


RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 02/02/2017.

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

JONAS FRANK REIS

**INFLUÊNCIA DO CONDICIONAMENTO HIGROTÉRMICO NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS SOLDADOS DE PEI/FIBRAS
DE CARBONO**

Guaratinguetá - SP
2016

Jonas Frank reis

**INFLUÊNCIA DO CONDICIONAMENTO HIGROTÉRMICO NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS SOLDADOS DE PEI/FIBRAS
DE CARBONO**

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

Orientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho
Coorientadora: Prof^a Dr^a. Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão

Guaratinguetá - SP
2016

R375i Reis, Jonas Frank
 Influência do condicionamento higrotérmico no comportamento
 mecânico de compósitos soldados de PEI/fibras de carbono / Jonas Frank
 Reis – Guaratinguetá, 2016.
 139 f : il.
 Bibliografia: f. 125-132

 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

 Orientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho
 Coorientadora: Prof^a. Dr^a Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahã

 1. Materiais compostos. 2. Fibras de carbono. 3. Soldagem. I. Título


CDU 620.1(043)

JONAS FRANK REIS

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

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. EDSON COCCHIERI BOTELHO
UNESP/FEG


Dra. NATÁSSIA LONA BATISTA
UNESP/FEG


Prof. Dr. JOSÉ MARIA FERNANDES MARLET
EMBRAER

Agosto de 2016

DADOS CURRICULARES

JONAS FRANK REIS

NASCIMENTO 01.09.1989 – Guaratinguetá / SP

FILIAÇÃO Antônio Carlos Reis
Maria Teresa Frank Reis

2011/2013 Curso de Graduação (Tecnologia em Mecânica – Processos de Soldagem, Tecnólogo).
Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela minha vida, saúde e o bem de todos que fazem parte da minha história. Sem Deus não somos ninguém.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho* que deu a oportunidade de fazer parte de seu grupo tão incentivador e acolhedor. Sem a sua orientação, companheirismo e auxílio, o estudo apresentado seria quase impossível.

A minha co-orientadora, *Prof^a. Dr^a. Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão* que me incentivou em todos os momentos a prosseguir com meus estudos e sem sua presença como professora e amiga, não estaria nessa situação.

Aos meus pais *Carlinhos* e *Teresa*, que apesar das dificuldades, sempre apoiaram e incentivaram aos meus estudos.

Aos meus amigos do nosso grupo e funcionários da FEG e FATEC: Samia, Luiza, Natassia, Alberto; aos técnicos: Manoel, Odir, Flavio, Edilon e Wilson.

“É preciso escolher um caminho que não tenha fim, mas, ainda assim, caminhar sempre na expectativa de encontrá-lo”.

Geraldo Magela Amaral

RESUMO

Apesar da grande utilização dos compósitos termoplásticos na indústria aeronáutica, ainda existem diversos desafios relacionados à integração das partes constituintes de uma aeronave. Como alternativa para união destas peças, dentre os principais métodos de união disponíveis em compósitos termoplásticos, a soldagem vem sendo considerada a mais vantajosa. A soldagem por resistência elétrica aplicada a compósitos termoplásticos apresenta como principal característica um tempo menor de processamento em relação às outras técnicas de soldagem. No entanto, componentes que requerem exigências estruturais, quando expostos a ambientes agressivos como a umidade associada à temperatura, podem ter suas propriedades mecânicas reduzidas. Desta forma, este trabalho tem como principal objetivo avaliar a influência do condicionamento higrotérmico em amostras de compósito polimérico PEI/fibras de carbono soldados. Os parâmetros de soldagem (corrente, tempo e pressão) foram determinados realizando-se ensaios baseados na literatura. Para o desenvolvimento deste trabalho foi também empregado um método de soldagem por partes, cujo objetivo foi produzir juntas soldadas que pudessem se adequar aos ensaios realizados no estudo. A análise do processo de soldagem foi realizada a partir dos ensaios *Double Cantilever Beam* (DCB), Análise Termomecânica (TMA), *Lap Shear* e *End-Notched Flexure* (ENF), sendo realizada a análise da fratura após a realização dos ensaios mecânicos. Amostras soldadas foram também condicionadas em câmara higrotérmica. A partir deste condicionamento, foi observado que a absorção de umidade, tanto para amostras não soldadas como para as soldadas, apresenta o comportamento Fickiano. Quando considerados os resultados mecânicos obtidos das amostras condicionadas, como esperado, foi observada uma diminuição de algumas propriedades em até 40% devido, provavelmente, ao efeito da plasticização da matriz polimérica. Ainda, de acordo com os resultados de DCB, a adesão da malha metálica na região soldada é satisfatória, não havendo defeitos ou delaminações na junta soldada realizada pelo método de soldagem por partes.

PALAVRAS-CHAVE: Compósitos. PEI/fibra de carbono. Condicionamento Higrotérmico. Soldagem.

ABSTRACT

Despite widespread use of thermoplastic composite materials in the aerospace industry, there is a constant concern about the integration of the constituent parts of an aircraft. As an alternative to joining these parts, among the main union methods in thermoplastic composites, welding has been considered the most advantageous. The electrical resistance welding applied to thermoplastic composites has as its main characteristic a shorter processing time compared to other welding techniques. However, components requiring structural requirements, when exposed to aggressive environments such as moisture associated with temperature can have their reduced mechanical properties. Thus, this study has as main objective to evaluate the influence of hygrothermal conditioning in PEI/carbon fiber welded composite welded samples. Welding parameters (current, time and pressure) were determined by performing assays based on the literature. For the development of this work was also employed a welding method by parts, whose aim was to produce welded joints that could fit the tests performed in the study. The analysis of the welding process was performed from the Double Cantilever Beam (DCB), Thermomechanical Analysis (TMA), Lap Shear and End-Notched Flexure (ENF) tests, the analysis of the fracture being performed after completion of the mechanical tests. Welded samples were also conditioned on hygrothermal chamber. From this conditioning, it was observed that the moisture absorption, of welded and not welded samples, presented Fickian. When considering the mechanical results obtained from the conditioned samples, as expected, was observed a decrease in some properties by up to 40% due probably to the plasticizing effect of the polymer matrix. Also, according to the results of DCB, adhesion of the metal mesh in the welded area is satisfactory, with no defects or delamination in the welded joint welding method performed by parts.

KEYWORDS: Composites. PEI/carbon fiber. Hygrothermal conditioning. Welding.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fórmula estrutural do PEI.....	42
Figura 2 - Classificação dos processos de soldagem em compósitos termoplásticos.	45
Figura 3 - Ilustração de um sistema de soldagem por resistência elétrica para compósitos poliméricos.	47
Figura 4 - Os três modos de carregamento da trinca.	50
Figura 5 - Fluxograma apresentando o trabalho realizado.	60
Figura 6 - Laminado PEI/ fibra de carbono com código de identificação do fornecedor.	61
Figura 7 - Amostras dos laminados PEI/fibras de carbono dimensionadas para os ensaios em estudo.....	61
Figura 8 - Malha metálica nas dimensões de corte para utilização como elemento resistivo para a soldagem dos laminados.	62
Figura 9 - Representação esquemática da malha AI 304 de 300 <i>mesh</i> utilizada neste estudo.	63
Figura 10 - Equipamento de soldagem por resistência elétrica utilizado no presente trabalho	64
Figura 11 - Amostras do compósito PEI/fibra de carbono antes da soldagem para os testes em estudo.....	65
Figura 12 - Comparação com a antiga e a atual configuração do equipamento de soldagem.	65
Figura 13 - Detalhe da dimensão da amostra de <i>Lap Shear</i> e sua marcação para sua submissão ao processo de soldagem.	67
Figura 14 - Detalhe das dimensões da amostra utilizada no ensaio de <i>Double Cantilever Beam</i>	68
Figura 15 - Marcação das amostras nas regiões a serem unidas pelo processo de soldagem por resistência elétrica em corpos de prova para realização do ensaio de DCB.....	69
Figura 16 - Método de soldagem por partes realizada no material.	69
Figura 17 - Imagem dos materiais envolvidos na fixação e a amostra destinada ao ensaio de DCB.....	70
Figura 18 - Detalhe da dimensão da amostra utilizada no ensaio <i>End-Notched Flexure</i>	70
Figura 19 - Marcação das amostras nas regiões a serem unidas pelo processo de soldagem por resistência elétrica em compósitos para realização do ensaio ENF.....	71
Figura 20 - Equipamento termogravimétrico SII Exstar 6000.	72
Figura 21 - Equipamento termomecânico TMA/SS 6100.....	73
Figura 22 - Detalhe da amostra no momento da falha durante o ensaio <i>Lap Shear</i>	74
Figura 23 - Ensaio DCB para a medição da tenacidade à fratura interlaminar de compósitos.....	75

Figura 24 - Corpo de prova preso às garras da máquina de ensaio.	75
Figura 25 - Ensaio ENF para a medição da tenacidade à fratura interlaminar de compósitos.	77
Figura 26 - Imagem do ensaio ENF realizado.	78
Figura 27 - Microscópio Lupa Zeiss/Stemi 2000.	79
Figura 28 - Câmara do condicionamento higrotérmico.	80
Figura 29 - Esquema de uma amostra sendo exposta a um ambiente úmido.	82
Figura 30 - Gráfico de TGA obtido para o compósito PEI/fibra de carbono.	84
Figura 31 - (a) Morfologia do material soldado ampliada em 10x e (b) morfologia do material soldado ampliada em 20x.	87
Figura 32 - Morfologia da região da amostra em que as duas malhas se encontram (20x).	88
Figura 33 - Gráfico de TMA obtido para o compósito PEI/fibra de carbono.	89
Figura 34 - Ensaio DCB: Propagação da trinca no laminado.	92
Figura 35 - Ensaio DCB: (a) Imagem obtida no momento em que o material é solicitado na carga máxima de ruptura; (b) Micrografia da superfície da trinca no momento de aplicação da carga máxima de ruptura (20x).	93
Figura 36 - Abertura do modo I do laminado PEI/fibra de carbono submetido ao ensaio de DCB.	94
Figura 37 - Curva carga em função do deslocamento obtida a partir do ensaio de DCB para uma amostra de PEI/fibra de carbono.	95
Figura 38 - Resultados do ganho de massa em câmara de climatização.	97
Figura 39 - Avaliação dos parâmetros Fickianos no compósito não soldado e soldado.	99
Figura 40 - Avaliação de difusividade do ganho de massa em função da raiz do tempo para os laminados soldados e não soldados.	100
Figura 41 - Modos de falha comumente encontrados durante o ensaio de <i>Lap Shear</i> em compósitos: (a) intralaminar; (b) interfacial e (c) fratura.	105
Figura 42 - Microscopia, com ampliação de 20x, da região fraturada após a realização do ensaio mecânico de <i>Lap Shear</i> : (a) região entre a malha metálica e o polímero; (b) região da união entre a malha metálica e o polímero; (c) corpo de prova de um laminado PEI/fibra de carbono fraturado após o ensaio.	106
Figura 43 - Imagens morfológicas do PEI/fibra de carbono fraturado: (a) Micrografia da região fraturada após a realização do ensaio mecânico de <i>Lap Shear</i> (10x); (b) Micrografia da fratura intralaminar do ensaio de <i>Lap Shear</i> (20x).	107
Figura 44 - (a) Configuração da amostra do ensaio ENF; (b) Amostra soldada para a realização do ensaio ENF.	109

Figura 45 - Gráfico carga-deslocamento das amostras não condicionadas.	112
Figura 46 - Gráfico carga-deslocamento das amostras condicionadas.....	112
Figura 47 – Morfologia da propagação da trinca no laminado soldado submetido a forças de cisalhamento: (a) ampliação em 5x; (b) ampliação em 20x.	114
Figura 48 - Propagação da trinca no laminado soldado no momento da fratura: (a) ampliação de 10x e (b) ampliação de 20x.....	115
Figura 49 – Morfologia dos laminados PEI/carbono condicionados (10x), com o surgimento de microtrincas.	116
Figura 50 - Morfologia da propagação de trincas no laminado soldado condicionado: (a) ampliação de 5x; (b) ampliação de 10x.....	117
Figura 51 - Ensaio ENF realizado no compósito PEI/fibra de carbono: (a) crescimento inicial da trinca; (b) crescimento contínuo da trinca da ruptura; (c) detalhe aproximado da trinca antes da ruptura; (d) ruptura do material.	119
Figura 52 - Propagação de falha da trinca no laminado soldado ao nível macroscópico.....	120
Figura 53 - Análise morfológica do laminado soldado não condicionado, indicando o caminho de propagação da trinca, com ampliação de 5x.....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composições dos materiais presentes nas principais aeronaves em peso por porcentagem.....	37
Tabela 2 – Algumas propriedades das principais matrizes termoplásticas utilizadas em aplicações aeronáuticas.....	43
Tabela 3 - Trabalhos desenvolvidos com soldagem por resistência elétrica para o modo II (cisalhamento) da tenacidade à fratura interlaminar.....	55
Tabela 4 - Dimensões da malha metálica AI 304 de 300 <i>mesh</i>	63
Tabela 5 - Composição química da malha do aço utilizado.	63
Tabela 6 - Parâmetros utilizados no presente trabalho com base nos parâmetros otimizados.	66
Tabela 7 - Ensaio que foram realizados após a climatização e as quantidades das amostras utilizadas em cada caso.....	80
Tabela 8 - Ensaio preliminares para determinação dos valores para soldagem do laminado PEI/fibra de carbono.	86
Tabela 9 – Comparação entre os valores de temperatura de transição vítrea obtida neste trabalho a partir do TMA, e disponíveis em literatura.	90
Tabela 10 - Coeficiente de difusão e valores de n e k para os laminados PEI/carbono.	100
Tabela 11 - Valores obtidos de <i>Lap Shear</i> para compósitos PEI/fibra de carbono soldados.	103
Tabela 12 - Principais valores de <i>Lap Shear</i> encontrados na literatura para laminados de PEI/fibra de carbono soldados por resistência elétrica.	104
Tabela 13 - Resultados obtidos a partir do ensaio de ENF para o laminado PEI/fibra de carbono soldado.	110
Tabela 14 - Valores de tenacidade à fratura interlaminar para laminados não soldados.....	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PEI	Polieterimida
PEEK	Poli (éter-éter cetona)
PEKK	Poli (éter cetona-cetona)
PPS	Poli (sulfeto de fenileno)
TGA	Análise Termogravimétrica
TMA	Análise Termomecânica
DCB	<i>Double Cantilever Beam</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
MPa	Megapascal
s	Segundos
A	<i>Ampères</i>
T_g	Temperatura de transição vítrea
kJ	Quilo Joule
J	Joule
N	Newton
m	Metros
mm	Milímetro
kW	Quilo Watts

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	31
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	31
1.2	OBJETIVOS.....	33
1.3	METODOLOGIA DO TRABALHO	33
2	REVISÃO DA LITERATURA	35
2.1	COMPÓSITOS APLICADOS NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA.....	35
2.2	COMPÓSITOS DE FIBRAS DE CARBONO	38
2.3	COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS	41
2.3.1	A matriz polieterimida (PEI)	41
2.3	TÉCNICAS DE SOLDAGEM.....	44
2.3.1	Soldagem por resistência elétrica para compósitos	45
2.4	MODOS DE FRATURA	49
2.5	COMPORTAMENTO DA FRATURA PARA COMPÓSITOS	50
2.6	EFEITOS AMBIENTAIS	55
3	MATERIAIS E MÉTODOS	60
3.1	LAMINADO	60
3.2	MALHA METÁLICA.....	62
3.3	PROCESSO DE SOLDAGEM	63
3.3.1	Descrição do processo	64
3.3.2	Condições de soldagem	66
3.3.3	Segurança da soldadora	66
3.4	PREPARO E SOLDAGEM DAS AMOSTRAS	67
3.4.1	Amostras para o ensaio de <i>Lap Shear</i>	67
3.4.2	Amostras para o ensaio de <i>Double Cantilever Beam (DCB)</i>	67
3.4.3	Amostras para o ensaio de <i>End-Notched Flexure (ENF)</i>	70
3.5	ANÁLISES TÉRMICAS	71
3.5.1	Análise termogravimétrica (TGA)	71
3.5.2	Análise termomecânica (TMA)	72
3.6	ENSAIOS MECÂNICOS	73
3.6.1	<i>Lap Shear</i>	73
3.6.2	<i>Double Cantilever Beam (DCB)</i>	74
3.6.3	<i>End-Notched Flexure (ENF)</i>	76

3.7	ANÁLISE MORFOLÓGICA.....	78
3.7.1	Microscopia óptica	78
3.8	CONDICIONAMENTO HIGROTÉRMICO.....	79
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	83
4.1	ANÁLISES TÉRMICAS	83
4.1.1	Análise Termogravimétrica (TGA)	83
4.2	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS E MÉTODO DE SOLDAGEM PARA OS LAMINADOS.....	84
4.2.1	Processo de soldagem por resistência elétrica	85
4.2.2	Análise morfológica preliminar da junta	86
4.2.3	Análise Termomecânica (TMA)	88
4.2.4	Análise qualitativa da soldagem a partir do ensaio DCB	91
4.3	CONDICIONAMENTO HIGROTÉRMICO.....	95
4.4	ANÁLISES MECÂNICAS	102
4.4.1	<i>Lap Shear</i>	102
4.4.1.1	Análise da fratura do ensaio de <i>Lap Shear</i>	105
4.4.2	Avaliação da soldagem a partir do ensaio ENF	107
5	CONCLUSÃO	122
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	124
5.3	PRODUÇÃO CIENTÍFICA GERADA	124
	REFERÊNCIAS	125
	APÊNDICES	133
	ANEXO	139

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Atualmente, a utilização de compósitos termoplásticos reforçados com fibras contínuas, principalmente quando fibras de carbono são consideradas como elemento de reforço, vem ganhando grande destaque devido ao avanço tecnológico conquistado pelas indústrias da área aeroespacial. Muitos componentes destinados à indústria aeronáutica, que anteriormente utilizavam compósitos com matriz termorrígida, vêm sendo substituídos por aqueles que apresentam matriz termoplástica, devido às melhores propriedades obtidas, possibilidade de reaproveitamento e reparo do mesmo e a facilidade na fabricação de peças grandes e complexas (CHEN et al., 2013, ABRAHÃO, 2015).

Em virtude dessas qualidades dos termoplásticos, eles são integrados para formar o componente desejado, com temperatura de serviço mais elevada e grande versatilidade na produção em grande escala, exibindo propriedades mecânicas iguais ou superiores às apresentadas pelos compósitos termorrígidos (ANDRIYANA; BILLON; SILVA, 2010; MAZUR et al., 2008; REZENDE, 2007).

Entretanto, apesar da crescente utilização destes materiais na indústria aeronáutica, atualmente existe uma constante preocupação sobre a integração das diversas partes constituintes de uma aeronave. Dentre os principais métodos de união em compósitos termoplásticos, a soldagem vem sendo considerada a mais vantajosa para a união desses materiais, em virtude de contribuir positivamente para a relação custo/benefício na produção e para a união de compósitos termoplásticos, sendo, portanto, considerada como o processo mais atraente para a união destes materiais (ABRAHÃO, 2015; STAVROV; BERSEE, 2005).

Dentre as diversas técnicas de soldagem atualmente utilizadas para compósitos, a soldagem por resistência elétrica vem se destacando, principalmente por proporcionar economia de material, pois não necessita de consumíveis de soldagem ou meios auxiliares para a união, descarta o uso de rebites, parafusos, porcas, e também não necessita de serviços de usinagem, além de poder ser utilizada na união de peças com arquitetura complexa (ABRAHÃO, 2015).

No entanto, os efeitos ambientais devem ser considerados nos projetos de laminados estruturais, e uma vez que estes efeitos geralmente agem na interface das camadas constituintes de um compósito, é necessária uma atenção especial destes sobre

materiais soldados. Dentro deste cenário, os principais ataques ambientais, que geralmente incidem em estruturas aeronáuticas, estão relacionados com a temperatura, umidade, radiação ultravioleta e/ou o contato com vários tipos de produtos químicos. Componentes soldados ou que possuem danos são geralmente expostos a esses efeitos ambientais, podendo ocorrer um aumento significativo da degradação de suas propriedades físicas e mecânicas (REZENDE, 2007; SELZER; FRIEDRICH, 1997).

Os fatores ambientais tais como umidade e temperatura podem limitar as aplicações dos compósitos por uma deterioração das propriedades mecânicas ao longo de um período de tempo. Estes efeitos, dependendo do tempo de exposição, podem causar a degradação das propriedades mecânicas e térmicas, principalmente sua vida em fadiga e condições de transição vítrea. Os fatores ambientais desempenham um papel importante durante o passo de fabricação e o ciclo de vida do compósito (FARIA; CIOFFI; BOTELHO, 2012; YILMAZ; SINMAZCELIK, 2010).

A aplicação de materiais compósitos, principalmente nas indústrias aeroespaciais e automobilísticas, leva ao aumento das investigações sobre o comportamento de fratura dos compósitos, e quando associado a materiais soldados e aplicados em ambientes com elevada incidência do intemperismo, esta avaliação fica ainda mais crítica. Uma das propriedades mecânicas mais importantes relacionadas a compósitos poliméricos estruturais é a sua resistência ao início da propagação de trincas, podendo gerar o efeito de delaminação. A delaminação pode induzir a redução significativa da rigidez, conduzindo a falhas prematuras de um determinado componente. Esta delaminação pode ser vista como um fenômeno de propagação da trinca, justificando, assim, uma aplicação típica do conceito de mecânica da fratura. Neste contexto, a caracterização da fratura interlaminar de compósitos adquire uma notável relevância (KARSLI; AYTAC, 2013; SHOKRIEH; SALAMAT-TALAB; HEIDARI-RARANI, 2014).

Os materiais compósitos em uso prático podem estar sujeitos a uma grande variedade de condições de carga diferentes, sendo que as condições mais importantes são as tensões mecânicas e os ataques ambientais. Na indústria aeronáutica, os principais danos são causados de diversas formas como descontinuidades das fibras, porosidade, delaminações, áreas pobres ou ricas em resina ou em operações que envolvam abrasão, erosão, impacto de granizo, pedras e pássaros. Os danos nem sempre são visíveis, entretanto podem reduzir a resistência do componente estrutural significativamente (KIM; YE, 2004; REZENDE, 2007).

Nos últimos anos, as aplicações bem-sucedidas de compósitos de matriz termoplástica em componentes estruturais de aeronaves têm estimulado um interesse significativo nos efeitos da temperatura ambiente sobre o comportamento da delaminação. As propriedades mecânicas dos compósitos de matriz polimérica podem ser degradadas por uma série de efeitos físicos e químicos, portanto, é de suma importância entender tanto o material quanto o ambiente operacional a que este se encontra exposto. A temperatura ambiente afeta consideravelmente o modo I e II da tenacidade à fratura interlaminar, GIC e GIIC, em compósitos de matriz termoplástica (BISMARCK; HOFMEIER; DÖRNER, 2007; KIM; YE, 2004).

5. CONCLUSÃO

Baseando-se nos resultados encontrados neste trabalho, são apresentadas as seguintes conclusões:

O processo de soldagem por resistência elétrica pode ser utilizado com sucesso a partir das condições dos parâmetros assim como o método de soldagem por partes utilizado nesta dissertação. A partir dos resultados obtidos, tanto do ensaio por DCB como das análises morfológicas, pode ser concluído que a adesão da malha metálica na região soldada é satisfatória, evidenciando-se que o método de soldagem por partes é eficiente.

A janela de processamento que pode ser utilizada para a realizada da soldagem por resistência elétrica para compósitos de PEI/fibras de carbono é de 160 a 450°C. Esta conclusão encontra-se baseada nas temperaturas de transição vítrea e degradação da matriz polimérica, obtidas a partir das análises de TMA e TGA.

Os ensaios mecânicos de *Lap Shear e End-Notched Flexure (ENF)* realizados no compósito PEI/fibra de carbono, auxiliaram para a conclusão de que o processo de soldagem foi realizado com sucesso, uma vez que foram obtidos valores máximos de ruptura a forças de tração e cisalhamento com valores similares aqueles disponíveis em literatura.

Para laminados soldados e não condicionados, a média dos valores de ruptura encontrada no estudo a partir do ensaio de *Lap Shear* foi de 20,4 MPa, enquanto na literatura encontra-se valores ruptura de *Lap Shear* entre 15 – 34 MPa. A média dos valores da tenacidade à fratura interlaminar do modo II (cisalhamento no plano) encontrados no estudo (1697,3 J/m²) também foi similar a valores disponíveis em literatura (670 – 1862 J/m²).

A partir da análise morfológica dos laminados soldados após esses ensaios, observa-se que o tipo de falha obtido pelo ensaio *Lap Shear* é do tipo intralaminar, com o rompimento do elemento de aquecimento. Já para a análise morfológica de laminados fraturados após a realização do ensaio ENF, a trinca se propaga em direção do plano dos laminados unidos adjacentes ao elemento resistivo.

Quando condicionados em câmara higrotérmica durante um período de 1775 horas, o laminado PEI/fibra de carbono soldado apresenta uma absorção máxima de umidade próxima a 0,55%, sendo esse um valor muito elevado se comparado aos valores disponíveis em literatura para os compósitos de PEI/fibra de carbono, PPS/fibra

de carbono e PPS/fibra de vidro. Para o laminado PEI/fibra de carbono não soldado obtém-se uma absorção máxima superior a 0,58%, isso se deve ao fato de que a variação na absorção de umidade encontra-se relacionada com a soldagem realizada no laminado.

As amostras dos laminados PEI/fibras de carbono soldados e não soldados quando submetidas ao condicionamento higrotérmico apresentaram um comportamento Fickiano. As amostras não soldadas apresentam maiores valores de tendência à absorção de umidade se comparados às amostras soldadas, isso se deve ao fato da presença da malha metálica presente na união dos laminados, que pode agir como uma espécie de filtro para a passagem da umidade na região de absorção da junta.

A influência da umidade absorvida na degradação das propriedades mecânicas dos laminados soldados pode ser observada nos resultados de *Lap Shear*, uma vez que é observada uma redução desta propriedade em materiais expostos ao condicionamento higrotérmico.

O valor da energia crítica necessária para se propagar a trinca em Modo II para os laminados PEI/fibra de carbono soldados condicionados higrotermicamente é reduzido em comparação aos laminados não condicionados. Essa redução na resistência é proveniente da absorção de umidade pelo material, facilitando a ação da capilaridade, provocando, assim, o aumento do fluxo de umidade através da presença de microtrincas, poros e vazios pela interface fibra/matriz.

A partir da análise morfológica da região de fratura gerada pelo ensaio de ENF, o laminado apresenta diversas microtrincas que se propagam nas camadas entre as fibras e a matriz, sendo essa propagação um resultado da movimentação da trinca macroscópica, que está relacionada com o modo II de tenacidade à fratura, com a redução do valor dessa resistência, devido à absorção da umidade, trinca macroscópica se propagou facilmente, aumentando-se a presença de microtrincas, poros e vazios, com o maior aumento no fluxo de umidade.

REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, A.B.R.M. **Otimização do processo de soldagem por resistência elétrica em compósitos PEI/fibras contínuas para aplicações aeronáuticas**. 2015. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.
- AGEORGES, C. et al. Characteristics of resistance welding of lap shear coupons. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 29, n. 8, p. 911–919, 1998.
- AGEORGES, C. Experimental investigation of the resistance welding of thermoplastic-matrix composites. Part II: optimum processing window and mechanical performance. **Composites Science and Technology**, v. 60, n. 8, p. 1191–1202, 2000.
- AGEORGES, C.; YE, L. Resistance welding of thermosetting composite / thermoplastic composite joints. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 32, n. 2001, p. 1603–1612, 2006.
- AGEORGES, C.; YE, L.; HOU, M. Experimental investigation of the resistance welding for thermoplastic-matrix composites. Part I: heating element and heat transfer. **Composites Science and Technology**, v. 60, n. 7, p. 1027–1039, 2000.
- ANDRIYANA, A.; BILLON, N.; SILVA, L. Mechanical response of a short fiber-reinforced thermoplastic: Experimental investigation and continuum mechanical modeling. **European Journal of Mechanics, A/Solids**, v. 29, n. 6, p. 1065–1077, 2010.
- ARICI, A. A. Effect of Hygrothermal Aging on Polyetherimide Composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 26, n. 18, p. 1937–1942, 2007.
- ARRESE, A. et al. A new method for determining mode II R-curve by the End-Notched Flexure test. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 77, n. 1, p. 51–70, 2010.
- ASP, L. E. The effects of moisture and temperature on the interlaminar delamination toughness of a carbon/epoxy composite. **Composites Science and Technology**, v. 58, n. 6, p. 967–977, 1998.
- BALEY, C. et al. Application of Interlaminar Tests to Marine Composites. A Literature Review. **Applied Composite Materials**, v. 11, n. 2, p. 99–126, 2004.
- BISMARCK, A.; HOFMEIER, M.; DÖRNER, G. Effect of hot water immersion on the performance of carbon reinforced unidirectional poly(ether ether ketone) (PEEK) composites: Stress rupture under end-loaded bending. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, n. 2, p. 407–426, 2007.
- BOTELHO, E. C.; PARDINI, L. C.; REZENDE, M. C. Evaluation of hygrothermal effects on the shear properties of Carall composites. **Materials Science and Engineering A**, v. 452-453, p. 292–301, 2007.

BOTELHO, E. C.; REZENDE, M. C. Caracterização Mecânica de Compósitos de Poliamida/Fibra de Carbono Via Ensaio de Cisalhamento Interlaminar e de Mecânica da Fratura. **Polímeros**, v. 12, n. 3, p. 153–163, 2002.

CALLISTER, JR. W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 817 p.

CAMPOS, K. A. **Avaliação do comportamento de superfícies de fratura por fractais mistos em materiais de diferentes classes**. 2014. 134 f. (Doutorado em Engenharia Mecânica - Materiais) - Faculdade de Engenharia do Campus Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

CÂNDIDO, G. M. **Influência do Condicionamento Ambiental na Resistência à Delaminação de Borda Livre em Compósitos Avançados**. 2001. 200 f. Tese (Doutorado em Ciência – Tecnologia de Fabricação) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2001.

CÂNDIDO, G. M. et al. Fractografia de compósito estrutural aeronáutico submetido à caracterização de tenacidade à fratura interlaminar em modo I. **Polímeros**, v. 22, n. 1, p. 41–53, 2012.

CHEN, Q. et al. Fabrication and mechanical properties of hybrid multi-scale epoxy composites reinforced with conventional carbon fiber fabrics surface-attached with electrospun carbon nanofiber mats. **Composites Part B: Engineering**, v. 44, n. 1, p. 1–7, 2013.

CHOI, H. Y.; CHANG, F. K. A model for predicting damage in graphite/epoxy laminated composites resulting from low-velocity point impact, **J Compos Mater**, v. 26, p. 2134 – 2169, 1992.

CONEJO, L. D. S. **Obtenção e caracterização térmica de compósitos nanoestruturados de resina fenol-furfurílica/cnt**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

COSTA, A. P. **Efeito do condicionamento ambiental em compósitos soldados de PPS/fibras contínuas**. 2011. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Materiais) - Faculdade de Engenharia do Campus Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

COSTA, A. P.; BOTELHO, E. C.; PARDINI, L. C. Efeito da degradação ambiental nas propriedades de cisalhamento de compósitos PPS/fibra de carbono. **Polímeros**, v. 21, n. 3, p. 161–167, 2011.

DAMATO, C. A. **Efeito do condicionamento ambiental nas propriedades de cisalhamento e viscoelásticas de compósitos híbridos metal-fibra**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

DANDY, L. O. et al. Counting carbon fibres by electrical resistance measurement. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 68, p. 276–281, 2015.

DE BAERE, I. et al. Study of the mode I and mode II interlaminar behaviour of a carbon fabric reinforced thermoplastic. **Polymer Testing**, v. 31, n. 2, p. 322–332, 2012.

DE GREEF, N. et al. Direct growth of carbon nanotubes on carbon fibers: Effect of the CVD parameters on the degradation of mechanical properties of carbon fibers. **Diamond and Related Materials**, v. 51, p. 39–48, 2015.

DE MOURA, M. F. S. F. Interlaminar Mode II Fracture Characterization. **Delamination Behaviour of Composites**, p. 310–326, 2008.

DE OLIVEIRA, P. H. F. et al. Feasibility Study of the Friction Spot Welding (FSpW) Process in Thermoplastics. **Soldagem & Inspecao**, v. 17, n. 2, p. 96–103, 2012.

DENG, S. et al. Thermoplastic–epoxy interactions and their potential applications in joining composite structures – A review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 68, p. 121–132, 2015.

EARL, J. S.; SHENOI, R. A. Hygrothermal ageing effects on FRP laminate and structural foam materials. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 35, n. 11, p. 1237–1247, 2004.

FARIA, M. C. M. **Avaliação do efeito higrotérmico nas propriedades mecânicas de compósitos de pps/fibras contínuas**. 2008. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Materiais) - Faculdade de Engenharia do Campus Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

FARIA, M. C. M. DE; CIOFFI, M. O. H.; BOTELHO, E. C. Análise do efeito higrotérmico no comportamento em fadiga de compósitos de PPS/fibras de carbono. **Polímeros**, v. 22, n. 1, p. 7–12, 2012.

FERNANDEZ VILLEGAS, I.; VIZCAINO RUBIO, P. On avoiding thermal degradation during welding of high-performance thermoplastic composites to thermoset composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 77, p. 172–180, 2015.

FILHO, S. T. Rebitagem por fricção (“FricRiveting”). Desenvolvimento de uma nova técnica de união para juntas híbridas do tipo polímero-metal. Parte I: Processo e Microestrutura. **Soldagem e Inspeção**, v. 55, n. 4, p. 387–395, 2011.

GREENHALGH, E. S. **Failure analysis and fractography of polymer composites**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009. 595 p.

HARPER, C. A. **Handbook of plastics, elastomers and composites**. 3^o ed. New York: Mac graw - Hill, 1996. 757 p.

HOU, M.; FRIEDRICH, K. Resistance welding of continuous glass fibre-reinforced polypropylene composites. **Composites Manufacturing**, v. 3, n. 3, p. 153–163, 1992.

HOU, M. Resistance welding of carbon fibre reinforced thermoplastic composite using alternative heating element. **Composite Structures**, v. 47, n. 1-4, p. 667–672, 1999.

HOU, M. et al. Resistance welding of carbon fibre reinforced thermoplastic composite using alternative heating element. **Composite Structures**, v. 47, n. 1999, p. 667–672, 1999.

HOU, M.; FRIEDRICH, K. Resistance welding of continuous glass fibre-reinforced polypropylene composites. **Composites Manufacturing**, v. 3, n. 3, p. 153–163, 1992.

HULL, D. **Fractography: observing, measuring, and interpreting fracture surface topography**. 2^o ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 326p

JIANG, X. et al. Effects of hygrothermal aging on glass-fibre reinforced polymer laminates and adhesive of FRP composite bridge: Moisture diffusion characteristics. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 57, p. 49–58, 2014.

KAPPMAYER, G. et al. Modern machining of advanced aerospace alloys-Enabler for quality and performance. **Procedia CIRP**, v. 1, n. 1, p. 28–43, 2012.

KARSLI, N. G.; AYTAC, A. Tensile and thermomechanical properties of short carbon fiber reinforced polyamide 6 composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 51, p. 270–275, 2013.

KIM, K. Y.; YE, L. Interlaminar fracture toughness of CF/PEI composites at elevated temperatures: Roles of matrix toughness and fibre/matrix adhesion. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 35, n. 4, p. 477–487, 2004.

KLOCKE, F. et al. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 64, p. 581–604, 2015.

KOSTAGIANNAKOPOULOU, C. et al. On the interlaminar fracture toughness of carbon fiber composites enhanced with graphene nano-species. **Composites Science and Technology**, v. 118, p. 217–225, 2015.

LABRANDERO, S.D. **Characterization of metallic meshes used for resistance welding of thermoplastic composites**. Monografía de conclusão de curso. Faculty of aerospace engineering design and production of composite structures. Universidad carlos iii de madrid, 2009.

LEE, S. Mode II delamination failure mechanisms of polymer matrix composites. **Journal of materials science**, v. 2, p. 1287–1295, 1997a.

LEE, S. Mode II delamination failure mechanisms of polymer matrix composites. **Journal of Materials Science**, v. 32, n. 5, p. 1287–1295, 1997b.

- LI, J.; CAI, C. L. The carbon fiber surface treatment and addition of PA6 on tensile properties of ABS composites. **Current Applied Physics**, v. 11, n. 1, p. 50–54, 2011.
- LIU, W. B. et al. Properties of carbon fiber sized with poly(phthalazinone ether ketone) resin. **Journal of Applied Polymer Science**, p. 3702–3709, 2012.
- LIU, Y. et al. Applied Surface Science Structure and corrosion behavior of sputter deposited cerium oxide based coatings with various thickness on Al 2024-T3 alloy substrates. **Applied Surface Science**, v. 355, p. 805–813, 2015.
- M'SAOUBI, R. et al. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 64, n. 2, p. 557–580, 2015.
- MARQUES, L. S. et al. Avaliação dos comportamentos mecânico e térmico de laminados de PPS/fibra de carbono processados em autoclave sob diferentes ciclos de consolidação. **Polímeros**, v. 20, n. 4, p. 309–314, 2010.
- MATHEWS, M. J.; SWANSON, S. R. Characterization of the interlaminar fracture toughness of a laminated carbon/epoxy composite. **Composites Science and Technology**, v. 67, n. 7-8, p. 1489–1498, 2007.
- MAYER, S.; CÂNDIDO, G. M.; REZENDE, M. C. Influência do condicionamento ambiental na resistência à tração de compósitos de carbono/epóxi reparados. **Polímeros**, v. 13, n. 3, p. 147–153, 2003.
- MAZUR, R. L. et al. Avaliações térmica e reológica da matriz termoplástica PEKK utilizada em compósitos aeronáuticos. **Polímeros**, v. 18, n. 3, p. 237–243, 2008.
- MEYERS, M. A; CHAWLA, K. K. **Princípios de metalurgia mecânica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1982. 505p.
- MOREIRA, A. et al. Avaliação dos parâmetros tempo , corrente e pressão na soldagem por resistência elétrica de compósitos PEI / fibras contínuas : influência na resistência mecânica . p. 530–543, 2015.
- MOURA, M. F. S. F.; MORAIS, A. B.; MAGALHÃES, A. G. **Materiais compósitos – materiais, fabrico e comportamento mecânico**. Porto: Publindústria, 2005. 369 p.
- NETO, L. F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 313p.
- NIE, W. et al. Decomposition of waste carbon fiber reinforced epoxy resin composites in molten potassium hydroxide. **Polymer Degradation and Stability**, v. 111, p. 247–256, 2015.
- NINO, G. F. et al. Thermal NDI of resistance welded composite structures. **Composites Part B: Engineering**, v. 40, n. 3, p. 237–248, 2009.

O'BRIEN, K. Characterization , Analysis and Prediction of Delamination in Composites Using Fracture Mechanics. **Characterization, analysis and Prediction of Delamination in Composites Using Fracture Mechanics**, p. 1–6, 2001.

OLIVEIRA, G. H.; GUIMARÃES, V. A.; BOTELHO, E. C. Influência da temperatura no desempenho mecânico de compósitos PEI/fibras de vidro. **Polímeros**, v. 19, n. 4, p. 305–312, 2009.

OUYANG, Z.; LI, G. Nonlinear interface shear fracture of end notched flexure specimens. **International Journal of Solids and Structures**, v. 46, n. 13, p. 2659–2668, 2009.

PAIVA, J. M. F. DE et al. Avaliação da temperatura de transição vítrea de compósitos poliméricos reparados de uso aeronáutico. **Polímeros**, v. 16, n. 1, p. 79–87, 2006.

PANNEERSELVAM, K.; ARAVINDAN, S.; NOORUL HAQ, A. Study on resistance welding of glass fiber reinforced thermoplastic composites. **Materials & Design**, v. 41, p. 453–459, 2012.

PAPPADÀ, S. et al. Fabrication of a thermoplastic matrix composite stiffened panel by induction welding. **Aerospace Science and Technology**, v. 43, p. 314–320, 2015.

PARLEVLIT, P. P.; BERSEE, H. E. N.; BEUKERS, A. Residual stresses in thermoplastic composites - a study of the literature. Part III: Effects of thermal residual stresses. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, n. 6, p. 1581–1596, 2007.

PIMENTA, S.; PINHO, S. T. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. **Waste Management**, v. 31, n. 2, p. 378–392, 2011.

PRESEZNIAK, F. A. **Identificação de danos e determinação da vida útil em estruturas usando transformada wavelet e conceitos de mecânica da fratura**. 2007. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná do Campus de Curitiba, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

RAZEIRA, I. A. T. **Fibras lignocelulósicas como agente de reforço de compósitos de matriz fenólica e lignofenólica**. 2006. 167 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

REZENDE, M. C. Fractografia de Compósitos Estruturais. **Polímeros**, v. 17, n. 3, p. E4–E11, 2007.

REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros**, v. 10, n. 2, 2000.

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

SALLEH, W. N. W. et al. Precursor Selection and Process Conditions in the Preparation of Carbon Membrane for Gas Separation: A Review. **Separation & Purification Reviews**, v. 40, n. 4, p. 261–311, 2011.

SELZER, R.; FRIEDRICH, K. Mechanical properties and failure behaviour of carbon fibre-reinforced polymer composites under the influence of moisture. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 28, n. 6, p. 595–604, 1997.

SHARMA, M.; RAO, I. M.; BIJWE, J. Influence of orientation of long fibers in carbon fiber-polyetherimide composites on mechanical and tribological properties. **Wear**, v. 267, n. 5-8, p. 839–845, 2009.

SHI, H.; VILLEGAS, I. F.; BERSEE, H. E. N. Strength and failure modes in resistance welded thermoplastic composite joints: Effect of fibre-matrix adhesion and fibre orientation. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 55, p. 1–10, 2013.

SHOKRIEH, M. M.; HEIDARI-RARANI, M.; AYATOLLAHI, M. R. Calculation of GI for a multidirectional composite double cantilever beam on two-parametric elastic foundation. **Aerospace Science and Technology**, v. 15, n. 7, p. 534–543, 2011.

SHOKRIEH, M. M.; SALAMAT-TALAB, M.; HEIDARI-RARANI, M. Effect of initial crack length on the measured bridging law of unidirectional E-glass/epoxy double cantilever beam specimens. **Materials and Design**, v. 55, p. 605–611, 2014.

SOUZA, S.D.B. **Avaliação dos parâmetros de soldagem por resistência para compósitos de pps/fibras contínuas com aplicações aeronáuticas**. 2015. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

STAVROV, D.; BERSEE, H. E. N. Resistance welding of thermoplastic composites-an overview. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 36, n. 1, p. 39–54, 2005.

SUN, C. T.; ZHENG, S. Delamination characteristics of double-cantilever beam and end-notched flexure composite specimens. **Composites Science and Technology**, v. 56, n. 4, p. 451–459, 1996.

TIWARI, S.; BIJWE, J.; PANIER, S. Polyetherimide composites with gamma irradiated carbon fabric: Studies on abrasive wear. **Wear**, v. 270, n. 9-10, p. 688–694, 2011.

VALOROSO, N. et al. Identification of mode-I cohesive parameters for bonded interfaces based on DCB test. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 104, p. 56–79, 2013.

VAN INGEN, J. W. et al. Development of the Gulfstream G650 Induction Welded Thermoplastic Elevators And Rudder. **SAMPE Conference and Exhibition**, n. December 2009, 2010.

WANG, W.-X. et al. Experimental investigation on test methods for mode II interlaminar fracture testing of carbon fiber reinforced composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 40, n. 9, p. 1447–1455, 2009.

WISE, R.J. **Thermal Welding of polymers**. Cambridge, Woodhead Publishing Limited, 1999.

YANN, R. et al. Anisotropy of hygrothermal damage in fiber/polymer composites: Effective elasticity measures and estimates. **Mechanics of Materials**, v. 38, n. 12, p. 1143–1158, 2006.

YILMAZ, T.; SINMAZCELIK, T. Effects of hydrothermal aging on glass-fiber/polyetherimide (PEI) composites. **Journal of Materials Science**, v. 45, n. 2, p. 399–404, 2010.

YIM, Y.-J.; RHEE, K. Y.; PARK, S.-J. Influence of electroless nickel-plating on fracture toughness of pitch-based carbon fibre reinforced composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 76, p. 286–291, 2015.

YOUSEFPOUR, A.; HOJJATI, M.; IMMARIGEON, J.-P. Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 17, n. 4, p. 303–341, 2004.

YUAN, Q. et al. Resistance Welding of Carbon Fiber Reinforced Polyetherimide Composit. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 14, n. 1, p. 2–19, 2001.

ZENASNI, R. et al. Hygrothermal aging effect on the Interlaminar fracture of woven fabric fibre/PEI composite material. **Science and Engineering of Composite Materials**, v. 11, n. 4, p. 225–230, 2004.

ZENASNI, R. Effect of Hygrothermomechanical Aging on the Interlaminar Fracture Behavior of Woven Fabric Fiber/PEI Composite Materials. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 19, n. 4, p. 385–398, 2006.

ZHANG, B. et al. Preparation and characterization of carbon and carbon/zeolite membranes from ODPA–ODA type polyetherimide. **Journal of Membrane Science**, v. 474, p. 114–121, 2015.