

AVALIAÇÃO DE PAINÉIS LAMINADOS METAL-COMPÓSITO ENRIJECIDOS POR PINOS DEPOSITADOS POR SOLDAGEM

Iaroslav Skhabovskiy, Universidade Federal de Uberlândia, i.skhabovskiy@ufu.br

Ruham Pablo Reis, Universidade Federal de Uberlândia, ruhamreis@ufu.br

Edson Cocchieri Botelho, Universidade Estadual Paulista, edson.cocchieri.botelho@gmail.com

Américo Scotti, Universidade Federal de Uberlândia, ascotti@ufu.br

Resumo: Os painéis laminados metal-fibra consistem de um laminado de chapas finas de metal coladas com as camadas de material compósito de matriz polimérica reforçados por fibra de carbono/vidro/aramina. Recentemente, foi proposta uma técnica denominada "junta híbrida avançada" para ser aplicada nas uniões metal-compósito, que combina união adesiva com deposição de conjunto de pequenos ancoradores ou pinos na parte metálica da junta. Assim, a mesma é reforçada e aumenta sua resistência mecânica. Neste trabalho, foi utilizada uma técnica comercial para deposição dos pinos nas chapas metálicas finas dos painéis laminados metal-compósito. Esta técnica baseia-se num processo de soldagem CMT (Cold-Metal Transfer) e é denominada como CMT-PIN, com a qual é possível depositar uma série sequencial de pinos de baixo diâmetro e altura de uma forma rápida e econômica. O objetivo deste trabalho foi fabricar e verificar a influência dos ancoradores (pinos) aplicados nos painéis laminados metal-compósito comparando com os painéis laminados metal-compósito convencionais (sem pinos), com base econômica e características mecânicas. Para isso, foram fabricados painéis com e sem pinos e testados através de ensaio de dobramento. Este trabalho mostrou possibilidade de realização da ideia de aplicação dos pinos na parte metálica de um painel e os resultados do ensaio de dobramento não mostraram uma grande diferença na resistência ao dobramento do painel laminado metal-compósito com pinos.

Palavras-chave: deposição de pinos por soldagem, CMT-PIN, painéis laminados metal-compósito

1. INTRODUÇÃO

A partir da década de 60, os materiais compósitos de alto desempenho foram introduzidos de maneira definitiva na indústria aeroespacial visando, principalmente, a redução de peso sem perda de resistência mecânica. Em aeronaves civis modernas, por exemplo, sabe-se que a proporção de compósitos pode superar a 50 % do total de materiais aeroembarcados, como demanda por redução de peso (aumento da carga tarifada para uma dada potência motora ou redução do consumo de combustível, etc.). A redução de peso de uma estrutura pode ser alcançada pela seleção de materiais de maior resistência específica (compósitos, por exemplo), com a consequente redução de sua espessura, e por uma manutenção da rigidez, à custa de enrijecedores ou formatos favoráveis. Como mostra a Fig. (1), os materiais compósitos estão presentes em maior número nas construções de estruturas de aeronaves de última geração através de laminados de metal-fibra.

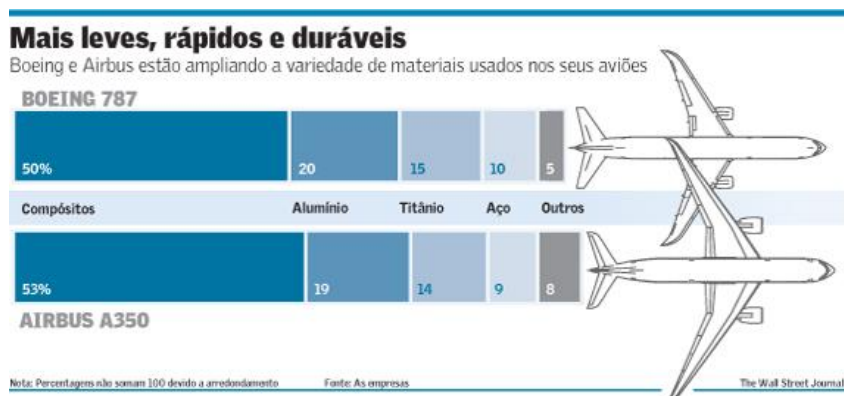


Figura 1: Percentual dos materiais utilizados em aeronaves de última geração (Michaels, 2013).

De acordo com Sinmazçelik et al. (2011) laminados de metal-fibra ou laminados metal-compósito são materiais compósitos construídos a partir de mistura de camadas finas de metais e de adesivo com fibras reforçadas. Comercialmente mais disponíveis no mercado materiais laminados de metal-fibra (*fiber metal laminate*) são ARALL (*Aramid Reinforced Aluminium Laminate*), baseado em fibras de aramida, GLARE (*Glass Reinforced Aluminium Laminate*), baseado em fibra de vidro de alta resistência e CARALL (*Carbon Reinforced Aluminium Laminate*),

baseado em fibras de carbono. Os laminados de metal-fibra é uma estrutura híbrida porque consiste basicamente de dois ou mais materiais diferentes – metal (normalmente alumínio) e camadas de compósito (fibra de carbono, de vidro ou de aramina). Os mesmos oferecem várias vantagens tais como uma melhor resistência à fadiga porque é mais resistente ao crescimento e propagação de trincas. Também como vantagem cita-se boa resistência ao impacto especialmente de aplicações da indústria aeronáutica. Mas existem desvantagens tais como, elevado custo de materiais de construção, ferramental, tempo de fabricação (aplicação camada por camada, cura na autoclave etc.) etc.

Já a técnica de união denominada “junta híbrida avançada”, que surgiu nos últimos anos, ainda não foi estudada profundamente. Uma junta híbrida avançada se diferencia das outras técnicas de união metal-compósito (parafusada, rebitada e colada) pela utilização de pequenos ancoradores/pinos, conforme demonstrado na Fig. (2). Estes pinos são depositados antes da aplicação do material compósito na parte metálica, para fornecer interligação mecânica sem danificar muito o material compósito. Outra diferença desta técnica é que a cura do compósito acontece depois de aplicação do mesmo na parte metálica com ancoradores/pinos e não antes, como nas outras técnicas. De acordo com Graham et al. (2014), a junta híbrida avançada já mostrou seu potencial de unir dois materiais de difícil junção, como polímero (matriz) reforçado com fibras (vidro/carbono/aramida) e metal isotrópico, que têm diferentes propriedades e métodos de fabricação.

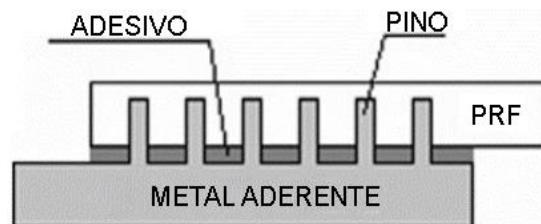


Figura 2: Junção híbrida avançada, onde: PRF – Polímero Reforçado com Fibra (adaptado de Graham et al., 2014).

Assim, o objetivo deste trabalho foi verificar a ideia inovadora da possibilidade de aplicação dos ancoradores (pinos) na parte metálica de um painel laminado metal-compósito e saber a influência dos mesmos na resistência mecânica utilizando o ensaio de dobramento.

2. METODOLOGIA, RESULTADOS E CONCLUSÕES

A Figura (3) ilustra a sequência geral de fabricação dos Painéis Laminados Metal-Compósito (PLMCs) com os ancoradores (pinos) na parte metálica. A mesma sequência também foi utilizada para os demais painéis laminados fabricados neste trabalho. A primeira fase da preparação das partes metálicas incluiu compra, corte nas dimensões especificadas (200×80 mm) e a limpeza. Na segunda fase depositou-se os pinos pela técnica CMT-PIN de forma automatizada e em seguida limpou-se a superfície da chapa com pinos. Durante a terceira fase montou-se a camada do compósito de lâminas de pré-impregnado uma a uma até atingir a espessura especificada. Em seguida aplicou-se a segunda chapa metálica (superior) alinhada com a inferior. Na quarta fase o PLMC montado foi protegido (embrulhado) por um filme desmoldante e prensado pela prensa de cura a quente. A prensa aplicou uma pressão em ambas as chapas metálicas permitindo a entrada dos pinos dentro da camada de compósito, furando as lâminas de pré-impregnado, e em seguida realizou-se o ciclo de cura com duração de aproximadamente 100 min com temperatura de 160°C e força aplicada de 1,7 t. Na quinta fase, o PLMC após a cura da camada do compósito é retirado da prensa de cura a quente. Removeu-se o filme desmoldante da superfície do PLMC juntamente com excesso de resina do compósito que surge nas bordas após o processo de cura. Foram utilizadas chapas metálicas finas de AISI 430 de 0,4 mm de espessura cortados do tamanho do painel (corpo de prova) aproximadamente 200×80 mm. E para montagem da camada do compósito utilizou-se as lâminas do pré-impregnado 7781-38” – F155 do fabricante HEXCEL Corporation. Os pinos nas superfícies metálicas foram depositados utilizando o arame-eletrodo AWS ER 309 L com diâmetro de 1 mm e gás de proteção $\text{Ar} + 3,6\% \text{CO}_2$. A técnica CMT-PIN foi parametrizada para depositar os pinos do tipo cabeça abaulada (*ball-head*) com altura de $2,50 \pm 0,06$ mm e diâmetro de cabeça do pino de $1,45 \pm 0,03$ mm. As dimensões de todos os painéis produzidos foram aproximadamente $200 \times 80 \times 4$ mm.

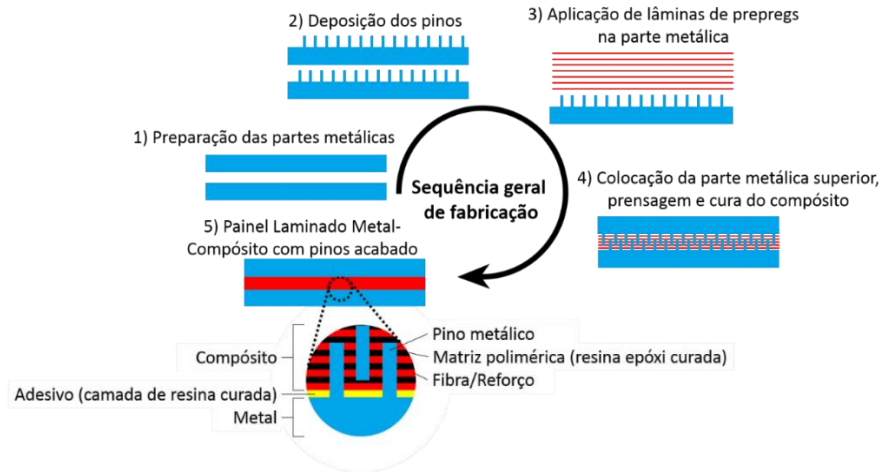


Figura 3: As principais fases da sequência de fabricação dos Painéis Laminados Metal-Compósito (PLMCs) com pinos na parte metálica

Com objetivo de verificar a influência dos pinos (ancoradores) na resistência mecânica foram fabricados 5 tipos de mini Painéis Laminados (corpos de prova) com duas repetições de cada um divididos em dois grupos:

Grupo 1. Painéis de Compósito puro (sem material metálico), denominados como Painéis Laminados de Compósito (PLCs), ilustrados na Fig. (4).

Grupo 2. Painéis de Compósito com chapas metálicas com/sem pinos denominados como Painéis Laminados Metal-Compósito (PLMCs). Dentro deste grupo fabricou-se:

- PLMCs sem pinos (convencionais) com duas chapas metálicas externas, ilustrado na Fig. (5a);
- PLMCs sem pinos (convencionais) com três chapas metálicas, sendo duas externas e uma interna, ilustrado na Figura 5 (b);
- PLMCs com pinos depositados nas superfícies das chapas metálicas, conforme ilustrado na Fig. (6). Observa-se, que nesta condição os pinos permanecem posicionados dentro da camada do compósito, consequentemente têm contato com material compósito. Em termos de configuração dos pinos, foram testados PLMCs com diferentes espaçamentos de 10 e de 20 mm entre os mesmos (Fig. (6a) e (6b), respectivamente). E um padrão de deposição dos pinos ilustrado na Fig. (7), denominado como hexagonal.



Figura 4: Ilustração da seção transversal dos Painel Laminado de Compósito (PLC).

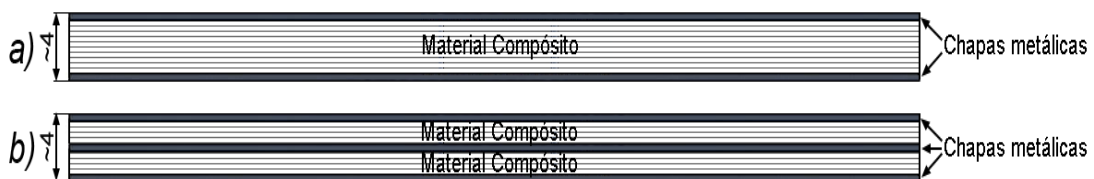


Figura 5: Ilustração da seção transversal dos PLMCs sem pinos depositados, onde: (a) PL do tipo “metal-compósito-metal” e (b) PL do tipo “metal-compósito-metal-compósito-metal”.

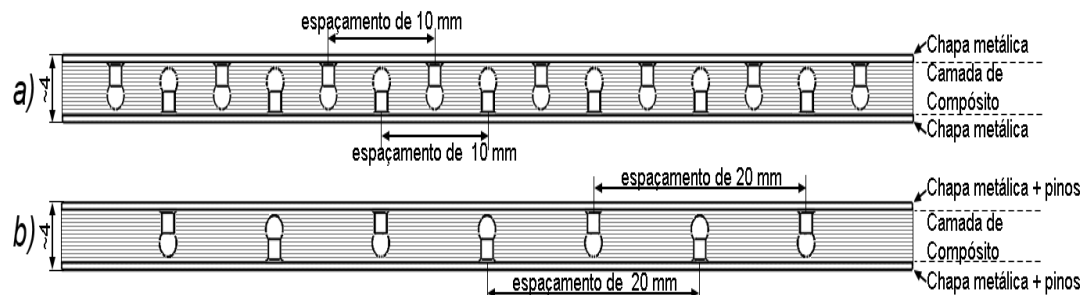


Figura 6: Ilustração da seção transversal dos PLMCs com pinos, onde: (a) com espaçamento de 10 mm e (b) com espaçamento de 20 mm entre os pinos numa chapa metálica.

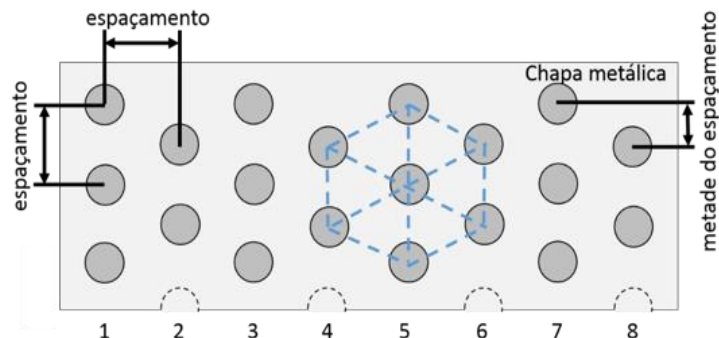


Figura 7: Padrão de deposição dos pinos do tipo hexagonal numa chapa metálica.

Após fabricação dos Painéis Laminados escolheu-se um ensaio de dobramento por ser simples e bastante utilizado para este tipo de materiais. A Figura (8) mostra as características do ensaio de três pontos de Painéis Laminados (PLs) que foi realizado, seguindo a norma ISO 7438:1985 “*Metallic Materials – Bend Test*”. Os ensaios foram realizados utilizando uma máquina universal de ensaio (*Shimadzu modelo Autograph AG-X 300 kN*). Por ser um ensaio semi-estático, a velocidade de deslocamento do cutelo foi programada para 1 mm/s e a taxa de aquisição de dados foi programada para 10 Hz durante todos os ensaios.

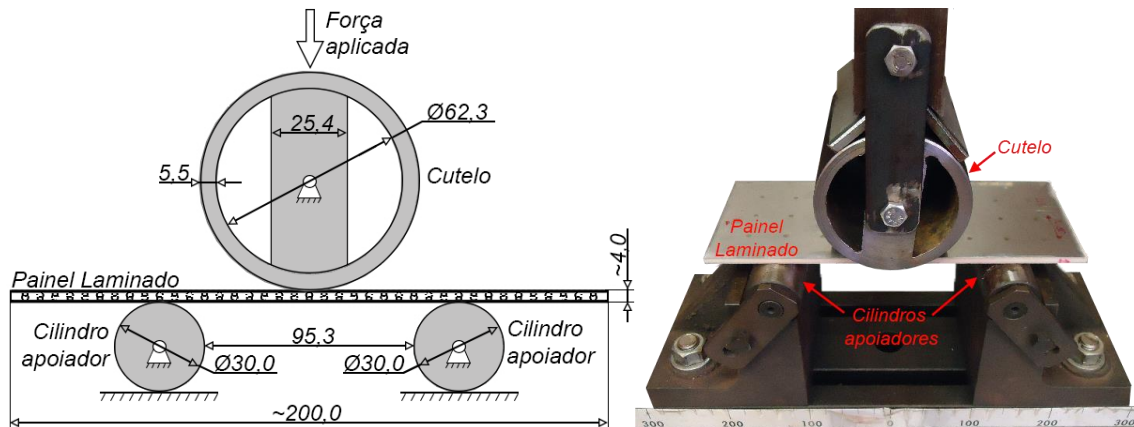


Figura 8: Características do ensaio de três pontos realizado nos Painéis Laminados pela norma ISO 7438:1985 “*Metallic Materials – Bend Test*”.

A Figura (9) apresenta resultados através dos gráficos da força de resistência ao deslocamento do cutelo durante o ensaio de dobramento de cinco tipos de Painéis Laminados (PLs), com uma repetição de cada painel. Os painéis denominados “compósito” (sem material metálico) apresentaram comportamento mais catastrófico (região de carregamento quase linear e com falha súbita). Este tipo de painel suportou menor deslocamento do cutelo que os demais, apesar de não ter sido o que requereu menor carga para romper. O melhor comportamento foi observado para o PLMC com 2 chapas metálicas sem pinos. Foi o painel que requereu a maior força máxima (F_{max}) para romper e permitiu um dos mais longos deslocamentos do cutelo antes de romper. O valor de deslocamento do cutelo e inclinação das curvas até rompimento do PLMC com 3 chapas são parecidos com o PLMC com 2 chapas metálicas sem pinos, mas o último apresentou uma F_{max} bem maior. O PLMC com 3 chapas sem pinos descolou-se mais do que o do compósito em comparação com os demais PLs ensaiados.

Ambos os PLMCs com pinos requereram a menor F_{max} para romper, apesar de apresentarem um dos maiores valores de deslocamento antes de acontecer a falha. Ainda se percebe um comportamento menos catastrófico após o rompimento dos PLMCs com pinos, ou seja, a inclinação da curva é mais suave em comparação com os demais. Já no caso dos PLMCs sem pinos o material metálico após o rompimento se descola mais em comparação com PLMCs com pinos.

Por estes resultados conclui-se que é possível realizar a ideia de aplicação dos pinos nos PLMCs para que os pinos fiquem dentro da camada de compósito (Fig. (10)). Por outro lado, o uso de pinos e/ou uma outra chapa imposta no compósito entre as duas placas não apresenta benefícios de resistência mecânica dos painéis, tomando-se como base a condição compósito-duas placas externas. Mas será que o ensaio de dobramento com 3 pontos representa melhor os esforços sofridos por um painel? Assim, uma possibilidade é fazer outro tipo de ensaio mecânico nos trabalhos futuros para mostrar o potencial de aplicação dos ancoradores (pinos) na parte metálica, já que uma característica interessante foi o não desprendimento das chapas externas quando se usou pinos-ancoradores. Este tipo de ensaio poderia ser de estampabilidade do tipo *Erichsen*. Porque o mesmo aplica a força de ensaio numa área maior e em todas as direções,

além de, provavelmente, representar um esforço sofrido por um painel. Ou outra possibilidade seria utilizar um ensaio de impacto do tipo *Drop-Weight Test*.

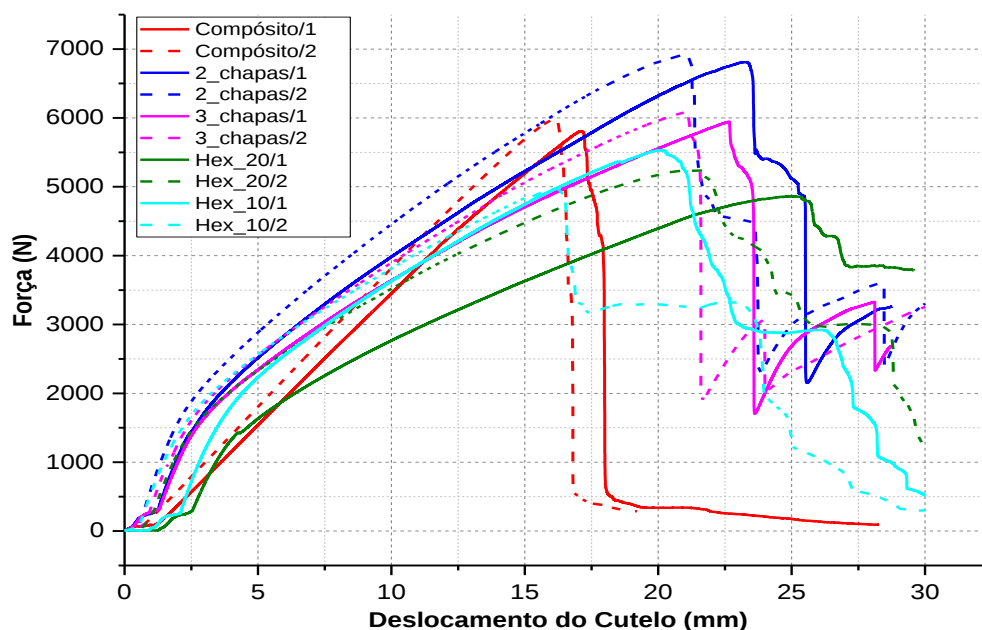


Figura 9: Força de resistência ao deslocamento do cutelo durante ensaio de dobramento com cinco tipos de Painéis Laminados (PLs), duas amostras de cada painel, onde: “Compósito” – Painel Laminado de Compósito (PLC); “2_chapas” – Painel Laminado Metal-Compósito (PLMC) com duas chapas metálicas sem pinos; “3_chapas” – PLMC com três chapas metálicas sem pinos; “Hex_20” – PLMC com padrão de deposição do tipo hexagonal com espaçamento de 20 mm entre os pinos; “Hex_10” – PLMC com padrão de deposição do tipo hexagonal com espaçamento de 10 mm entre os pinos.

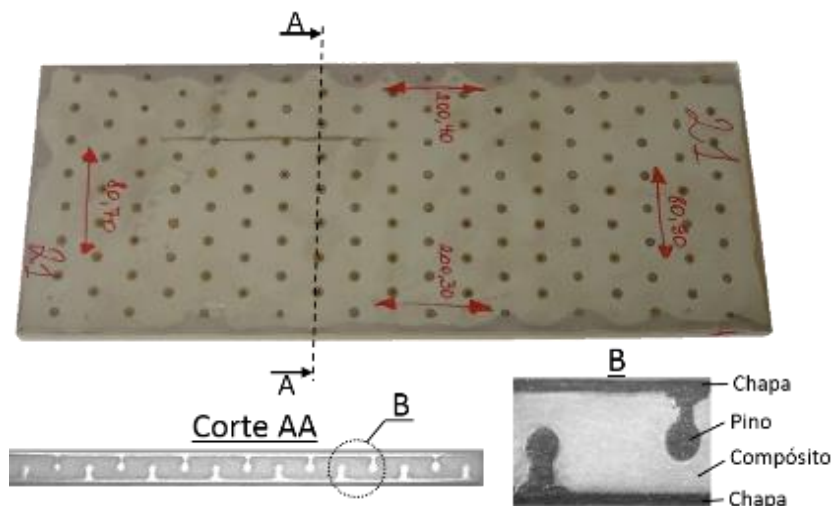


Figura 10: Vista superior do Painel Laminado Metal-Compósito com padrão de deposição do tipo Hexagonal com espaçamento entre os pinos de 10 mm com seção transversal

3. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o grupo Laprosolda da FEMEC-UFU e Laboratório de Análises Químicas e Térmicas do Departamento de Materiais e Tecnologia da UNESP (UNESP-Guaratinguetá) pela oportunidade de realização deste trabalho, assim como à CAPES, CNPq e FAPEMIG, pelas bolsas de pós-graduação e pesquisa dos autores.

4. REFERÊNCIAS

Graham, P.D., Rezai, A., Baker, D., Smith, A.P., Watts, F.J. “The development and scalability of a high strength, damage tolerant, hybrid joining scheme for composite–metal structures”. *Composites: Part A*. Vol.64, 2014, pp. 11-24. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.04.018.

ISO 7438:1985 “Metallic Materials – Bend Test”.

Michaels, D. “Novos materiais revolucionam aviões”. *The wall street journal*, Junho de 2013.

Sinmazçelik, T., Avcu, E., Bora, M. Ö., Çoban, O. “A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods”. *Materials and Design*. Vol.32, 2011, pp. 3671-3685. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.03.011.

5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.