

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 11/02/2021.

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Campus de Guaratinguetá - SP

MAÍSA MILANEZ ÁVILA DIAS MACIEL

Estudo do acúmulo de dano pela técnica de excitação por impulso no laminado fibra de carbono 5HS/matriz epóxi

Guaratinguetá
2019

MAÍSA MILANEZ ÁVILA DIAS MACIEL

Estudo do acúmulo de dano pela técnica de excitação por impulso no laminado fibra de carbono 5HS/matriz epóxi

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientadora: Prof^a. Dra. Maria Odila Hilário Cioffi
Co-orientadores: Prof. Dr. Herman Cornelis Jacobus Voorwald e Prof. Dr. Marcos Yutaka Shiino

Guaratinguetá
2019

M152e	Maciel, Maísa Milanez Ávila Dias Estudo do acúmulo de dano pela técnica de excitação por impulso no laminado fibra de carbono 5HS/matriz epóxi / Maísa Milanez Ávila Dias Maciel – Guaratinguetá, 2019. 85 f : il. Bibliografia: f. 70-76 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019. Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Odila Hilário Cioffi Coorientadores: Prof. Dr. Herman Cornelis Jacobus Voorwald e Prof. Dr. Marcos Yutaka Shiino 1. Fibras de carbono. 2. Resinas epóxi. 3. Fadiga. I. Título. CDU 677.2(043)
-------	--

Pâmella Benevides Gonçalves
Bibliotecária/CRB-8/ 9203

MAÍSA MILANEZ ÁVILA DIAS MACIEL

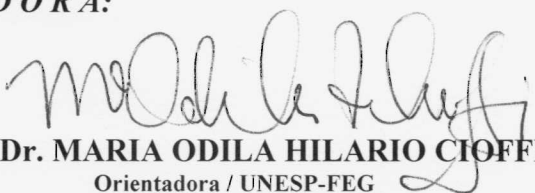
**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

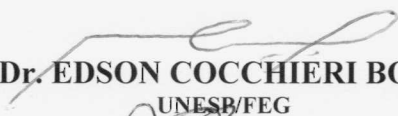
**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: MESTRADO**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof.ª. Dr.ª. Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARIA ODILA HILARIO CIOFFI
Orientadora / UNESP-FEG


Prof. Dr. EDSON COCCHIERI BOTELHO
UNESP/FEG


Prof.ª. Dr.ª. MIRABEL CERQUEIRA REZENDE
UNIFESP/SJC

DADOS CURRICULARES

MAÍSA MILANEZ ÁVILA DIAS MACIEL

NASCIMENTO 25/11/1997 – RIO DE JANEIRO / RJ

FILIAÇÃO Carlos Dias Maciel
Ivonete Ávila

2011/2017 Graduação em Engenharia de Materiais
Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Faculdade de Engenharia,
Campus de Guaratinguetá

Aos meus pais, Carlos Dias Macial e Ivonete
Ávila, pelo apoio e *Troubleshooting*.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Prof^ª. Dr^ª. Maria Odila Hilário Cioffi pela orientação, pela paciência, dedicação e auxílio, sem a sua presença nada disso teria sido possível. Agradeço aos Co-orientadores, Prof. Dr. Marcos Yutaka Shiino, que auxiliou muito no conceito do projeto, com os corpos de prova e pela paciência com a leitura da dissertação; e ao Prof. Dr. Herman Jacobus Cornelis Voorwald, pelo auxílio com os ensaios de fadiga e nas discussões dos resultados.

Aos professores da pós-graduação, que ajudaram em todo o processo de formação e contribuíram muito para o trabalho, em especial os Prof. Dr Fernando Azevedo, Prof. Dr. Erick Siqueira Guidi e ao Prof. Fernando Henrique Mayworm de Araujo.

Aos colegas de pós-graduação que muito me ajudaram nos ensaios, na discussão de resultados e solução de problemas, em especial: Anne Shayene Campos de Bomfim, Sarah David Müzel, Eduardo Pires Bonhin, Luis Felipe de Paula Santos, Miriam Ricciulli, Daniel Magalhães e Francisco Maciel Monticeli.

Aos técnicos da FEG/UNESP, pelo apoio nos ensaios e no suporte aos laboratórios, em especial aos técnicos: Walter Luiz Medeiros Tupinambá/DME e o Antonio Augusto Moretti Rizzato/DEN.

Ao LC3 que fez as análises de termogravimetria para o cálculo de fração volumétrica dos laminados.

Ao Rúbens Coutinho Toledo, meu “time”, que além de realizar as análises de TGA o mais rápido que ele pode, me ajudou no tratamento das imagens de DIC e veio comigo aos sábados e de madrugada acompanhar os ensaios de fadiga, não teria conseguido sem você.

À FAPESP pelo financiamento dos projetos 11/09062-3, 99/06549-5 e 16/12640-2 os quais permitiram a aquisição do equipamento Sonelastic – ATCP e aquisição e *upgrade* da máquina de ensaios universais Instron 8801, respectivamente.

À CAPES, pelos recursos financiados à PROPG para a compra de reagentes e *strain gages*, e aos recursos destinados a periódicos. Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão da bolsa de mestrado 130696/2017-0.

FINANCIAMENTOS

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

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão da bolsa de mestrado 130696/2017-0.

RESUMO

Compósitos reforçados com fibra de carbono são muito utilizados como componentes estruturais na indústria aeronáutica e, em geral, estão sujeitas à esforços dinâmicos, o que pode levar a um processo de perda de propriedade mecânica. Dessa forma conhecer o mecanismo de acúmulo de danos em fadiga de nesse material é fundamental. Neste trabalho, a perda de integridade em compósitos tramados foi monitorada por meio do decaimento do módulo elástico dinâmico em consequência do acúmulo de danos. Para isso, compósitos de tecido de carbono tramado tipo 5HS com matriz epóxi, processado via moldagem por transferência de resina (RTM), foram caracterizados quanto à sua fração volumétrica, resistência à tração e resistência ao cisalhamento. Foi, então, obtida uma média de $54,45\% \pm 1,7$ de fibra entre os laminados e uma média de $3,48\% \pm 0,9$ de vazios. Pelo cisalhamento Iosipescu, foi observada a média de 97,96 MPa de tensão máxima e 3,35 GPa de módulo cisalhante no plano xy. A resistência a tração dos corpos de prova com entalhe (OHT) foi de 494,00 MPa sendo 59,87 GPa de módulo elástico e 0,021 como coeficiente de poisson. O material foi também ensaiado por fadiga em $R = 0,1$, quando o decaimento do módulo de elasticidade foi monitorado pela técnica de excitação por impulso, para a degradação das propriedades mecânicas de cada corpo de prova do início até a fratura do mesmo. Foram observados 3 estágios principais, o estágio inicial até $9,0 \times 10^4$ ciclos, o qual apresentou um rápido decaimento. O segundo estágio, até $8,0 \times 10^5$ ciclos, que apresentou um decaimento quase-linear. O último estágio, até $1,0 \times 10^6$ ciclos, relacionado à presença de delaminações extensas fora da área entalhada. Em geral, o primeiro estágio foi associado a um decaimento de 1,7%, seguido por um decaimento de 4,2% no segundo, e para os corpos de prova que apresentaram o último estágio o decaimento foi em torno de 3,4%.

PALAVRAS-CHAVE: Carbono/Epóxi. módulo residual. 5HS. Fadiga. Falha.

ABSTRACT

Carbon fiber composites are widely used as structural components aircraft industry, and are commonly subjected to dynamic loads, which can lead to damage accumulation and mechanical property decay. Therefore, knowing the mechanisms of damage accumulation of fatigue loads is critical, because it avoids loss of structural integrity to a critical limit. In this work, the integrity loss was monitored by the dynamic elastic modulus decay as a consequence of the accumulation of damage. For this a 5HS woven carbon fiber composite laminate processed by resin transfer molding (RTM) were characterized in relation to their fiber volume fraction, void content, ultimate tensile strength and ultimate shear strength. The fiber volume fractions an average of 54.45% $\pm$ 1.7 of fiber fraction and an average of 3.48% $\pm$ 0.9 of voids was obtained for the laminates. The shear strength analysis used was the Iosipescu test, in which an average of 97.96 MPa of maximum stress and 3.35 GPa of shear modulus in the xy plane were obtained. For the with the open hole tensile tests (OHT) it was obtained an average of 494.00 MPa for maximum stress, 59.87 GPa for elastic modulus and 0.021 for the Poisson ratio. The specimens were monitored during the cyclic tests at constant stress ratio (R) equal to 0.1. The stiffness reduction was measured by impulse excitation technique, which allowed to follow the degradation of the mechanical properties of each specimen from the beginning of the test until fracture. Three main stages of degradation were observed, the initial stage up to 9.0×10^4 cycles, which presented a rapid decay. The second stage, up to 8.0×10^5 cycles, presented a quasi-linear decay. The last stage, up to 1.0×10^6 cycles, of decay was related to the presence of extensive delamination occurring outside the notched area. In general, the first stage was associated with a decay of 1.7%, followed by a decay of 4.2% in the second, and for the test bodies that presented the last stage the decay was around 3.4%.

KEYWORDS: Carbon/Epoxy. residual modulus. 5HS. Fatigue. Failure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Análise bibliométrica com as palavras chaves: <i>Impulse Excitation Technique</i> e <i>Modulus</i> realizada, em fevereiro de 2019.....	17
Figura 2. Análise bibliométrica com as palavras chave: <i>Impulse Excitation Technique</i> , <i>Modulus</i> e <i>Composites</i> , em fevereiro de 2019.....	18
Figura 3. Fluxograma exemplificando as técnicas de processamento mais usuais para materiais compósitos de acordo com o tipo de reforço e matriz usados	21
Figura 4. Ilustração do processo de RTM	22
Figura 5. Configuração dos entrelaçamentos da trama e urdume para um tecido tipo 5HS	23
Figura 6. As linhas de base utilizado para o estudo das Tensões no artigo de Espadas-Escalantes; Van dijk; Isaksson, (2018).....	24
Figura 7. Tensões Internas em obtidas em laminados tramados com empilhamento simples .	24
Figura 8. Mecanismo de falha por <i>splitting</i> para compósitos OHT com fibras a $[0]^{\circ}$	26
Figura 9. Ilustração da degradação da resistência residual até a falha.	29
Figura 10. Os três estágios de degradação para materiais compósitos reforçados por fibras...	30
Figura 11. Fluxograma ilustrando as etapas de Ensaios de fadiga e de IET	37
Figura 12. Esquema de empilhamento simples de tecidos tramados no processo RTM utilizado	38
Figura 13. Corpo de prova OHT e sem entalhe.....	39
Figura 14. Vista doposicionamento dos corpos de prova no Ensaio de Iosipescu (cisalhamento puro)	40
Figura 15. Esquema do número e de como foram realizadas as medidas de IET durante a solicitação em fadiga	42
Figura 16. Exemplificação do padrão manchado para o recobrimento utilizado no DIC	43
Figura 17. Esquema do sistema de aquisição da técnica de IET utilizada neste trabalho	44
Figura 18. Curvas de tensão-deformação dos ensaios de cisalhamento no plano transversal..	46

Figura 19. Leitura de máxima deformação nos ensaios de Iosipescu para os laminados a) L1, b) L3 e c) L4	48
Figura 20. Falha frágil para o corpo de prova OHT submetido à tração	51
Figura 21. Curva S-N para o compósito 5HS e corpos de prova não entalhados.....	52
Figura 22. Curva de degradação do módulo de elasticidade pelo IET para o corpo de prova sem entalhes em alto ciclo (58% da tensão máxima de ruptura).....	53
Figura 23. Curva de degradação do módulo de elasticidade obtidos por IET para os corpos de prova sem entalhes em médio ciclo, (a) 61% da tensão máxima de ruptura e (b) 67% da tensão máxima de ruptura.....	54
Figura 24. Decaimento do módulo elástico utilizando o IET plotado em escala semi-log para amostras sem entalhe.	56
Figura 25. Curva S-N para os corpos de prova tipo OHT	57
Figura 26. Curva log-log de degradação do módulo de elasticidade para todos os corpos de prova tipo OHT.....	57
Figura 27. Curva de degradação do módulo de elasticidade pelo IET para os corpos de prova tipo OHT em diferentes tensões	59
Figura 28. Delaminação ocorrida para o corpo de prova de 91% de resistência máxima à tração	61
Figura 29. Trincas observadas no material (a) na região do furo e (b) nas proximidades do furo	62
Figura 30. Crescimento das trincas axiais nas extremidades do furo. a) lado esquerdo do furo e b) lado direito do furo.....	63
Figura 31. Padrão observado a) na superfície do corpo de prova de 92% de tensão; b) ilustração para melhor visualização.....	64
Figura 32. Curva do decaimento do módulo de elasticidade junto com o crescimento da média das trincas em relação ao número de ciclos para o corpo de prova de 91%.....	65
Figura 33. Dados experimentais vs o modelo proposto para todos os corpos de prova.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição dos corpos de prova utilizados.....	39
Tabela 2. Fração volumétrica dos laminados	45
Tabela 3. Dados obtidos com o ensaio de cisalhamento	47
Tabela 4. Resultados para os ensaios de tração em corpos de prova não entalhados.....	49
Tabela 5. Resultados para os ensaios de tração em corpos de prova OHT.	50
Tabela 6. Valores dos ensaios de fadiga obtidos para os corpos de prova sem entalhe e OHT.	51
Tabela 7. Tabela com o decaimento de módulo em porcentagem para cada estágio e o decaimento total para os corpos de prova sem entalhe.....	53
Tabela 8. Decaimento de módulo em porcentagem para cada estágio e o decaimento total para os corpos de prova OHT	58
Tabela 9. Valores obtidos para as curvas de decaimento e taxa de propagação de trinca para corpos de prova ensaiados com diferentes níveis de tensão.	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UNESP	Universidade Estadual Paulista
FEG	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
DMT	Departamento de materiais e Tecnologia
CFRP	Polímeros reforçados com fibra de carbono
IATA	Associação Internacional de Transportes Aéreos
DIC	<i>Digital Image Correlation</i>
IET	<i>Impulse Excitation Technique</i>
WOS	<i>Web of Science</i>
RTM	<i>Resin Transfer Molding</i>
R	Razão de carregamento
NCF	<i>Non-Crimp Fabric</i>
5HS	<i>5 Harness Satin</i>
OHT	<i>Open Hole Tensile</i>
ASTM	<i>American Society of Testing Materials</i>
L1	Laminado 1
L2	Laminado 2
L3	Laminado 3
L4	Laminado 4
L5	Laminado 5
L6	Laminado 6

LISTA DE SÍMBOLOS

S-N	Tensão – Número de ciclos	
E	Módulo de Elasticidade	[GPa]
I	Momento de Inércia em Área	[m ⁴]
m	Massa	[kg]
V _f	Fração Volumétrica de Fibras	[%]
E _{iet}	Módulo de Elasticidade obtido pelo IET	[GPa]
c	Comprimento	[m]
F	Frequência	[Hz]
L	Largura	[m]
e	Espessura	[m]
k	Fator de correção	
ν	Poisson	
S	Tensão	[MPa]
G ₁₂	Módulo cisalhante em xy	[GPa]
S ₁₂	Tensão máxima de ruptura em xy	[MPa]
γ ₁₂	Deformação máxima de ruptura em xy	[%]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	15
1.2	MOTIVAÇÃO	17
1.3	OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO	20
2.2	COMPÓSITOS PROCESSADOS POR RTM	21
2.3	TECIDOS TRAMADOS	22
2.4	CONCENTRADORES DE TENSÃO.....	25
2.5	FADIGA EM COMPÓSITOS	27
2.6	MÓDULO RESIDUAL	29
2.7	MÓDULO ELÁSTICO VIA EXCITAÇÃO POR IMPULSO	31
2.7.1	Sistema de microfone.....	34
2.7.2	Digital Image Correlation - DIC	35
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	37
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	38
3.2	PROCESSAMENTO.....	38
3.3	DETERMINAÇÃO DA FRACÃO VOLUMÉTRICA	39
3.4	MÉTODO DE IOSIPESCU.....	40
3.5	ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	41
3.6	ENSAIO DE FADIGA	41
3.7	DIGITAL IMAGE CORRELATION – DIC	42
3.8	EXCITAÇÃO POR IMPULSO (IET)	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1	FRAÇÃO VOLUMÉTRICA (V_F).....	45
4.2	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	46
4.3	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	49
4.3.1	Corpos de prova não entalhados	49
4.3.2	Corpos de prova tipo OHT	49
4.4	ENSAIO DE FADIGA AXIAL	51
4.4.1	Corpos de prova não entalhados	52

4.5	CORPOS DE PROVA ENTALHADOS	57
4.6	<i>SPLITTING</i> AXIAL.....	61
4.7	RELAÇÃO DO DECAIMENTO DO MÓDULO E O CRESCIMENTO DA TRINCA 64	
5	CONCLUSÃO	69
6	TRABALHOS FUTUROS	70
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICE A: INSTRUMENTAÇÃO DO CORPO DE PROVA	81
	APÊNDICE B: SEQUÊNCIA DE IMAGENS DIC – IOSIPESCU	83

1 INTRODUÇÃO

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Na última década, laminados de compósitos avançados têm sido muito utilizados, principalmente nas indústrias aeroespacial e automobilística, fato que pode ser atribuído à sua alta resistência à tração para uma baixa massa específica, além da sua grande flexibilidade de processamento (BOSCOLO; BANERJEE, 2014; HASHIMOTO et al., 2012; SASAYAMA et al., 2013). Historicamente sua aplicação em componentes estruturais cresceu com os projetos do Airbus A350XWB e do Boeing 787, os quais, ao utilizarem 50% em peso de compósitos poliméricos reforçados com fibra de carbono (CFRP) na aeronave, possibilitaram uma economia de combustível de 20% (FANTERIA et al., 2017; SASAYAMA et al., 2013).

Eficiência que vem ao encontro as novas metas de redução de emissões de CO₂ pela união européia. A IATA - Associação Internacional de Transportes Aéreos, determinou que, entre 2009 e 2020, haja uma melhora na eficiência de combustível de 1,5% ao ano. Após 2020, inicia-se a limitação das emissões de CO₂ e, a partir de 2050, deverá ser reduzida em até 50% as emissões de CO₂ com base no ano de 2005 (ISHIKAWA et al., 2018; MEMMOLO et al., 2018).

Apesar das grandes vantagens energéticas e estruturais do uso de compósitos em estruturas aeronáuticas, a falha desses materiais é difícil de ser monitorada e prevista, o que limita sua aplicação. Esta dificuldade vem do fato de que diversos mecanismos de acúmulo de dano atuam quando tais materiais estão em serviço, tornando seu monitoramento extremamente complexo (TALREJA; VARNA, 2016). Além disso, estruturas aeronáuticas apresentam como desafio o uso de materiais tramados sob carregamento cíclico, e a necessidade de integração de componentes, o qual gera concentração de tensão.

O comportamento em fadiga de alguns compósitos é considerado superior à algumas ligas metálicas, porém uma maior compreensão do fenômeno é um problema na avaliação da vida em serviço do material (NIXON-PEARSON et al., 2013). Além disso, devido à natureza anisotrópica dos compósitos, o processo de fadiga ocorre logo nos primeiros cem ciclos, com a formação de zonas de danos microscópicos, responsáveis pelo decaimento do módulo axial elástico (VAN PAEPEGEM; DEGRIECK, 2002). A utilização de furos para a junção de partes forma concentradores de tensão, a partir dos quais se iniciam as trincas (YUDHANTO et al., 2012). Assim, a presença desses concentradores de tensão gera uma diversificação dos

efeitos microestruturais, os quais ainda variam com a arquitetura do laminado e a qualidade do acabamento dos furos (NIXON-PEARSON et al., 2013).

Na aeronáutica, técnicas de monitoramento durante a vida do componente são empregadas, a fim de garantir a integridade estrutural e a segurança durante as operações. A manutenção de aeronaves para reparos estruturais gera um aumento no custo do transporte. Para reduzir o custo, uma tentativa de reparo pode ser realizada no estágio inicial do desenvolvimento de danos para limitar os custos diretos. Alternativamente, pode ser decidido adiar o reparo até que o sistema de transporte tenha que ser retirado de serviço para grandes revisões programadas para reduzir os custos indiretos (STASZEWSKI; BOLLER; TOMLINSON, 2004).

Nesse cenário, as análises não destrutivas são técnicas com ótimo potencial para o monitoramento do acúmulo de danos. Essas técnicas podem ser usadas durante o processo produtivo para o controle de qualidade, ou durante a vida em serviço como monitoramento de integridade estrutural. Algumas dessas técnicas são: *Digital image correlation* DIC (GUZMAN et al., 2018), que por meio de câmeras é possível medir a deformação do material; Tomografia computadorizada (NIXON-PEARSON et al., 2013), a qual, pela utilização de raios X direcionados, possibilita mapear o dano interno do material por camada; termografia, na qual pela utilização de uma câmera de infravermelho pode-se registrar a assinatura térmica do material com aplicação de deformação; excitação por impulso (PAOLINO et al., 2017), na qual se capta as frequências ressonantes do material.

O uso da técnica de excitação por impulso (IET) é eficaz na coleta de informações sobre a qualidade estrutural e pode ser instalada permanentemente em estruturas aeronáuticas, pelo uso de pequenos sensores, com uma fácil integração estrutural (MEMMOLO et al., 2018). Esse tipo de técnica pode ser explorado a fim de se monitorar o acúmulo de dano dentro de uma estrutura. Isto porque, a propagação de ondas no material muda diante a um dano interno, conferindo possíveis diagnósticos sobre o estado real da estrutura. Porém, a propagação de ondas em materiais anisotrópicos é altamente complexa, dificultado o seu uso (IDRISS; EL MAHI, 2018; MEMMOLO et al., 2018; PAOLINO et al., 2017).

Dessa forma, visto a grande potencialidade da técnica de excitação por impulso, este trabalho visa acompanhar o decaimento do módulo de elasticidade submetido a um carregamento em fadiga utilizando a análise de excitação por impulso. De forma a avaliar a viabilidade da técnica em medir o módulo residual e se os resultados são comparáveis a técnicas já estudadas na literatura.

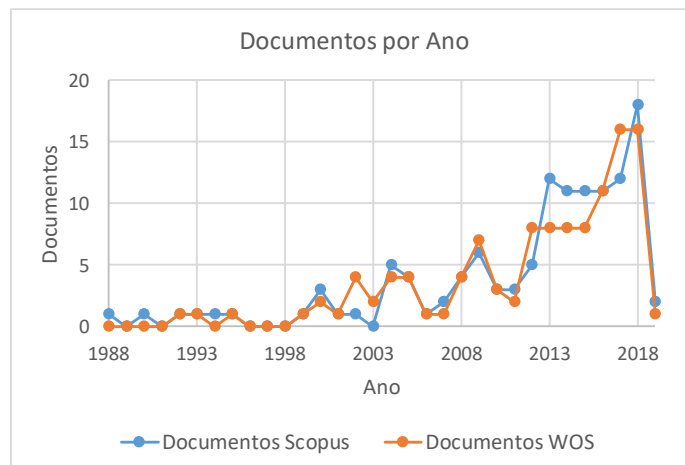
1.2 MOTIVAÇÃO

Esta dissertação de Mestrado contribuirá para o avanço de pesquisas na área de monitoramento de danos em compósitos laminados tramados utilizando a técnica de Excitação por impulso. O IET é uma técnica não destrutiva e ainda pouco utilizada para o monitoramento de integridade estrutural, principalmente quando aplicada a materiais não isotrópicos e neste trabalho ela foi utilizada para monitorar danos ocorridos por carregamento em fadiga.

Até a atualidade, não há um consenso sobre os modelos analíticos de acúmulo de danos para compósitos submetidos aos carregamentos estáticos, devido a complexidade dos mecanismos envolvidos no processo de degradação. Quando se é considerado carregamentos cíclicos, ainda há uma escassez de modelos devido a sua forte dependência de dados empíricos e grande variabilidade dos dados (TALREJA; VARNA, 2016). Assim trabalhos que ajudem a monitorar e prever o acúmulo de danos em compósitos trazem um grande avanço dentro da área. Assim, trabalhos que ajudem a monitorar e prever o acúmulo de dano em compósitos trazem um grande avanço dentro desta área.

Além disso, a utilização de ensaios não destrutivos no auxílio do entendimento dos mecanismos de dano tem crescido muito apenas nos últimos anos. Realizando uma análise bibliométrica na Scopus/Elsevier e na Web of Science (WOS), utilizando as palavras chaves *impulse excitation technique* e *modulus* (25/02/2019), foram encontrados 111 artigos na Scopus e 110 artigos na WOS, todos artigos *peer-reviewed*, como indicado na Figura 1.

Figura 1. Análise bibliométrica com as palavras chaves: *Impulse Excitation Technique* e *Modulus* realizada, em fevereiro de 2019

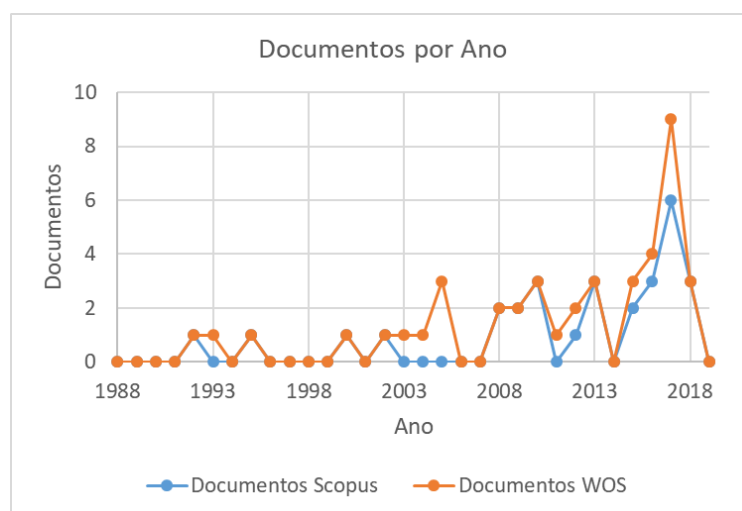


Fonte: Adaptado dos dados do Scopus e Web of science

Observa-se que há uma tendência crescente do uso da técnica de excitação por impulso correlacionada com medidas de módulo, principalmente a partir dos últimos 10 anos. Sendo que os artigos publicados até os anos 2000 foram artigos que estudaram apenas o fenômeno oscilatório.

A segunda busca foi realizada adicionando a palavra-chave *Composites* (25/02/2019), o que levou à redução de 111 para 28 artigos na Scopus e 110 para 42 artigos na WOS, todos artigos *peer-reviewed*, essa tendência pode ser observada na Figura 2.

Figura 2. Análise bibliométrica com as palavras chave: *Impulse Excitation Technique, Modulus e Composites*, em fevereiro de 2019



Fonte: Adaptado dos dados do Scopus e Web of science

Observa-se que também houve uma tendência crescente nos últimos 8 anos de trabalhos utilizando a técnica para caracterização de compósitos. É importante ressaltar que nessa pesquisa não foram excluídos compósitos metálicos ou cerâmicos. Esses dados destacam a proposta deste trabalho como inovador, visto que as pesquisas bibliométricas indicam uma tendência crescente de artigos publicados.

1.3 OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O principal objetivo deste trabalho foi o estudo do decaimento do módulo elástico do compósito tramado submetido a carregamento axial em regime cíclico, utilizando o ensaio não destrutivo IET. A utilização do IET como técnica de medição de módulo permite monitorar o decaimento para um mesmo corpo de prova durante o ensaio em fadiga do

mesmo. Para avaliar o decaimento do módulo foram obtidas as curvas de módulo residual para cada um dos corpos de prova, desde o início até a sua fratura.

Para o desenvolvimento deste projeto podem ser destacadas as seguintes etapas:

- 1) desenvolvimento de uma metodologia para o acompanhamento do módulo residual;
- 2) levantamento das curvas de Módulo por número de ciclos;
- 3) comparação do decaimento do módulo via técnica de excitação por impulso (IET) e curvas de módulo residual e,
- 4) avaliação dos diferentes mecanismos de danos nas diferentes tensão aplicadas.

5 CONCLUSÃO

Com base nos dados apresentados foi possível desenvolver uma metodologia para o acompanhamento do módulo residual utilizando o IET, sendo que a técnica se mostrou equiparada com as metodologias já estudadas.

Com o levantamento das curvas de módulo elástico por número de ciclos, foi possível observar que o decaimento inicial é bem severo, e provavelmente relacionado com propagação de trincas na matriz, incluindo o *splitting* da matriz e a nucleação de trincas transversais. Além disso, observou-se que apesar de se trabalhar com tensões próximas foi observado que o aumento da tensão máxima utilizada no material tem um impacto direto na quantidade de dano que o material acumula, sendo que quanto maior a tensão e maior o número de ciclos maior a quantidade de dano acumulado no material.

Para os corpos de prova OHT, foi acompanhado o crescimento das trincas nas extremidades dos entalhes, e foi observado que as trincas se propagam rapidamente nos primeiros ciclos, o que provavelmente é este fenômeno que mais impacta na degradação inicial do módulo. Foi observado também uma relação com o tamanho da trinca e a tensão máxima utilizada nos ensaios, quanto maior a tensão maior foi o tamanho alcançado pela trinca antes da sua estabilização. Na literatura, esta estabilização foi relacionada com um possível limite de resistência a fadiga, porém neste trabalho foi observado que para os corpos de prova que não fraturaram antes de 1×10^6 , a estabilização da trinca foi seguida do decréscimo do módulo elástico e o aparecimento de delaminações extensas no corpo de prova.

6 TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos e analisados o autor coloca as seguintes sugestões para o prosseguimento da presente pesquisa:

1. Estudar o comportamento de decaimento do módulo para outras arquiteturas de laminados, principalmente com laminados tipo *plain weave*.
2. Estudar outras geometrias de entalhes, a fim de observar se ocorre uma interferência no decaimento do módulo.
3. Fazer mais ensaios a fim de comparar módulo residual do IET com o módulo residual obtido por *strain gages*.

REFERÊNCIAS

American Society for Testing Materials. **ASTM D3039/D3039M - 14**. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. West Conshohocken: 2014.

American Society for Testing Materials. **ASTM D3479/D3479M - 12**. Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite. West Conshohocken: 2012 v. 96

American Society for Testing Materials. **ASTM D5379**. Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched. West Conshohocken: 2012

American Society for Testing Materials. **ASTM D5766/D5766M - 11**. Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite. West Conshohocken: 2012

American Society for Testing Materials. **ASTM E1876 - 15**. Standard Test Method for Dynamic Young ' s Modulus , Shear Modulus , and Poisson ' s Ratio by Impulse Excitation of Vibration 1. West Conshohocken: 2015.

ADVANI, S. G.; SOZER, E. M. **Process Modeling in Composites Manufacturing**. New York: Marcel Dekker, Inc, 2002.

BALLOU, G. **Electroacoustic devices: Microphones and loudspeakers**. Waltham: Focal, 2009.

BONIFACE, L.; OGIN, S. L. Application of the Paris Equation to the Fatigue Growth of Transverse Ply Cracks. **Journal of Composite Materials**, Lancaster, v. 23, n. 7, p. 735–754, 1989. Disponível em : <[http: DOI: 10.1177/002199838902300706](http://dx.doi.org/10.1177/002199838902300706)> Acesso em: 30 maio 2018.

BOSCOLO, M.; BANERJEE, J. R. Layer-wise dynamic stiffness solution for free vibration analysis of laminated composite plates. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 333, n. 1, p. 200–227, 2014. Disponível em : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2013.08.031>> Acesso em: 15 jun. 2015

BROCKS, T. et al. Experimental RTM manufacturing analysis of carbon/epoxy composites for aerospace application. **Materials Research**, São Carlos, v. 16, n. 5, p. 1175–1182, 2013. Disponível em : <[http:// 10.1590/S1516-14392013005000107](http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392013005000107)> Acesso em: 03 out. 2018

BRU, T. et al. Use of the Iosipescu test for the identification of shear damage evolution laws of an orthotropic composite. **Composite Structures**, Oxford, v. 174, p. 319–328, 2017. Disponível em : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.068> > Acesso em: 29 nov. 2018

CHONDROS, T. G.; DIMAROGONAS, A. D. Identification of cracks in welded joints of complex structures. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 69, n. 4, p. 531–538, 1980. Disponível em : <[http://10.1016/0022-460X\(80\)90623-9](http://10.1016/0022-460X(80)90623-9)> Acesso em: 03 outubro 2018

CHOU, T.; KO, F. K (EDS.). **Textile Structural Composites**. Amsterdam: Elsevier, 1989.

DAKEN, H. H.; MAR, J. W. Splitting initiation and propagation in notched unidirectional graphite/epoxy composites under tension-tension cyclic loading. **Composite Structures**, Oxford, v. 4, n. 2, p. 111–133, 1985. Disponível em : <<http://1-s2.0-S0263822300X01262/1-s2.0-0263822385900029>> Acesso em: 28 ago. 2018

DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials**. New York: Oxford University Press, 1994.

DEGRIECK, J.; PAEPEGEM, W. VAN. Fatigue damage modeling of fibre-reinforced composite materials : Review. **Applied mechanics reviews**, New York, v. 54, n. 4, p. 279–300, 2001. Disponível em : <<http://10.1115/1.1381395>> Acesso em: 03 maio 2018

DONG, C.; DAVIES, I. J. Flexural strength of bidirectional hybrid epoxy composites reinforced by e glass and T700S carbon fibres. **Composites Part B: engineering**, Kidlington, v. 72, p. 65–71, 2015. Disponível em : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.11.031> > Acesso em: 27 mar. 2017

ESPADAS-ESCALANTE, J. J.; VAN DIJK, N. P.; ISAKSSON, P. The effect of free-edges and layer shifting on intralaminar and interlaminar stresses in woven composites. **Composite Structures**, Oxford, v. 185, n. November 2017, p. 212–220, 2018. Disponível em : < <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.014> > Acesso em: 01 ago. 2018

FANTERIA, D. et al. Experimental characterization of the interlaminar fracture toughness of a woven and a unidirectional carbon/epoxy composite — ScienceDirect. **Composites Science and Technology**, Barking, v. 142, p. 20–29, 2017. Disponível em : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.01.028> > Acesso em: 27 mar. 2017

GAMSTEDT, E. K.; TALREJA, R. Fatigue damage mechanisms in unidirectional carbon-fibre-reinforced plastics. **Journal of Materials Science**, London, v. 34, n. 11, p. 2535–2546, 1999. Disponível em : < link.springer.com/article/10.1023/A:1004684228765 > Acesso em: 11

nov. 2017

GOVAERT, L. E.; VAN MELICK, H. G. H.; MEIJER, H. E. H. Temporary toughening of polystyrene through mechanical pre-conditioning. **Polymer**, London, v. 42, n. 3, p. 1271–1274, 2001. Disponível em : <[http:// S0032-3861\(00\)00477-8](http://S0032-3861(00)00477-8) > Acesso em: 03 Jul. 2018

GREENHALGH, E. S. et al. Enhanced fracture toughness of hierarchical carbon nanotube reinforced carbon fibre epoxy composites with engineered matrix microstructure. **Composites Science and Technology**, Barking, v. 170, 11. August 2018, p. 85–92, 2018. Disponível em : < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353818320621> > Acesso em: 11 dez. 2018

GUZMAN, F. S. et al. Use of digital image correlation to measure strain recovery in particle toughened thermoset resins. **Strain**, London, nov. 2017, p. 1–14, 2018. Disponível em : <<http://10.1111/str.12261> > Acesso em: 23 maio 2018

HALLETT, S. R. et al. An experimental and numerical investigation into the damage mechanisms in notched composites. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, Kidlington, v. 40, n. 5, p. 613–624, 2009. Disponível em : <<http://10.1016/j.compositesa.2009.02.021> > Acesso em: 06 jul. 2015

HAN, S. H. et al. Study on high-speed RTM to reduce the impregnation time of carbon/epoxy composites. **Composite Structures**, Oxford, v. 119, p. 50–58, 2015. Disponível em : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.08.023> > 0263-8223/Ó 2014 > Acesso em: 27 mar. 2017

HARRIS, B. (ED.). **Fatigue in composites**. Padstow: Woodhead Publishing, 2000.

HASHIMOTO, M. et al. Prediction of tensile strength of discontinuous carbon fiber / polypropylene composite with fiber orientation distribution. **Composites Part A**, Kidlington, v. 43, n. 10, p. 1791–1799, 2012. Disponível em : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.05.006> > Acesso em: 15 jun. 2015

HAUERT, A.; ROSSOLL, A.; MORTENSEN, A. Young's modulus of ceramic particle reinforced aluminium: Measurement by the Impulse Excitation Technique and confrontation with analytical models. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, Kidlington, v. 40, n. 4, p. 524–529, 2009. Disponível em : < <http://10.1016/j.compositesa.2009.02.001> > Acesso em: 17 jul. 2018

HIGUCHI, R. et al. Progressive failure under high-velocity impact on composite laminates : experiment and phenomenological mesomodeling. **Engineering Fracture Mechanics**, Elmsford, 2017. Disponível em : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.03.019> >

Acesso em: 18 maio 2017

HINE, P. J.; RUDOLF LUSTI, H.; GUSEV, A. A. Numerical simulation of the effects of volume fraction, aspect ratio and fibre length distribution on the elastic and thermoelastic properties of short fibre composites. **Composites Science and Technology**, Barking, v. 62, n. 10–11, p. 1445–1453, 2002. Disponível em : < [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00089-1](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00089-1) > Acesso em: 12 nov. 2018

HU, Y. L.; MADENCI, E. Peridynamics for fatigue life and residual strength prediction of composite laminates. **Composite Structures**, Oxford, v. 160, p. 169–184, 2017. Disponível em : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.010> > Acesso em: 03 maio 2018

IDRISS, M.; EL MAHI, A. Linear and nonlinear resonant techniques for characterizing cyclic fatigue damage in composite laminate. **Composites Part B: engineering**, Kidlington, v. 142, n. January, p. 36–46, 2018. Disponível em : <[http:// 10.1016/j.compositesb.2017.12.058](http://10.1016/j.compositesb.2017.12.058) > Acesso em: 21 ago. 2018

Brooks N. Is RTM ready for mass production? **Reinforced Plastics**, v. 39, n. 1, p. 26–34, 1995.

ISHIKAWA, T. et al. Overview of automotive structural composites technology developments in Japan. **Composites Science and Technology**, Barking, v. 155, p. 221–246, 2018. Disponível em : <[http:// 0.1016/j.compscitech.2017.09.015](http://10.1016/j.compscitech.2017.09.015) > Acesso em: 23 maio 2018

KAMAL, M.; RAHMAN, M. M. Advances in fatigue life modeling : A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 82, n. July 2017, p. 940–949, 2018. Disponível em : < [http:// 10.1016/j.rser.2017.09.047](http://10.1016/j.rser.2017.09.047) > Acesso em: 03 maio 2018

KAWAI, M.; ISHIZUKA, Y. Fatigue life of woven fabric carbon/epoxy laminates under alternating R-ratio loading along non-proportional path in the σ_m - σ_{ap} plane. **International Journal of Fatigue**, Guildford, v. 112. March, p. 36–51, 2018. Disponível em : <[http:// 10.1016/j.ijfatigue.2018.02.036](http://10.1016/j.ijfatigue.2018.02.036) > Acesso em: 29 maio 2018

KELLER, A. et al. Core-shell rubber nanoparticle reinforcement and processing of high toughness fast-curing epoxy composites. **Composites Science and Technology**, Barking, v. 147, p. 78–88, 2017. Disponível em : < [http:// 10.1016/j.compscitech.2017.05.002](http://10.1016/j.compscitech.2017.05.002) > Acesso em: 23 maio 2018

KESSLER, S. S. et al. Damage detection in composite materials using frequency response methods. **Journal of Applied Mechanics**, New York, v. 111, n. 1, p. 270–78, 2002. Disponível em : < [http:// 10.1016/S1359-8368\(01\)00050-6](http://10.1016/S1359-8368(01)00050-6) > Acesso em: 26 set. 2018

KHARRAT, M. et al. Influence of damage accumulation under fatigue loading on the AE-based health assessment of composite materials: Wave distortion and AE-features evolution as a function of damage level. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, Kidlington, v. 109, p. 615–627, 2018. Disponível em : < <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.03.020> > Acesso em: 01 ago. 2018

KITSELIS, A.; TRAIFOROS, N. A.; MANOLAKOS, D. E. The effect of resonance on the void content in CFRP tubes. **Composites Part B: engineering**, Kidlington, v. 106, p. 164–171, 2016. Disponível em : < <http://10.1016/j.compositesb.2016.09.019> > Acesso em: 12 fev. 2019

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais**. 1. ed. São Paulo, Editora Edgard Blucher LTDA, 2006.

MAMALIS, D.; FLANAGAN, T.; Ó BRÁDAIGH, C. M. Effect of fibre straightness and sizing in carbon fibre reinforced powder epoxy composites. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, Kidlington, v. 110, n. April, p. 93–105, 2018. Disponível em : < <http://0.1016/j.compositesa.2018.04.013> > Acesso em: 12 fev. 2019

MEMMOLO, V. et al. Guided wave propagation and scattering for structural health monitoring of stiffened composites. **Composite Structures**, Oxford, v. 184, n. September 2017, p. 568–580, 2018. Disponível em : < <http://0.1016/j.compstruct.2017.09.067> > Acesso em: 21 ago. 2018

MIRZA, M. S. et al. An experimental study of static and dynamic responses of prestressed concrete box - girder bridges -. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Ottawa, n. 1985, 1990. Disponível em : < <https://doi.org/10.1139/l90-052> > Acesso em: 13 out. 2018

MONTESANO, J. et al. Elevated temperature off-axis fatigue behavior of an eight-harness satin woven carbon-fiber/bismaleimide laminate. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, Kidlington, v. 43, n. 9, p. 1454–1466, 2012. Disponível em : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.04.016> > Acesso em: 29 abr. 2018

MONTICELI, F. M. et al. Mechanical behavior simulation: NCF/epoxy composite processed by RTM. **Polymers and Polymer Composites**, Kingston, v. 27, n. 2, p. 66–75, 2019. Disponível em : < <http://10.1177/0967391118817174> > Acesso em: 12 fev. 2019

MUC, A. et al. Fatigue damage growth monitoring for composite structures with holes. **Composite Structures**, Oxford, v. 189, n. January, p. 117–126, 2018. Disponível em : < <http://10.1016/j.compstruct.2018.01.065> > Acesso em: 03 maio 2018

NAIK, N. K. et al. Impact response and damage tolerance characteristics of glass-

carbon/epoxy hybrid composite plates. **Composites Part B: engineering**, Kidlington v. 32, n. 7, p. 565–574, 2001. Disponível em : < [http:// 10.1016/S1359-8368\(01\)00036-1](http://10.1016/S1359-8368(01)00036-1) > Acesso em: 27 mar. 2018

NAIK, N. K.; SIRISHA, M.; INANI, A. Permeability characterization of polymer matrix composites by RTM/VARTM. **Progress in Aerospace Sciences**, New York, v. 65, p. 22–40, 2014. Disponível em : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2013.09.002> > Acesso em: 27 mar. 2018

NGUYEN, N. Q. et al. Micro-CT measurement of fibre misalignment: Application to carbon/epoxy laminates manufactured in autoclave and by vacuum assisted resin transfer moulding. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, Kidlington v. 104, p. 14–23, 2018. Disponível em : < <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.10.018> > Acesso em: 07 mar. 2018

NISHIKAWA, M. et al. Micromechanical modeling of the microbond test to quantify the interfacial properties of fiber-reinforced composites. **International Journal of Solids and Structures**, New York, v. 45, n. 14–15, p. 4098–4113, 2008. Disponível em : < <http://10.1016/j.ijsolstr.2008.02.021> > Acesso em: 12 ago. 2016

NIXON-PEARSON, O. J. et al. Damage development in open-hole composite specimens in fatigue. Part 1: Experimental Investigation. **Composite Structures**, Oxford, v. 106, p. 890–898, 2013. Disponível em : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.05.019> > Acesso em: 17 set. 2017

O’HIGGINS, R. M.; MCCARTHY, M. A.; MCCARTHY, C. T. Comparison of open hole tension characteristics of high strength glass and carbon fibre-reinforced composite materials. **Composites Science and Technology**, Barking, v. 68, n. 13, p. 2770–2778, 2008. Disponível em : < [http:// 10.1016/j.compscitech.2008.06.003](http://10.1016/j.compscitech.2008.06.003) > Acesso em: 17 set. 2015

OKABE, T. Recent studies on numerical modelling of damage progression in fibre-reinforced plastic composites. **Mechanical Engineering Reviews**, Tokyo, v. 2, n. 1, p. 14-00226-14-00226, 2015. Disponível em : < https://www.jstage.jst.go.jp/article/mer/2/1/2_14-00226/_article > Acesso em: 20 ago. 2017

OKABE, T. et al. Multi-objective optimization for resin transfer molding process. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, Kidlington, v. 92, p. 1–9, 2017. Disponível em : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.09.023> > Acesso em: 07 mar. 2018

ORELL, O. et al. Characterization of elastic constants of anisotropic composites in compression using digital image correlation. **Composite Structures**, Oxford, v. 185, n. September 2017, p. 176–185, 2018. Disponível em : <

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.008> > Acesso em: 14 nov. 2018

OWENS, B. C.; WHITCOMB, J. D.; VARGHESE, J. Effect of finite thickness and free Edges on stresses in plain weave composites. **Journal of Composite Materials**, Lancaster, v. 44, n. 6, p. 675–692, 2010. Disponível em : < [http:// 10.1177/0021998309347571](http://10.1177/0021998309347571) > Acesso em: 01 ago. 2018

PANDITA, S. D. et al. Tensile fatigue behaviour of glass plain-weave fabric composites in on- and off-axis directions. **Composites - Part A: applied science and manufacturing**, Kidlington, v. 32, n. 10, p. 1533–1539, 2001. Disponível em : < [http:// 10.1016/S1359-835X\(01\)00053-7](http://10.1016/S1359-835X(01)00053-7) > Acesso em: 28 set. 2017

PAOLINO, D. S. et al. Damaged composite laminates: Assessment of residual Young's modulus through the Impulse Excitation Technique. **Composites Part B: engineering**, Kidlington, v. 128, p. 76–82, 2017. Disponível em : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.008> > Acesso em: 08 mar. 2018

PASCAL, F. et al. Impact damage prediction in thin woven composite laminates – Part I: Modeling strategy and validation. **Composite Structures**, Oxford, v. 190, n. December 2017, p. 32–42, 2018. Disponível em : < <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.02.007> > Acesso em: 14 maio 2018

PEI, X. et al. Effect of damage on the vibration modal of a novel three-dimensional and four-directional braided composite T-beam. **Composites Part B**, Kidlington, v. 86, p. 108–119, 2016. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.022> > Acesso em: 19 abr. 2018

QI, Y. et al. Investigation of strain history in fast and conventional curing epoxy matrix composites by FBGs. **Composites Science and Technology**, Barking, v. 159, p. 18–24, 2018. Disponível em : < [http:// 10.1016/j.compscitech.2018.02.019](http://10.1016/j.compscitech.2018.02.019) > Acesso em: 23 maio 2018

RACKERS, B. **Resin Transfer Moulding for aerospace structures**. London, Springer.

RAFIEE, R.; RESHADI, F.; EIDI, S. Stochastic analysis of functional failure pressures in glass fiber reinforced polyester pipes. **Materials and Design**, Surrey, v. 67, p. 422–427, 2015. Disponível em : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.12.003> > Acesso em: 12 dez. 2018

REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros**, São Carlos, v. 10, n. 2, p. e4–e10, 2000. Disponível em : < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282000000200003&lng=en&nrm=iso&tlng=pt > Acesso em: 27 mar. 2017

SALAWU, O. S. Detection of structural damage through changes in frequency: A review. **Engineering Structures**, Oxford, v. 19, n. 9, p. 718–723, 1997. Disponível em : < [http://10.1016/S0141-0296\(96\)00149-6](http://10.1016/S0141-0296(96)00149-6) > Acesso em: 01 out. 2018

SASAYAMA, T. et al. Prediction of failure properties of injection-molded short glass fiber-reinforced polyamide 6,6. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, Kidlington, v. 52, p. 45–54, 2013. Disponível em : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.05.004> > Acesso em: 12 ago. 2016

SCOPUS. **Análise bibliométrica com as palavras-chave:** Impulse Excitation Technique, Modulus e Composites. Disponível em:< <https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic>> Acesso em: 25 fev. 2019

SEBAEY, T. A. et al. Damage resistance and damage tolerance of dispersed CFRP laminates: Effect of ply clustering. **Composite Structures**, Oxford, v. 106, p. 96–103, 2013. Disponível em : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.05.052> > Acesso em: 11 dez. 2018

SHIINO, M. Y. **Fadiga em compósitos 5HS carbono/epóxi processados via RTM: relação entre cargas axiais no plano e modos de delaminação**. Orientadora: Maria Odila Hilário Cioffi. 2015. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, 2015.

SHIINO, M. Y.; CIOFFI, M. O. H.; VOORWALD, H. J. C. Evaluation of stitched fabric composite processed by RTM in quasi-static test. **Procedia Engineering**, New York, v. 10, p. 2603–2608, 2011. Disponível em : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.434> > Acesso em: 27 mar. 2017

SOUTIS, C. Compressive strength of composite laminates with an open hole: Effect of ply blocking. **Journal of Composite Materials**, Lancaster, v. 47, n. 20–21, p. 2503–2512, 2013. Disponível em : < <http://10.1177/0021998312466122> > Acesso em: 11 dez. 2018

STASZEWSKI, W. J; BOLLER, C.; TOMLINSON, G. R. (EDS.). **Health monitoring of aerospace structures**. Nova Jersey: Jonh Wiley & Sons, ltd, 2004.

TALREJA, R.; VARNA, J. (EDS.). **Modeling damage, fatigue and failure of composite materials**. Sawston: Elsevier Ltd, 2016.

TEKIELI, M. et al. Application of Digital Image Correlation to composite reinforcements testing. **Composite Structures**, Oxford, v. 160, p. 670–688, 2017. Disponível em : < <http://10.1016/j.compstruct.2016.10.096> > Acesso em: 14 nov. 2018

TOGNANA, S. et al. Measurement of the Young's modulus in particulate epoxy composites using the impulse excitation technique. **Materials Science and Engineering A**. Lausanne, v. 527, p. 4619–4623, 2010. Disponível em : < [http:// 10.1016/j.msea.2010.04.083](http://10.1016/j.msea.2010.04.083) > Acesso em: 19 abr. 2018

TURK, M.; HAMERTON, I.; IVANOV, D. S. Ductility potential of brittle epoxies: Thermomechanical behaviour of plastically-deformed fully-cured composite resins. **Polymer** (United Kingdom), London, v. 120, p. 43–51, 2017. Disponível em : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2017.05.052> > Acesso em: 28 ago. 2017

VAN PAEPEGEM, W.; DEGRIECK, J. A new coupled approach of residual stiffness and strength for fatigue of fibre-reinforced composites. **International Journal of Fatigue**, Guildford, v. 24, n. 7, p. 747–762, 2002. Disponível em : < [http:// 10.1016/S0142-1123\(01\)00194-3](http://10.1016/S0142-1123(01)00194-3) > Acesso em: 28 set. 2017

VAN PAEPEGEM, W.; DEGRIECK, J. Simulating damage and permanent strain in composites under in-plane fatigue loading. **Composites Science and Technology**, Barking, v. 83, n. 23–24, p. 1930–1942, 2005. Disponível em : < [http:// 10.1016/j.compstruc.2005.03.005](http://10.1016/j.compstruc.2005.03.005) > Acesso em: 28 set. 2017

WEB OF SCIENCE. **Análise bibliométrica com as palavras-chave:** Impulse Excitation Technique, Modulus e Composites. Disponível em: < https://apps.webofknowledge.com/WOS_GeneralSearch_input.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&SID=6BOKS7RuJmVVd2AfjPP&preferencesSaved=> > Acesso em: 25 fev. 2019

YAN, S.; ZENG, X.; LONG, A. Experimental assessment of the mechanical behaviour of 3D woven composite T-joints. **Composites Part B: engineering**, Kidlington, v. 154, n. April, p. 108–113, 2018. Disponível em : < <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.007> > Acesso em: 19 ago. 2018

YUDHANTO, A. et al. 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. Disponível em : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.02.002> > Acesso em: 17 set. 2015

YUN, M. et al. Stochastic modeling of through the thickness permeability variation in a fabric and its effect on void formation during Vacuum Assisted Resin Transfer Molding. **Composites Science and Technology**, Barking, v. 149, p. 100–107, 2017. Disponível em : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.06.016> > Acesso em: 07 mar. 2018

ZHAO, L. et al. A residual strain model for progressive fatigue damage analysis of composite structures. **Composite Structures**, Oxford, v. 169, p. 69–78, 2017. Disponível em : <

<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.119> > Acesso em: 03 maio 2018

ZOU, Y.; TONG, L.; STEVEN, G. P. Vibration-based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures - a review. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 230, n. 2, p. 357–378, 2000. Disponível em : < [http:// 10.1006/jsvi.1999.2624](http://10.1006/jsvi.1999.2624) > Acesso em:26 set. 2018