]

A literatura apresenta alguns critérios de ruína, os quais têm sido usados com algum sucesso na previsão da resistência de juntas coladas e são vulgarmente designados por critérios baseados na resistência dos materiais e critérios baseados na mecânica da fractura. Os primeiros, ao desprezar qualquer tipo de defeito inicial, determinam essencialmente as tensões num dado ponto e com recurso ao critério de ruína, permitem prever a ocorrência ou não de rotura na sua vizinhança. Os critérios baseados na mecânica da fractura admitem por seu turno a existência de um defeito inicial, prevendo-se a sua propagação a partir dos conceitos do factor intensidade de tensão ou da taxa de libertação de energia. Em seguida, faz-se uma abordagem resumida dos principais critérios baseados na resistência, que comparam basicamente as tensões e/ou deformações com os correspondentes valores admissíveis do material e são usados na previsão da resistência estática das juntas coladas. Neste contexto, são analisados alguns critérios de ruína mais típicos da resistência dos materiais e

em particular os mais vocacionados para tratar o dano, quer ao nível da cola, quer ao nível dos aderentes.

3.1 - Critérios de ruína na cola

De uma forma geral, os critérios de ruína aplicados aos materiais isotrópicos também são utilizados na previsão de danos ocorridos ao nível da cola, ainda que tenham surgido critérios especificamente desenvolvidos para estes materiais e suas aplicações. Tong e Steven (1999), classificam-nos em critérios de ruína pontuais e de zona, sendo as condições de falha nos primeiros satisfeitas individualmente ponto a ponto, ao passo que nos últimos a ruína ocorre quando a zona danificada atinge uma dimensão crítica. Apresentam-se de seguida alguns dos critérios mais usados:

3.1.1 Critério da deformação ou tensão principal máxima.

Segundo este critério de ruína, a falha ocorre quando a tensão principal máxima ou a deformação principal máxima atinge o seu valor limite. A sua aplicação ao estudo das juntas coladas é referenciada por vários autores.

3.1.2 Critério da densidade de energia de deformação.

Segundo este critério, a ruína na cola ocorre quando a densidade de energia de deformação em qualquer local da cola excede o seu valor limite, o qual pode ser obtido como a área abaixo da curva tensão/deformação à tracção ou ao corte.

3.1.3 Critério de zona.

Este critério define uma zona de dano em que a ruína ocorre quando a componente da tensão ou da deformação excede o seu valor limite para além de uma dada área finita. O critério de ruína usado para a falha coesiva da camada da cola é o critério da deformação equivalente de Von-Mises, quando é esperada uma falha por cedência plástica. Outros critérios são, todavia, passíveis de serem aplicados, como é o caso do critério de Tsai-Wu para colas frágeis.

3.2 - Critérios de ruína no aderente

Nas aplicações estruturais correntes, os aderentes são essencialmente materiais dúcteis que exibem, de uma forma geral, um comportamento elasto-plástico. Os critérios de cedência nestes casos definem basicamente as condições que caracterizam a mudança de um estado elástico para um estado plástico do material. Ao nível dos materiais isotrópicos e homogéneos (caso dos metais), os critérios de cedência plástica já se encontram devidamente estudados e divulgados na literatura da especialidade. Os mais usados são: o critério de cedência de Tresca, o critério de cedência de Von Mises, o critério de cedência de Mohr-Coulomb e o critério de cedência de Drucker-Prager. Os materiais compósitos são caracterizados pela sua anisotropia, sendo, neste caso, necessário usar critérios de ruína específicos que resultam muitas vezes de pequenas alterações feitas sobre os critérios utilizados para os materiais isotrópicos. Burk (1983) efectuou uma revisão dos critérios de ruína, tendo averiguado que os quatro critérios mais utilizados nos materiais compósitos são os de: Tsai-Wu, Tsai-Hill, máxima tensão e máxima deformação. O critério de Tsai-Hill, [Nahas, (1986)], resulta da extensão do critério de Von Mises para materiais ortotrópicos, válido para o estado plano de tensões.

4 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental consistiu na execução de ensaios de provetes, quer em solicitação estática quer em solicitação dinâmica, para avaliação das resistências estática e à fadiga, salientando-se que, no âmbito deste trabalho, os perfis GFRP utilizados eram constituídos por fibras de vidro embebidas numa matriz polimérica.

O pré-tratamento das superfícies de contacto consistiu numa operação de limpeza. As melhores propriedades de aderência evidenciaram-se quando as superfícies a colar, foram tratadas previamente com operações de lixamento ou escarificação ou por processos químicos de forma a permitir maior atrito e uma maior penetração do adesivo. Neste trabalho os provetes foram

lixados com lixa de granulometria 120, na zona de sobreposição.

A operação de colagem foi feita com Araldite AW 106 e um Endurecedor HV953U na razão de 50%-50% (em volume). A espessura do adesivo apresentou um valor médio de 0,20 mm e a operação de cura foi efectuada numa estufa durante 72 horas a 40°C.

4.1 - Características do adesivo epóxico

O adesivo constou de dois componentes, livre de solventes, à base de uma resina epóxi, endurecível entre 20°C a 180°C. Este adesivo constitui um sistema universal para colagens flexíveis e transparentes de uso corrente. Na tabela 2 apresentam-se as propriedades do adesivo epóxico.

Tabela 2 - Propriedades da Araldite AW 106 e do Endurecedor HV953U, [Tarso Mendoza (2005)].

Propriedades do Adesivo Epóxico	Araldite AW 106	Endurecedor HV953U
Aspecto	Viscoso bege	Viscoso
Viscosidade a 25°C [Pa.s]	30-50	25-40
Peso específico [gr/cm ³]	1,15-1,25	-----
Ponto de inflamação [°C]	200	50-55
Mod. elast. longitudinal [GPa]	2,70 – 3,38	
*Mod. elast. transversal [GPa]	a 0°C - 1.2 e a 50°C - 0.2	
Tensão de rot. à tracção [MPa]	29-130	
Tensão de corte [MPa]	25-30	

*(DIN 53445) Cura: 16 horas/40°C ;

Proporção de volumes 1:1;

<http://www.wellmid.com>

4.1- Geometria dos provetes

A geometria e dimensões dos provetes, utilizados nos ensaios de caracterização mecânica das barras pultrudidas, estão representadas nas figuras 2, 3 e 4.

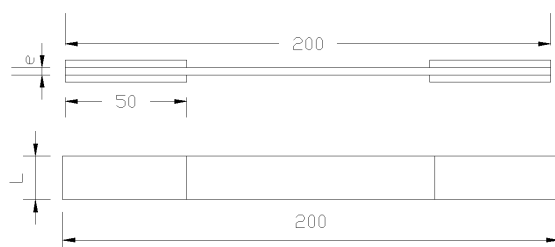


Fig 2 - Provetes usados nos ensaios de tracção das barras pultrudidas

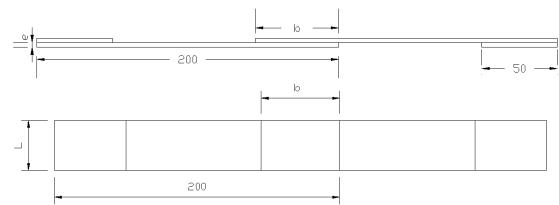


Fig 3 - Juntas sobrepostas com corte simples

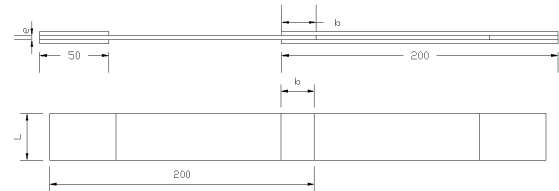


Fig 4 - Juntas sobrepostas com corte duplo.

5- DESCRIÇÃO DAS SÉRIES E RESULTADOS

5.1- Ensaios Estáticos

As tabelas 3, 4 e 5 apresentam as propriedades de resistência estática máxima obtida nos ensaios de barras de pultrusão e juntas coladas. Na tabela 3 apresentam-se os valores obtidos nos ensaios de tracção das barras pultrudidas. As tabelas 4 e 5 apresentam os resultados dos ensaios de tracção das juntas sobrepostas com corte simples e os resultados dos ensaios de tracção das juntas sobrepostas com corte duplo de acordo com as geometrias indicadas nas figuras 3 e 4.

Na figura 5 apresenta-se o gráfico tensão-deformação relativo ao material pultrudido obtidos nos ensaios de tracção.

Para as juntas coladas, quer a resistência estática, quer a resistência à fadiga, foi determinada na forma de uma tensão de corte média, na interface aderente/adesivo.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de tracção das barras pultrudidas

Nº do Provede	L × e [mm ²]	σ_{max} [MPa]	M. Young E [GPa]
P1	15,12x3,05	496	37,38
P2	18,00x3,05	453	35,39
P3	15,50x3,07	519	41,84
P4	15,02x3,04	442	39,60
P5	17,25x3,05	524	38,20
Média	-----	487	38,48

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de tracção das juntas sobrepostas com corte simples

Nº do Provete	F _{max} (kN)	L (mm)	b (mm)	τ _{max} [MPa]
P2-1	16,897	34,700	52,520	9,272
P2-2	12,320	34,650	53,160	6,688
P2-3	16,505	34,700	54,680	8,699
Média	15,241	34,683	53,453	8,220

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de tracção das juntas sobrepostas com corte duplo

Nº do Provete	F _{max} (kN)	L (mm)	b (mm)	τ _{max} [MPa]
P4-1	13,714	34,500	24,680	8,053
P4-2	14,052	34,590	25,650	7,919
P4-3	27,374	34,770	26,750	14,716
P4-4	24,056	34,420	24,300	10,229
Média	19,799	34,570	25,345	10,229

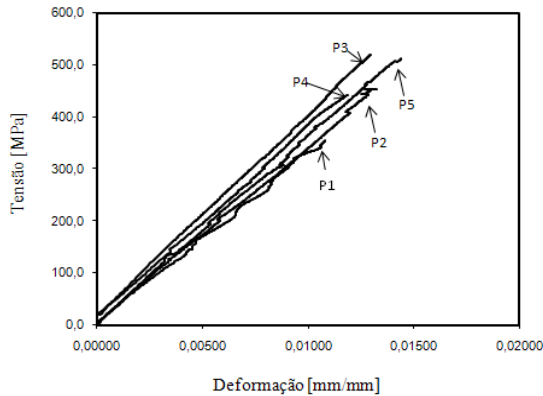


Fig 5 - Ensaios de tracção das barras de pultrusão

5 2- Ensaios dinâmicos

Existem diversos factores que influenciam o comportamento à fadiga dos materiais compósitos. Um dos aspectos mais importantes tem a ver com o tipo de material. A resistência à fadiga aumenta com o módulo das fibras que, no caso dos compósitos unidireccionais, desempenham um papel preponderante no comportamento à fadiga.

Os modelos de previsão da vida à fadiga baseiam-se frequentemente na adaptação dos critérios de rotura estáticos às situações de fadiga. Estes recorrem à informação fornecida pelas curvas S-N, o que requer um extenso trabalho experimental. Esta abordagem não contabiliza os mecanismos de dano, mas possibilita a obtenção de uma estimativa do número de ciclos até à rotura para uma dada sollicitação.

Os ensaios dinâmicos para obtenção das curvas S-N foram realizados numa máquina servo-hidráulica com a capacidade de 100 KN, em controlo de força, tendo sido utilizada uma onda sinusoidal com frequência de 20 Hz. A razão de tensões utilizada foi R=0,1. As tabelas 6 e 7 apresentam o número de ciclos, bem como a tensão utilizada.

Tabela 6 - Valores dos ensaios de fadiga para juntas sobrepostas com corte simples

Provetes	N _f	τ (MPa)
P2-F1	5948	5,75
P2-F2	973	5,75
P2-F3	434	5,75
P2-F12	1236	5,75
P2-F4	3117,5	4,11
P2-F6	10905	4,11
P2-F7	34820	4,11
P2-F11	46853	4,11
P2-F5	51253	2,47
P2-F8	780371	2,47
P2-F9	330444	2,47
P2-F10	728091	2,47

Tabela 7 - Valores dos ensaios de fadiga para juntas sobrepostas com corte duplo

Provetes	N _f	τ (MPa)
P4-F9	5517	7,16
P4-F8	24895	7,16
P4-F7	1362	7,16
P4-F6	185663	5,11
P4-F5	202714	5,11
P4-F2	186449	5,11
P4-F1	1000000	3,07
P4-F3	965957	3,07
P4-F4	1342764	3,07

As figuras 6 e 7 representam as curvas S-N obtidas assim com as bandas de confiança a 95%. A gama de tensão usada corresponde à tensão remotamente aplicada.

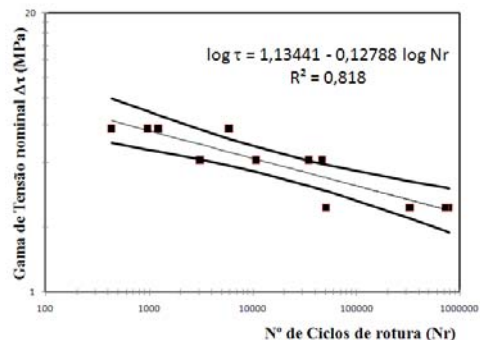


Fig 6 - Juntas sobrepostas com corte simples: curva S-N e bandas de confiança a 95%

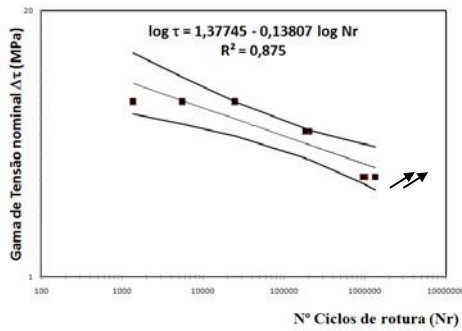


Fig 7 - Juntas sobrepostas com corte duplo: curva S-N e bandas de confiança a 95%

6- CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu concluir, que nas séries testadas a ruína ocorreu no aderente devido a delaminações, que é um modo típico de ruína das juntas coladas em compósitos laminados e em solicitação uniaxial. Verificou-se ainda que o comportamento estático e à fadiga apresentou melhores resultados na série das juntas sobrepostas com corte duplo, o que era de prever. Em ambas as séries verificaram-se maiores dispersões para as gamas de tensão elevadas. Foi também possível observar-se que o dano iniciou-se pela rotura individual de algumas fibras, devido à variabilidade estatística da resistência ao longo do seu comprimento, originando assim concentrações de tensões e assim acelerando o processo de rotura. Nos ensaios de fadiga verificou-se ainda que os coeficientes de correlação foram elevados dada a variabilidade de condições que afectam estes materiais destacando-se a densidade das fibras e posicionamento.

REFERÊNCIAS

- Bakis, C.E., Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E., Davalos, J.F., Lesko, J.J., Rizkalla, S.H., Triantafyllou, T.C., “Fiber Reinforced Polymer Composites for Construction – State-of-the-Art Review”, *Journal of Composites for Construction*, Vol.6, Nº 2, 73-87, (2002).
- Karbhari, V., Seible, F., “Fiber Reinforced Polymer Composites for Civil Infrastructure in the USA”, *Structural Engineering International*, Vol. 9, Nº 4, 274-277, (1999).
- Tarso, P. R. Mendonça, “Materiais Compostos e Estruturas-Sanduíche. Editora Manole Lda. Baueri – S. Paulo – Brasil, (2005).
- Erki, M.A., “Bolted glass-fibre-reinforced plastic joints”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 22, 736-744, 1995.
- Keller, T., “Fiber Reinforced Polymer Materials in Bridge Construction”, *Towards a Better Built Environment – Innovation, Sustainability, Information Technology*, IABSE Symposium, Melbourne, Australia, (2002).
- Keller, T., Vallée, T., “Adhesively bonded lap joints from pultruded GFRP profiles. Part I: stress-strain analysis and failure modes”, *Composites PartB: Engineering*, Vol. 34, No. 4: 331-340, 2005.
- Mottram, J.T., Turvey, G.J. (editors), “State-of-the-art review on design, testing, analysis and applications of polymeric composite connections”, Brussels, European Commission, 99 p., 1998.
- Adams, R. D. e Wake, W. C., *Structural Adhesive Joints*, Elsevier Science Publishers Ltd., London, UK, 1991.
- Troignon, J. P.; Verdu, J. e Piperaud, M., *Précis de Matières Plastiques*, AFNOR, 1982.
- Moura Branco, C., Martins Ferreira, J., Domingos da Costa, J., Silva Ribeiro, A., “Projecto de Órgãos de Máquinas”. Editora Calouste Gulbenkian.(2005).
- Volkersen, O., “Die Nietkraftverteilung in Zubeanspruchten Nietverbindungen mit Konstanten Loschongquerschnitten”, *Lufthahrtforschung*, Vol. 15, (1938).
- Tong, L. e Steven, G. P., “Analysis and design of Structural Bonded Joints”, Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, (1999).
- Burk, R. C., “Standard Failure Criteria Needed for Advanced Composites”, *Astronautics and Aeronautics*, Vol. 21, p. 58-62, (1983).
- Nahas, M.N., “Survey Failure and Post-Failure Theories of Laminated Fiber-Reinforced Composites”, *Journal of Composites Technology and Research*, Vol. 8, Nº 4, p. 138-153, (1986).