

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta
será disponibilizado somente a partir
de 28/02/2020.

EDUARDO PIRES BONHIN

**Estudo do processo de furação do laminado metal fibra de alumínio 2024-T3 e epóxi
reforçado com fibra de vidro**

Guaratinguetá, SP

2019

Eduardo Pires Bonhin

**Estudo do processo de furação do laminado metal fibra de alumínio 2024-T3 e epóxi
reforçado com fibra de vidro**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
Co-orientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho

Guaratinguetá, SP

2019

B714e	Bonhin, Eduardo Pires Estudo do processo de furação do laminado metal fibra de alumínio 2024-T3 e epóxi reforçado com fibra de vidro / Eduardo Pires Bonhin–Guaratinguetá, 2019. 130 f : il. Bibliografia: f. 121-130 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019. Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro Coorientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho 1. Usinagem 2. Materiais laminados 3. Materiais compostos I. Título. CDU 621.9(043)
-------	---

EDUARDO PIRES BONHIN

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof.ª Dr. Ivonete Ávila
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES
UNESP-FEG



Prof. Dr. JOÃO ROBERTO FERREIRA
IEGP/UNIFEL

Fevereiro de 2019

DADOS CURRICULARES

EDUARDO PIRES BONHIN

NASCIMENTO	01.08.1991 – CAMPINAS/ SP
FILIAÇÃO	Jane Raquel Pires Bonhin João Fernando Bonhin Junior
2011/2016	Curso de Graduação Engenharia de Materiais, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
2017/2019	Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro por aceitar ser meu orientar num momento tão indeciso de minha graduação e continuar no mestrado, por sempre estar disposto a ajudar e também por me aconselhar em mais uma etapa.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho por aceitar participar da realização desse trabalho, bem como por auxiliar e ajudar em diversos aspectos do mesmo.

Aos técnicos e demais professores que auxiliaram na realização dos ensaios e disponibilizaram seu tempo para ajudar a concretizar desse trabalho.

As empresas Seco Tools e OSG Sulamericana pela parceria e disponibilidade para fornecimento das ferramentas de corte.

A Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp), Campus de Guaratinguetá por disponibilizar toda a infraestrutura necessária para realização desta dissertação.

E a amiga e noiva Sarah David Müzel que me ajudou na realização dos ensaios, na escrita e formatação da dissertação, me orientando sempre de maneira positiva e incentivadora.

Agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para esta dissertação.
Obrigado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

“As circunstâncias do nascimento de alguém são irrelevantes; é o que você faz com o dom da vida que determina quem você é.”

Takeshi Shudō

RESUMO

A utilização de materiais compósitos em componentes do setor aeronáutico vem crescendo muito nos últimos anos. Isso se deve ao fato destes materiais apresentarem boas propriedades mecânicas, aliadas a sua baixa massa específica. Dentre estes, os laminados metal fibra, são uma classe de materiais que vem ganhando destaque. Contudo seu emprego na maioria dos casos, requer a confecção de furos, algo que é muito complexo e pode causar danos ao material. Portanto, o objetivo desta pesquisa foi estudar o processo de furação em cheio de um laminado de metal fibra de alumínio 2024-T3/epóxi/fibra de vidro apoiado no alumínio 7075, aplicando diferentes parâmetros de usinagem para avaliar a influência na qualidade dos furos e o desgaste das ferramentas, correlacionando com a potência consumida, vibração, força de avanço, variações dimensionais nos furos e alteração das propriedades mecânicas do material. Para tal, o material foi processado via moldagem por compressão a quente e caracterizado por meio dos ensaios de cisalhamento interlaminar (ILSS), cisalhamento por compressão (CST) e *Lap shear*. Posteriormente, foram realizados processos de furação utilizando 4000, 6000 e 8000 rpm, bem como avanços de 0,05; 0,1 e 0,2 mm/rot. Após a análise dos resultados, pode-se concluir que os parâmetros influenciaram nos dados de potência, vibração e força de avanço, bem como houve variação significativa nos diâmetros obtidos, sendo que o melhor resultado ocorreu para combinação de 6000 rpm com 0,05mm/rot. Também pode-se afirmar há uma tendência da resistência ao cisalhamento do ensaio de *Lap Shear* em função dos parâmetros de corte.

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem. FML. Delaminação. Potência. Vibração. Força de avanço. Desgaste. *Lap-shear*.

ABSTRACT

The use of composite materials in aeronautical components has been increased in the last years. This is due to these material presente good mechanical properties, allied with low specific mass. Among them, the fiber metal laminated (FML) are a class of materials that has been gaining prominence. However, its use in most cases requires the drilling of holes, which is very complex and can cause damage to the material. Therefore, the objective of this research was to study the conventional drilling process in aeronautical aluminum structures reinforced with fiber metal laminates. Applying different machining parameters, to evaluate the delamination and the wear tools, correlating with the power consumed, vibration, advance force, dimensional variations in the holes and variation of the mechanical properties on material. For this, the material was processed by hot compression molding and characterized by interlaminar shear stress (ILSS), compression shear test (CST) and Lap-shear. Afterwards, drilling processes were carried out using 4000, 6000 and 8000 rpm, as well as an advance of 0.05; 0.1 and 0.2 mm / rot. After the analysis of the results, it was possible to conclude that the parameters influenced the data of power, vibration and force of advance, as well as there was significant variation in the diameters obtained, being the best result occurred for a combination of 6000 rpm with 0,05mm / rot. It can also be stated that there is a tendency of shear strength of the Lap Shear test as a function of cutting parameters.

KEYWORDS: Machining. FML. Delamination. Power. System. Thrust force. Wear. Lap-shear.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	GERAIS	13
2.2	ESPECÍFICOS	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	COMPÓSITOS	14
3.1.1	Compósitos poliméricos estruturais	16
3.1.1.1	Laminados Metal Fibra	17
3.1.1.1.1	GLARE®	20
3.2	USINAGEM	27
3.2.1	Furação	28
3.2.2	Furação de materiais compósitos	30
3.2.2.1	Delaminação	31
3.2.2.2	Delaminação na furação de compósitos	32
3.2.2.3	Fatores que influenciam a delaminação na furação	33
3.2.2.3.1	Velocidade de Corte e de Avanço	33
3.2.2.3.2	Geometria das brocas	34
3.2.2.3.3	Força de avanço	36
3.2.2.3.4	Apoio na furação	39
3.2.2.4	Cálculo da delaminação no processo de furação	40
3.2.3	Complicações no processo de furação	42
3.2.4	Ferramentas de corte	43
3.2.4.1	Materiais para ferramentas de corte em compósitos	44
3.2.4.2	Tipos de Desgastes em Brocas	46
3.2.5	Monitoramento do processo de usinagem	49
3.2.5.1	Potência de usinagem	49
3.2.5.1.1	Cálculo da potência de corte	50
3.2.5.2	Vibração	51
4	MATERIAL E MÉTODOS	53
4.1	PROCESSAMENTO DO FML	54
4.2	ENSAIOS MECÂNICOS	56
4.2.1	Cisalhamento interlaminar	57
4.2.2	Cisalhamento por compressão	58
4.2.3	Lap-Shear	59
4.3	ENSAIOS DE USINAGEM	61
4.3.1	Obtenção dos corpos de prova para usinagem	62
4.3.2	Furação	63
4.3.3	Sistema de Aquisição de Dados	66
4.3.3.1	Potência Consumida	67
4.3.3.1	Vibração	68
4.3.3.2	Força de avanço	69
4.3.4	Desgaste das ferramentas	69

4.3.5 Desvio dimensional.....	70
4.3.6 Influência parâmetros na interface do compósito.....	71
4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	75
4.4.1 Distribuição de Weibull.....	75
4.4.2 Análise de Variância.....	76
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	77
5.1 ENSAIOS MECÂNICOS.....	77
5.1.1 Interlaminar Shear Strength (ILSS)	77
5.1.2 Compress Shear Test (CST).....	79
5.1.3 Lap-shear.....	81
5.2 ENSAIOS DE USINAGEM.....	84
5.2.1 Furação com broca de metal duro com inserto de diamante.....	84
5.2.1.1 Potência consumida.....	88
5.2.1.2 Vibração do sistema.....	89
5.2.1.3 Força de avanço.....	90
5.2.2 Furação com broca de metal duro e revestimento de TiAlN.....	94
5.2.2.1 Potência consumida.....	100
5.2.2.2 Vibração do sistema.....	104
5.2.2.3 Desvio dimensional.....	107
5.2.2.4 Influência parâmetros na interface do compósito.....	113
6 CONCLUSÃO.....	118
REFERÊNCIAS.....	121

1 INTRODUÇÃO

O emprego de materiais compósitos em componentes estruturais vem ganhando uma ampla gama de aplicações em diversos setores da indústria, principalmente na aeronáutica e espacial. Esta ampla utilização se deve ao fato da busca por materiais alternativos às ligas de alumínio e titânio, principalmente como forma de reduzir o peso de aeronaves (TYCZYŃSKI et al., 2014). Dentro deste contexto foram desenvolvidos os compósitos laminados metal fibra (*fiber metal laminate* – FML).

Os laminados metais fibra são compósitos constituídos de camadas de um elemento metálico, geralmente alumínio ou titânio, alternadas com camadas de compósito de matriz polimérica reforçado com fibras contínuas. Esses materiais são amplamente utilizados nas indústrias aeroespacial e de defesa, devido às suas características únicas, as quais combinam elevada resistência a fadiga e ao impacto, com massa específica e elevada resistência a corrosão e ao fogo (GIASIN, AYVAR-SOBERANIS, HODZIC, 2015).

Dentre estes o mais utilizado comercialmente é GLARE[®] (Glass ALuminium Reinforced Epoxy), o qual pode ser constituído por lâminas de alumínio 7475-T761 ou 2024-T3 e camadas de resina epóxi reforçadas com fibra de vidro. Este material normalmente é aplicado na fuselagem dianteira e traseira de aviões como no caso Airbus A380, podendo também ser utilizado em outras partes, como no recobrimento de *flaps*, revestimento de pisos de compartimento de carga e contêineres aéreos (GIASIN, AYVAR-SOBERANIS, HODZIC, 2015; GIASIN, AYVAR-SOBERANIS, 2017).

A aplicação desse material nas estruturas de aeronaves requer frequentemente a união entre duas ou mais partes, as quais em sua grande maioria são feitas mediante fixações mecânicas (parafusos/rebites), necessitando assim de um grande número de perfurações no material (MOURA, MORAIS, MAGALHÃES, 2005). O número total de furos nas estruturas de um avião pode variar de 300 mil para jatos de pequeno porte, até 3 milhões em aeronaves comerciais. Um exemplo é o Airbus A380, no qual em uma única *wing box* (módulo da asa) pode conter até 180 mil furos, chegando num total de 750 mil furos por asa (GIASIN, AYVAR-SOBERANIS, HODZIC, 2015; GIASIN, AYVAR-SOBERANIS, 2017). Contudo a manufatura desses furos é algo complexo e requer parâmetros de usinagem específicos.

Estima-se que 60% das peças que são rejeitadas decorrem de furos defeituosos e com baixa qualidade. Isso ocorre devido à heterogeneidade do material, bem como a anisotropia, sensibilidade ao calor e pelo fato de os reforços serem extremamente abrasivos, causando assim

algumas complicações, com impacto direto na qualidade dos furos, podendo ser extremamente desafiador quando realizado em grande escala (ABRATE, WALTON, 1992; TETI, 2002; GAITONDE et al., 2012; TSAO, 2012; GIASIN, AYVAR-SOBERANIS, HODZIC, 2015).

Durante o processo de furação nesses materiais as fibras são cortadas, a matriz perde resistência e há formação de concentradores de tensão. O processo ainda pode causar delaminação, fissuras interlaminares, deslocamento fibra/matriz e danos de origem térmica, reduzindo assim significativamente o desempenho do material quando solicitado mecanicamente (MOURA, MORAIS, MAGALHÃES, 2005; TSAO, 2012; CHEN et al., 2013).

Além disso, o processo de furação nesses materiais vem sendo realizado durante a etapa final de montagem, ou seja, os furos são confeccionados ao mesmo tempo no FML e na estrutura ao qual ele vai ser unido. Este procedimento vem sendo adotado como forma de evitar diferenças de geometria entre a peça e a estrutura, bem como de reduzir o tempo e aumentar a eficiência nas linhas de montagem, reduzindo os custos de usinagem (GIASIN, AYVAR-SOBERANIS, HODZIC, 2015).

Portanto, a otimização e o controle do processo de furação em compósitos laminados metal fibra empilhados em estruturas metálicas, bem como a determinação da influência dos parâmetros de usinagem na confecção de furos em FML, são fundamentais para determinar os critérios a serem aplicados e como estes são necessários para se obter furos de alta qualidade.

6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de ILSS e CST pode-se afirmar que a metodologia sugerida para a produção do FML proporcionou um material com boas propriedades com relação ao cisalhamento interlaminar, sendo comparado até mesmo com materiais da mesma classe nos quais as camadas de alumínio foram submetidas a tratamentos químicos de anodização da superfície. Além disso a adaptação do ensaio de *Lap Shear* para laminados metal fibra demonstrou-se satisfatória, visto que para tal ensaio foi obtido uma tensão de ruptura média de 12,39 MPa, valor este próximo aos valores encontrados na literatura para testes de adesivos de resina epóxi sob tração entre materiais metálicos.

Considerando brocas de metal duro com inserto de diamante, o processo demonstrou-se ineficaz, visto que ocorreram quebras prematuras das brocas bem como a produção de furos com formato elíptico. Contudo tal resultado ocorreu devido as elevadas vibrações do processo resultante do conjunto de fatores como ferramenta/peça e sistema de fixação. A partir dos resultados encontrados foi possível identificar que o aumento do avanço resulta diretamente no aumento da potência consumida, assim como que a vibração não apresentou uma relação direta com o avanço. Além disso, a força de avanço varia à medida que a broca penetra nas diferentes camadas, bem como aumenta significativamente com o aumento do avanço, o que pode promover uma maior região de delaminação ao redor dos furos.

Contudo nos ensaios com as brocas de metal duro com revestimento de TiAlN, identificou-se que o avanço é o principal parâmetro que influencia na qualidade do furo e nos desgastes das ferramentas, sendo que os melhores furos e as brocas com menores desgastes ocorrem para o avanço de 0,05 mm/rot.

No que diz respeito aos valores captados durante a furação com a broca revestida, pode-se concluir que para a potência consumida, todos os fatores foram significativamente influentes nos resultados e que a menor potência ocorreu para a combinação de 4000 rpm e 0,05mm/rot. Considerando a influência da vibração apenas o avanço foi significativo, sendo que os menores valores de vibração ocorreram para o avanço de 0,05mm/rot.

A partir dos resultados referentes ao desvio dimensional entre o FML e o alumínio 7075, conclui-se que houve uma grande dispersão entre os diâmetros, sendo que em sua grande maioria os furos ficaram subdimensionados e que dentre todas as condições testadas apenas uma resultou em furos com diâmetros próximos entre os materiais e superiores ao diâmetro nominal da broca, sendo tal combinação 6000 rpm com avanço de 0,05 mm/rot.

Considerando a influência dos parâmetros na tensão de ruptura no ensaio de *Lap Shear*, pode-se concluir que, apesar da análise estatística demonstrar que a variação dos parâmetros não foi significativa nos resultados, fato este que pode ter ocorrido devido a número limitado de corpo de prova por combinação de parâmetros (duplicata), graficamente observa-se que a medida que a rotação do fuso aumenta e o avanço diminui, maior é a carga suportada pelo material no ensaio mecânico, o que evidencia a diminuição da ocorrência de danos e delaminações ao redor dos furos.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a influência dos parâmetros de corte na propriedade de cisalhamento obtida pelo ensaio de *Lap Shear* dos laminados metal-fibra com diferentes tratamentos superficiais da superfície do alumínio;
- Avaliar as propriedades das diferentes configurações de laminados metal-fibra em relação às aplicações com furação.
- Avaliar a influência das diferentes configurações de laminados metal-fibra na qualidade do furos;
- Avaliar a influência dos parâmetros de corte na altura e largura das rebarbas;

REFERÊNCIAS

- ABRATE, S.; WALTON, D. A. Machining of composite materials. Part I: Traditional methods. **Composites Manufacturing**, v. 3, n. 2, p. 75-83, 1992.
- ABREU, C. P. **Caracterização da reatividade das ligas alumínio AA2024-T3 e AA7475-T651 soldadas por fricção (FSW)**. 2016. 159 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, University of São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-27012017-131108/pt-br.php>> Acesso em: 13 set. 2018.
- ALTINTAS, Y.; WECK, M. Chatter stability of metal cutting and grinding. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 53, n. 2, p. 619-642, 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2344**: Standard test method for short-beam strength of polymer matrix composite materials and their laminates. West Conshohocken, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5868**: Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding, West Conshohocken, 2014.
- ANDRÉN, H. O. Microstructures of cemented carbides. **Materials & Design**, Surrey, v. 22, n. 6, p. 491-498, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12545**: Conceitos da técnica de usinagem - Forças, energia, trabalho e potências - Terminologia. Rio de Janeiro, 1991.
- BAKER, A.; DUTTON, S.; KELLY, D. **Composite materials for aircraft structures**. 2. ed. Virginia: American institute of aeronautics and astronautics Education Series, 2004. 599p.
- BAPTISTA, E. A.; COPPINI, N. L. Maximizando o Lucro: Otimizando Processos de Usinagem com Auxílio de Sistema Especialista. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 21., INTERNATIONAL CONFERENCE OF INDUSTRIAL ENGINEERING AND OPERATIONS MANAGEMENT, 6., Salvador, 2001. **Proceedings** [...]. Salvador, 2001. p. 225-232.
- BENZERGA, D.; HADDI, A.; LAVIE, A. Delamination model using damage mechanics applied to new composite for orthopaedic use. **International Journal of Material Engineering**, v. 4, n. 3, p. 103-113, 2014.
- BOEING (USA). **787 Aircraft Rescue & Firefighting Composite Structure**. 2013. Disponível em: <http://www.boeing.com/assets/pdf/commercial/airports/faqs/787_composite_arff_data.pdf>. Acesso em: 06 set. 2016.
- BORGONJE, B.; YPMA, M. S. Long term behaviour of glare. **Applied Composite Materials**, v. 10, n. 4-5, p. 243-255, 2003.
- BORK, C. A. **Otimização de variáveis de processo para a furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541**. 1995. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

BOTELHO, E. C.; SILVA, R. A.; PARDINI, L. C.; REZENDE, M. C. A Review on the development and properties of continuous fiber/epóxi/aluminum hybrid composites for aircraft structures. **Materials Research**, vol. 9 n. 3, p. 247-256, 2006.

BRINKSMEIER, E.; JANSSEN, R. Drilling of multi-layer composite materials consisting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), titanium and aluminum alloys. **CIRP Annals**, v. 51, n. 1, p. 87-90, 2002.

CALLISTER JR, W. D; RETHWISCH D. G. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora SA (LTC), 2013. 817p.

CAPELLO, E. Workpiece damping and its effect on delamination damage in drilling thin composite laminates. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 148, n. 2, p. 186-195, 2004.

CHEN, B. Y.; TAY, T. E.; BAIZ, P. M.; PINHO, S. T. Numerical analysis of size effects on open-hole tensile composite laminates, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 47, p. 52-62, 2013.

CHEN, W.C. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 37, n. 8, p. 1097-1108, 1997.

CHITA, R.J.S. **Estudo da delaminação em compósitos**. 2012. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. 2012.

CHUNG, D. D. L. **Composite materials: science and applications**. 2 ed. London: Springer-Verlag London, 2010. 349p.

SILVA, L. F. M.; RODRIGUES, T. N. S. S.; FIGUEIREDO, M. A. V.; MOURA, M. F. S. F.; CHOUSAL, J. A. G. Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength. **The journal of adhesion**, v. 82, n. 11, p. 1091-1115, 2006.

SILVA, R. H. L; BOMBONATO, S. G; LUSTOSA, A. A; SOUTO, U. B; SILVA, M. B. Análise do desgaste de ferramentas via emissão acústica na usinagem de um aço inoxidável. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 5., 2009 Belo Horizonte. **Anais [...]** Belo Horizonte, 2009. 1 CD-ROM.

SILVA, R. H. L; DA SILVA, M. B; DUARTE, M. A. V; COSTA, G. M; BORGES, A. S. Aplicação de rede neural artificial para monitoramento do desgaste de ferramentas utilizando sinal de emissão acústica e potência de corte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6., 2011, Caxias do Sul. **Proceedings [...]** Caxias do Sul, 2011. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/cobef/2011/media/trabalhos/COF11-0040.pdf>> Acesso em: 20 ago. 2018.

DAMATO, C. A. **Efeito do condicionamento ambiental nas propriedades de cisalhamento e viscoelásticas de compósitos híbridos metal-fibra**. 2010. 143f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia. Guaratinguetá. 2010.

DAVID MÜZEL, S. **Estudo da usinagem dos compósitos plástico madeira e madeira plástica**. 2017. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Guaratinguetá, 2017.

DAVIM, J. P. (Ed.). **Machining: fundamentals and recent advances**. 1.ed. London: Springer-Verlag London, 2008. 362p.

DAVIM, J. P.; REIS, P. Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments. **Composite structures**, Oxford, v. 59, n. 4, p. 481-487, 2003.

DAVIM, J. P.; REIS, P.; ANTONIO, C. C. Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up. **Composites Science and Technology**, Barking v. 64, n. 2, p. 289-297, 2004.

DAVIM, J. P.; RUBIO, J. C.; ABRÃO, A. M. A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. **Composites Science and Technology**, Barking, v. 67, n. 9, p. 1939–1945, 2007.

DEROSE, J. A.; SUTER, T.; BAŁKOWIEC, A.; MICHALSKI, J.; KURZYDŁOWSKIB, K. J.; SCHMUTZ, P. Localised corrosion initiation and microstructural characterisation of an Al 2024 alloy with a higher Cu to Mg ratio. **Corrosion Science**, Oxford, v. 55, p. 313-325, 2012.

DIAS, R. C. C. **Microescultura por laser de superfícies metálicas para manufatura de laminados híbridos metal/fibra**. 2013. 117 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo. São Carlos. 2013.

DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8 ed. São Paulo: Art Liber, 2013. 272p.

DOWNEY, J; RAGHAVENDRA, R. Comparison and analysis of audible sound energy emissions during single point machining of HSTS with PVD TiCN cutter insert across full tool life. **Wear**, Lausanne, v. 313, n. 1, p. 53-62, 2014.

EBERHARDT, G. G. **Avaliação da usinabilidade e qualidade dos furos na usinagem de compósitos à base de resina epóxi com carga de pó de ferro**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

FARAZ, A.; BIERMANN, D.; WEINERT, K. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, v. 49, n. 15, p. 1185-1196, 2009.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **Aviation Maintenance Technician Handbook: Airframe**. 1. ed. Washington: Aviation Supplies and Academics Inc., 2012. 592p.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 12. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2006. 751p.

FROELICH, K. J.; FITZPATRICK, C. M. Lap shear strength of selected adhesives (epoxy, varnish, B-stage glass cloth) in liquid nitrogen and at room temperature. **Oak Ridge National Lab.**, 1976.

GAITONDE, V. N; KARNIK, S. R; CAMPOS RUBIO, J; CORREIA, A. E; ABRÃO, A. M.; DAVIM, J. P. Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites. **Journal of materials processing technology**, Amsterdam, v. 203, n. 1-3, p. 431-438, 2008.

GAITONDE, V. N; KARNIK, S. R; CAMPOS RUBIO, J; CORREIA, A. E; DAVIM, J. P. Surface roughness analysis in high-speed drilling of unreinforced and reinforced polyamides. **Journal of Composite Materials**, Lancaster, n 46, p. 2659, 2012.

GAY, D.; HOA, S. V.; TSAI, S. W. **Composite materials: design and applications**. 1. ed. Boca Raton: CRC press, 2003, 523p.

GIASIN, K.; AYVAR-SOBERANIS, S. An investigation of burrs, chip formation, hole size, circularity and delamination during drilling operation of GLARE using ANOVA. **Composite Structures**, Oxford, v. 159, p. 745-760, 2017.

GIASIN, K.; AYVAR-SOBERANIS, S.; HODZIC, A. An experimental study on drilling of unidirectional GLARE fibre metal laminates, **Composite Structures**, Oxford, v. 133, p. 794-808, 2015.

GIROT, F.; DAU, F.; GUTIÉRREZ-ORRANTIA, M^a E. New analytical model for delamination of CFRP during drilling. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 240, p. 332-343, 2017.

GUTIÉRREZ, J.C.H.; RUBIO, J.C.C.; FARIA, P. E. E DAVIM, J.P. Usinabilidade de materiais compósitos poliméricos para aplicações automotivas. **Polímeros**, São Carlos, v. 24, n. 6, p. 711-719, 2014.

HAGENBEEK, M. **Characterisation of fibre metal laminates under thermomechanical loadings**. 2005. 204 f. Tese (Doutorado em Materiais e Estruturas Aeronáuticas) – Universidade de Delft. Delft, Holanda. 2005.

HOCHENG, H.; TSAO, C. C. The path towards delamination-free drilling of composite materials. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 167, n. 2-3, p. 251-264, 2005.

ISMAIL, S. O., DHAKA, H. N. L.; POPOV, I.; BEAUGRAND, J. Comprehensive study on machinability of sustainable and conventional fibre reinforced polymer composites. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 19, n. 4, p. 2043-2052, 2016.

KAHRAMAN, R.; SUNAR, M.; YILBAS, B. Influence of adhesive thickness and filler content on the mechanical performance of aluminum single-lap joints bonded with aluminum powder filled epoxy adhesive. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 205, n. 1-3, p. 183-189, 2008.

KALPAKJIAN, S; SCHMID, S. **Manufacturing, Engineering and Technology**. 6. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2009. 1200p.

KARIMI, N. Z.; HEIDARY, H.; FOTOUHI, M.; MINAK, G. Experimental analysis of GFRP laminates subjected to compression after drilling. **Composite Structures**, Oxford, v. 169, p. 144-152, 2017.

KARIMI, N. Z.; MINAK, G.; KIANFAR, P. Analysis of damage mechanisms in drilling of composite materials by acoustic emission. **Composite Structures**, Oxford, v. 131, p. 107-114, 2015.

KAW, A. K. **Mechanics of composite materials**. 2 ed. United States of America: CRC Press, 2005. 473p.

KAWAI, M.; MORISHITA, M.; TOMURA, S.; TAKAMIDA, K. Inelastic behavior and strength of fiber-metal hybrid composite: GLARE. **International Journal of Mechanical Sciences**, Elmsford, v. 40, n. 2-3, p. 183-198, 1998.

KHASHABA, U. A. Drilling of polymer matrix composites: a review. **Journal of Composite Materials**, Lancaster, v. 47, n. 15, p. 1817-1832, 2013.

KHASHABA, U. A.; EL-SONBATY, I. A.; SELMY, A.I.; MEGAHED, A., A. Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: Part II–Effect of drill wear. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Kidlington, v. 41, n. 9, p. 1130-1137, 2010.

KILICKAP, E. Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite. **Expert Systems with Applications**, New York, v. 37, n. 8, p. 6116-6122, 2010.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1 – Cutting**. 1^a ed. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. 506p.

KRISHNAMOORTHY, A.; LILLY MERCY, J.; VINEETH, K. S. M.; SALUGU, M. K. Delamination analysis of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite plates by thermographic technique. **Materials Today**, Kidlington, v. 2, n. 4-5, p. 3132-3139, 2015.

KUO, C. L.; SOO, S. L.; ASPINWALL, D. K.; CARR, C.; BRADLEY, S.; M'SAOUBI, R.; LEAHY, W. Development of single step drilling technology for multilayer metallic-composite stacks using uncoated and PVD coated carbide tools. **Journal of Manufacturing Processes**, Dearborn, v. 31, p. 286-300, 2018.

KUO, C.; LI, Z.; WANG, C. Multi-objective optimisation in vibration-assisted drilling of CFRP/Al stacks. **Composite Structures**, Oxford, v. 173, p. 196-209, 2017.

LAURO, C.H.; BRANDÃO, L.C; BALDO, D; REIS, R.A; DAVIM, J.P. Monitoring and processing signal applied in machining processes: A review. **Measurement**, Amsterdam, v. 58, p. 73-86, 2014.

LEVY NETO, F; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006. 336p.

LI, J. CHENG, J.; CHEN, P.; CHEN, W.; WEI, C. Fabrication of WC-Co cemented carbides with gradient distribution of WC grain size and Co composition by lamination pressing and microwave sintering. **Ceramics International**, Oxford, v. 44, n. 10, p. 11225-11232, 2018.

LISSEK, F.; TEGAS, J.; KAUFELD, M. Damage quantification for the machining of CFRP: An introduction about characteristic values considering shape and orientation of drilling-induced delamination. **Procedia Engineering**, v. 149, p. 2-16, 2016.

LIU, D.; TANG, Y.; CONG, W. L. A review of mechanical drilling for composite laminates, **Composite Structures**, Oxford, v. 94, n. 4, p. 1265-1279, 2012.

MACHADO, A. R; ABRÃO, A. M; COELHO, R.T; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2009. 371p.

MALLICK, P. K. (Ed.). **Composites engineering handbook**. United States of America: CRC Press, 1997. 1292p.

MARQUES, A. T; DURÃO, L. M; MAGALHÃES, A. G; SILVA, J. F; TAVARES, J. M. R. Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: evaluation of a special step drill. **Composites Science and Technology**, Barking, v. 69, n. 14, p. 2376-2382, 2009.

MAZUMDAR, S. K. **Composite manufacturing: Materials, Product and Process Engineering**, Ed, CRC Press, 2002. 396p.

MITSUBISHI MATERIALS. **Cutting Tool Materials**. 2018. Disponível http://www.mitsubishicarbide.com/en/technical_information/tec_other_data/tec_other_data_top/tec_other_data_technical/tec_cutting_tool_materials. Acesso em: 31 jul. 2018.

MOHAN, N. S.; KULKARNI, S. M.; RAMACHANDRA, A. Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 186, n. 1-3, p. 265-271, 2007.

MOURA, M. F. S. F; MORAIS, A. B; MAGALHÃES, A. G. **Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico**. 2. ed. Porto: Publindústria, 2005. 369p.

NAGARAJAN, V. A.; SELWIN RAJADURAI, J.; ANNIL KUMAR, T. A digital image analysis to evaluate delamination factor for wind turbine composite laminate blade. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 8, p. 3153–3159, 2012.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais – Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 313p.

O'BRIEN, T. K. Interlaminar fracture toughness: the long and winding road to standardization. **Composites Part B: Engineering**, v. 29, n. 1, p. 57-62, 1998.

OSG. HY-PRO CARB MD-3D. Disponível em: http://www.osgtool.com/_branding/books/8002018CA/html5/index.html?&locale=ENG&pn=179>. Acesso em: 10 set. 2018.

PARDINI, L. C. Preformas para compósitos estruturais. **Polímeros**, São Carlos, v. 10, n. 2, p. 100-109, 2000.

PARK, S. Y.; CHOI, W. J.; CHOI, H. S.; KWON, H. Effects of surface pre-treatment and void content on GLARE laminate process characteristics. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 210, n. 8, p. 1008-1016, 2010.

PAWAR, O. A.; GAIKHE, Y. S.; TEWARI, A.; SUNDARAM, R.; JOSHI, S. S. Analysis of hole quality in drilling GLARE fiber metal laminates. **Composite Structures**, Oxford, v. 123, p. 350-365, 2015.

PETERS, S. T. (Ed.). **Handbook of composites**. 2 ed. New York: Springer US, 1998. 1118p.

QUINTANA, G; CIURANA, J. Chatter in machining processes: A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, v. 51, n. 5, p. 363-376, 2011.

RAWAT, S.; ATTIA, H. Wear mechanisms and tool life management of WC–Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites. **Wear**, Lausanne, v. 267, n. 5-8, p. 1022-1030, 2009.

REZENDE, M. C; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C. **Compósitos estruturais: tecnologia e prática**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2011. 396p.

RUBIO, J. C.; ABRAO, A. M.; FARIA, P. E.; CORREIA, A. E.; DAVIM, J. P. Effects of high speed in the drilling of glass fibre reinforced plastic: evaluation of the delamination factor. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, v. 48, n. 6, p. 715-720, 2008.

SANTIAGO, R. C. **Desempenho ao impacto de laminados fibra-metal utilizando reforços termoplásticos**. 2014. 246 f. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

SANTOS, R. G. **Desenvolvimento de um método para comparar os limites de estabilidade dinâmica em máquinas-ferramentas utilizando o diagrama de lóbulos**. 2011. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2007. 246p

SAUDER, C.; LAMON, J.; PAILLER, R. The tensile behavior of carbon fibers at high temperatures up to 2400 C. **Carbon**, Elmsford, v. 42, n. 4, p. 715-725, 2004.

SCHULZE, V.; BECKE, C.; WEIDENMANN, K.; DIETRICH, S. Machining strategies for hole making in composites with minimal workpiece damage by directing the process forces inwards. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 211, n. 3, p. 329-338, 2011.

SECO TOOLS. SD203A-4.83-20-6R1-CX2. Disponível em: <https://www.secotools.com/#article/p_02827932>. Acesso em: 01 ago. 2018.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, Inc, 2005. 651p.

SHYHA, I. S.; SOO, S. L.; ASPINWALL, D. K.; BRADLEY, S.; PERRY, R.; HARDEN, P.; DAWSON, S. Hole quality assessment following drilling of metallic-composite stacks. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, v. 51, n. 7-8, p. 569-578, 2011.

SIDDHPURA, M; PAUROBALLY, R. A review of chatter vibration research in turning. **International Journal of Machine Tools and manufacture**, Oxford, v. 61, p. 27-47, 2012.

SINGHA, M.; SINGHA, K. Applications of textiles in marine products. **Marine Science**, v. 2, n. 6, p. 110-119, 2012.

SINKE, J. Manufacturing of GLARE parts and structures. **Applied Composite Materials**, v. 10, n. 4-5, p. 293-305, 2003.

SINMAZÇELIK, T; AVCU, E; BORA, M. Ö; ÇOBAN, O. A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. **Materials & Design**, Surrey, v. 32, n.7, p.3671-3685, 2011.

SMITH, F. W. **Princípios de ciências e engenharia dos materiais**. 3. ed. Lisboa: Mc Graw-Hill, 1998. 896p.

SOUZA, A J. **Fundamento da usinagem dos materiais: processo de fresamento usinagem**. Rio Grande do Sul: UFRS, 2011. 89 p. Apostila.

STAAB, G. H. **Laminar composites**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015. 466p.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. 2. ed. Florianópolis: editora da UFSC, 1995. 314 p.

STEPHENSON, D. A; AGAPIOU, J. S. **Metal cutting: Theory and Practice**. 2 ed. Florida: CRC Press. 2006. 846p.

STOETERAU, R. L. **Processos de usinagem: fabricação por remoção de material**. Santa Catarina: UFSC, 2004. 180p. Apostila. Disponível em: <<https://solidboxprojectss.files.wordpress.com/2013/01/usinagem-apostila-toda-ilustrada-ufsc.pdf>>. Acesso em: 12 julho 2018.

TARPANI, J. R; GATTI, M. C. A. Tenacidade à fratura translaminar dinâmica de um laminado híbrido metal-fibra para uso em elevadas temperaturas. **Polímeros**, São Carlos, v. 20, n. 4, p. 246-252, 2010.

TAVARES, C. M. M. **Influência da força de aperto na minimização do dano em furação a alta velocidade em materiais compósitos**. 2013. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Almada, 2013.

TETI, R. Machining of composite materials. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 51, n. 2, p. 611-634, 2002.

THOPPUL, S. D.; FINEGAN, J.; GIBSON, R. F. Mechanics of mechanically fastened joints in polymer–matrix composite structures—a review. **Composites Science and Technology**, Barking, v. 69, n. 3-4, p. 301-329, 2009.

TIAN, W.; HU, J.; LIAO, W.; BU, Y.; ZHANG, L. Formation of interlayer gap and control of interlayer burr in dry drilling of stacked aluminum alloy plates. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 29, n. 1, p. 283-291, 2016.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**, 4. ed., Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. 464p.

TSAO, C. C. Drilling process for composites. In: HOCHENG, H. **Machining technology for composite materials: Principles and practice**. 1. ed. Cambridge: Woodhead publishing limited, 2012. Cap. 2, p. 17-64.

TSAO, C. C.; HOCHENG, H. Computerized tomography and C-Scan for measuring delamination in the drilling of composite materials using various drills. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, v. 45, n. 11, p. 1282-1287, 2005.B

TSAO, C. C.; HOCHENG, H. Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, v. 45, n. 11, p. 1261-1270, 2005.

TSAO, C. C.; KUO, K. L.; HSU, I. C. Evaluation of a novel approach to a delamination factor after drilling composite laminates using a core-saw drill. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 59, n. 5-8, p. 617-622, 2012.

TSAO, C. C.; HOCHENG, H. The effect of chisel length and associated pilot hole on delamination when drilling composite materials. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, v. 43, n. 11, p. 1087-1092, 2003.A

TYCZYŃSKI, P.; LEMAŃCZYK, J.; OSTROWSKI, R.; ŚLIWA, R. E. Drilling of CFRP, GFRP, glare type composites. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, London, v. 86, n. 4, p. 312-322, 2014.

VALENTE, P. A. L. **Juntas mecânicas em material compósito**. 2012. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2012.

VELO, I. L.; GOTOR, F. J.; ALCALÁ, M. D.; REAL, C.; CÓRDOBA, J. M. Fabrication and characterization of WC-HEA cemented carbide based on the CoCrFeNiMn high entropy alloy. **Journal of Alloys and Compounds**, Lausanne, v. 746, p. 1-8, 2018.

VINSON, J., R.; SIERAKOWSKI, R., L. **The behavior of structures composed of composite materials**. New York: Springer Publishing, 2008. 442p.

VLOT, A. **Glare: history of the development of a new aircraft material**. 1. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 222p.

VLOT, A.; GUNNINK, J. W. (Ed.). **Fibre metal laminates: an introduction**. 1. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 527p.

VLOT, A.; VOGELANG, L. B.; DE VRIES, T. J. Towards application of fibre metal laminates in large aircraft. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, London, v. 71, n. 6, p. 558-570, 1999.

VOGELESANG, L., B.; VLOT, A. Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 103, n. 1, p. 1-5, 2000.

WU, G.; YANG, J. M. The mechanical behavior of GLARE laminates for aircraft structures. **The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society**, Warrendale, v. 57, n. 1, p. 72-79, 2005.

YOUNG, J. B.; LANDRY, J. G. N.; CAVOULACOS, V. N. Crack growth and residual strength characteristics of two grades of glass-reinforced aluminium 'Glare'. **Composite structures**, Oxford, v. 27, n. 4, p. 457-469, 1994.

YUDHANTO, A.; IWAHORI, Y.; WATANABE, N.; HOSHI, H. Open hole fatigue characteristics and damage growth of stitched plain weave carbon/epoxy laminates, **International Journal of Fatigue**, Guildford, v. 43, p. 12-22, 2012.