

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**DESENVOLVIMENTO DE SOLDAGEM PARA
ALUMÍNIO 2024 E COMPÓSITO PEI-FIBRA
DE VIDRO PELO PROCESSO OXI-
ACETILENO**

Fábio Henrique Campos Bernardes

**Pindamonhangaba - SP
2018**

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**DESENVOLVIMENTO DE SOLDAGEM PARA
ALUMÍNIO 2024 E COMPÓSITO PEI-FIBRA
DE VIDRO PELO PROCESSO OXI-
ACETILENO**

Fábio Henrique Campos Bernardes

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba para
graduação, no Curso Superior de
Tecnologia em Processos de Soldagem.

Área de Concentração: Soldagem de Materiais
Dissimilares.

Orientador (a): Prof.^a Dr. Ana Beatriz Ramos
Moreira Abrahão

Co orientador: Carlos Eduardo Figueiredo dos
Santos

**Pindamonhangaba - SP
2018**

B522d

Bernardes, Fábio Henrique Campos.

Desenvolvimento de soldagem para alumínio 2024 e compósito PEI-fibra de vidro pelo processo oxiacetileno / Fábio Henrique Campos Bernardes / FATEC Pindamonhangaba, 2018.
31f.: il.

Orientadora Prof.^a Dr.^a Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão
Co-orientador: Prof. Me. Carlos Eduardo F. dos Santos
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia .de Pindamonhangaba. 2018

1. Soldagem oxiacetileno. 2. Alumínio AA2024. 3. PEI- Fibra de vidro. 4. Materiais dissimilares. I. Bernardes, Fábio Henrique Campos. II. Abrahão, Ana Beatriz Ramos Moreira. III. Santos, Carlos Eduardo Figueiredo dos. IV. Título.

CDD 621

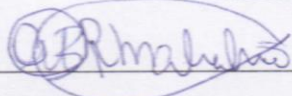
Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**DESENVOLVIMENTO DE SOLDAGEM PARA
ALUMÍNIO 2024 E COMPÓSITO PEI-FIBRA DE
VIDRO PELO PROCESSO OXI-ACETILENO**

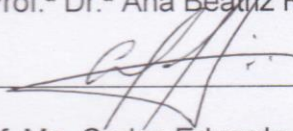
FÁBIO HENRIQUE CAMPOS BERNARDES

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba, para
graduação no Curso Superior de
Tecnologia em Mecânica – Processos de
Soldagem.

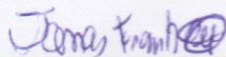
Comissão Examinadora



Orientadora – Prof.^a Dr.^a Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão



Membro – Prof. Me. Carlos Eduardo Figueiredo dos Santos



Membro – Me. Jonas Frank Reis

Pindamonhangaba, 12 de julho de 2018.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a deus, aos meus pais, avós e familiares pelo apoio. Especialmente ao meu avô Vantuir Bernardes (In Memória).

Agradeço especialmente a Prof.^a Dr.^a Ana Beatriz R. M. Abrahão que confiou e acreditou no meu potencial para desenvolver esse trabalho de graduação com qualidade e eficiência.

E a todos os professores e colegas de classe que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

“Se enxerguei mais longe, foi por estar apoiado nos ombros de gigantes” (Isaac Newton).

Sonhos determinam o que você quer. Ações determinam o que você conquista.

(Aldo Novak)

BERNARDES, F. **Desenvolvimento de soldagem para alumínio 2024 e compósito pei-fibra de vidro pelo processo oxiacetileno**. 2018. 27p. Trabalho de Graduação (Curso de Tecnologia Mecânica: Processos em soldagem). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2018.

RESUMO

O alumínio é o segundo metal mais utilizado no mundo, ficando atrás apenas do aço. Isso se deve a abundância de sua matéria prima na terra e a possibilidade de formar ligas importantes, como a liga da série 2000, AA 2024 que tem sido bastante estudada devido a sua aplicabilidade na indústria aeroespacial onde é necessário materiais que relacionem alta resistência mecânica com baixa densidade. Para que seja possível a utilização dessa liga é necessário que ocorra uma adesão eficiente com materiais dissimilares, possibilitando conciliar atributos e obter maior eficiência na aplicação.

A união desses materiais ainda é significativamente complexa, porém confere à aplicação dos mesmos, maior flexibilidade e propriedades específicas localizadas, permitindo excelentes características pontuais para os componentes de aeronaves, reduzindo peso e aumentando a performance dos mesmos.

Dentre esses materiais dissimilares, os compósitos são mais utilizados na indústria aeronáutica, pois possuem características que, além do ganho de propriedades, reduzem o peso em torno de 25% e permitem um ganho de performance se comparado com estruturas metálicas já utilizadas. Dentre eles os compósitos poliméricos (poliimidas) estão se destacando, no qual o PEI (poli(éter-imida)) tem recebido maiores atenções de pesquisas devido ao seu baixo custo, fácil manuseio e por apresentar resultados superiores em relação aos outros polímeros em inúmeros ensaios como o de fadiga, tração e impacto.

Este trabalho de graduação tem como objetivo unir a liga de alumínio AA2024 com o PEI de forma pioneira utilizando o processo de soldagem oxiacetileno com uma metodologia inovadora que possibilita o experimento.

Palavras-chave: Soldagem oxiacetileno. Alumínio AA2024. PEI-Fibra de vidro. Materiais dissimilares.

BERNARDES, F. Development of welding for 2024 aluminum and pei-fiberglass composite by oxyacetylene process. 2018. 27p. Graduation Work (Mechanical Technology Course: Welding Processes). Faculty of Technology of Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2018.

ABSTRACT

Aluminum is the second most used metal in the world, behind only steel. This is due to the abundance of its raw material on Earth and the possibility of forming important alloys, such as the alloy of the 2000 series, AA 2024, which has been well studied due to its applicability in the aerospace industry where materials that relate high mechanical resistance with low density. In order to be able to use this alloy it is necessary that an efficient adhesion occurs with dissimilar materials, allowing to reconcile attributes and obtain greater efficiency in the application.

The bonding of these materials is still very complex, but it gives them greater flexibility and localized specific properties, allowing excellent punctual characteristics for the components of aircraft, cars, etc., reducing weight and increasing their performance.

Among these dissimilar materials, composites are more used in the aeronautical industry, since they have characteristics that, besides the gain of properties, reduce the weight around 25% and allow a gain of performance when compared with metallic structures already used. Polymeric composites (polyimides) are becoming more prominent, in which PEI (polyetherimide) has received more research attention due to its low cost, easy handling and to present superior results in relation to the other polymers in numerous tests such as fatigue, traction and impact.

This graduation work aims to join the AA2024 aluminum alloy with the PEI in a pioneering way using the oxyacetylene welding process with an innovative methodology that enables the experiment.

Keywords: Oxyacetylene welding. Aluminum AA2024. PEI-Fiberglass. Dissimilar materials.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PRINCIPAIS PROPRIEDADES DO PEI.....	19
FIGURA 2 – DISPOSITIVO REFRAATÁRIO PARA EXECUÇÃO DA SOLDAGEM.....	20
FIGURA 3 – REGULAGEM DA CHAMA NEUTRA OXIACETILENO (DARDO BRANCO, BRILHANTE E PENACHO ALONGADO).....	21
FIGURA 4 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DO CORPO DE PROVA SOLDADO PARA LAP SHEAR.	22
FIGURA 5 – AMOSTRAS EMBUTIDAS EM ACRÍLICO PARA ANÁLISE MICROSCÓPICA.....	23
FIGURA 6 – MAIOR RESULTADO DE LAP SHEAR (AMOSTRA 06).....	25
FIGURA 7 – MENOR RESULTADO DE LAP SHEAR (AMOSTRA 08).	25
FIGURA 8 – MICROSCOPIA DA ÁREA SOLDADA DO PEI-FIBRA DE VIDRO APÓS TESTE LAP SHEAR (MELHOR RESULTADO).....	26
FIGURA 9 - MICROSCOPIA DA ÁREA SOLDADA DO PEI-FIBRA DE VIDRO APÓS TESTE LAP SHEAR (PIOR RESULTADO).	27
FIGURA 10 - MICROSCOPIA DA ÁREA SOLDADA DA LIGA DE AL AA2024 APÓS TESTE LAP SHEAR (MELHOR RESULTADO).....	28
FIGURA 11 - MICROSCOPIA DA ÁREA SOLDADA DA LIGA DE AL AA2024 APÓS TESTE LAP SHEAR (PIOR RESULTADO).....	28

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TIPOS E CARACTERÍSTICAS DAS CHAMAS.	15
TABELA 2 – ANÁLISE PRELIMINAR COM O DESENVOLVIMENTO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM.	24
TABELA 3 – RESULTADOS DO LAP SHEAR.	24

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 SOLDAGEM OXI-GÁS (OFW).....	13
2.2 LIGA DE ALUMINIO AA2024	16
2.3 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS	16
2.4 PEI POLI(ÉTER-IMIDA)	17
3 MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1 PREPARO DAS AMOSTRAS.....	20
3.2 SOLDAGEM DAS AMOSTRAS.....	21
3.2.1. CONDIÇÕES	21
3.3. ENSAIO DE <i>LAP- SHEAR</i>	22
3.4 MICROSCOPIA ÓPTICA.....	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	24
4.1. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS INICIAIS PARA SOLDAGEM.....	24
4.2. ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE SOLDAGEM PELO ENSAIO DE <i>LAP SHEAR</i>	24
4.3. ANÁLISE DA JUNTA OBTIDA POR MICROSCOPIA ÓPTICA	26
5 CONCLUSÃO.....	29

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é o segundo metal mais utilizado no mundo, ficando atrás apenas do aço. O alumínio pode formar ligas importantes que possuem propriedades como: ductilidade, boa condutibilidade térmica e elétrica, resistência a corrosão em ambiente pouco agressivo, isso tudo associado a leveza do material, além de se adequar a inúmeros processos posteriores, como laminação, forjamento, extrusão, trefilação, usinagem, soldagem, entre outros (ABAL, 2007; KHAN, 2011).

Uma das ligas que mais está sendo estudada recentemente é a liga da série 2XXX AA 2024, isso se deve a sua aplicabilidade na indústria aeroespacial onde é necessário materiais que relacionem alta resistência mecânica com baixa densidade. Possui cobre, magnésio, manganês e outros elementos em menor quantidade, essa liga geralmente é trabalhada por extrusão e laminação a quente. Além de possuir boa resistência mecânica e baixa densidade, outros fatores que tornam essa liga bastante usual é que ela pode ser envelhecida naturalmente ou artificialmente e pode ser endurecida por precipitação de segunda fase, podendo superar até mesmo um aço estrutural de médio teor de carbono (COUTO et al., 2012).

Para a utilização da liga AA2024 no âmbito aeronáutico é necessário que a adesão dessa liga com materiais dissimilares seja eficiente, possibilitando conciliar atributos e obter maior eficiência na aplicação. A união de materiais dissimilares geralmente é empregada em algum material metálico com um compósito, cada um com diferentes possibilidades de propriedades e geralmente são compostos por fibras longas que permitem a distribuição destas propriedades de forma mais uniforme pelo material (ZANATTA, 2012).

Em decorrência destes benefícios, os termoplásticos estão sendo mais utilizados, estudados e pesquisados. Dentre eles os compósitos poliméricos (poliimidas) estão se destacando, no qual o PEI poli(éter-imida) tem recebido maiores atenções de pesquisas devido ao seu baixo custo, fácil manuseio e por apresentar resultados superiores em relação aos outros polímeros em inúmeros ensaios como o de fadiga, tração e impacto (BOTELHO, 2007).

Este trabalho de graduação tem como objetivo unir a liga de alumínio AA2024 com o PEI de forma pioneira utilizando o processo de soldagem oxiacetileno com uma metodologia inovadora que possibilita a união de materiais dissimilares mesmo ainda sendo significativamente complexo, porém possibilita conferir ao projeto maior flexibilidade e propriedades específicas localizadas, permitindo excelentes características pontuais para os componentes de aeronaves, reduzindo peso e aumentando a performance dos mesmos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLDAGEM OXI-GÁS (OFW)

O processo de soldagem oxi-gás se dá através do calor gerado por meio da queima de um gás combustível com um gás comburente (oxigênio) gerando coalescência entre os materiais a serem soldados, o procedimento pode ser autógeno ou com metal de adição, que quando utilizado se funde e se solidifica juntamente à poça de fusão. Outras possibilidades desse processo conforme a regulagem da chama é de ser utilizado para pré e pós aquecimento, oxi-corte, brasagem e até mesmo para tratar termicamente pequenas peças (MODENESI, et.al 2011).

Além de ser um processo versátil e possuir equipamentos portáteis que são de fácil transporte, outras vantagens que este processo possibilita ao soldador são: o controle do calor e da temperatura das peças, tamanho do cordão, forma e a viscosidade da poça de fusão, isso é possível uma vez que a alimentação do metal de adição e o controle da fonte de calor são obtidos de forma independente. Uma desvantagem do processo é que não é economicamente viável soldar peças de grande espessura, exceto em situações de reparo (BRACARENSE, 2000).

Para executar a soldagem oxi-gás necessita-se basicamente de um maçarico, onde se mistura e controla a vazão dos gases na saída do bico, estes que geralmente são feitos de cobre, ou algum outro material que possui característica de bom condutor térmico para evitar superaquecimento e permitir fácil transferência de calor da chama para a poça de fusão. Os cilindros de oxigênio e de gás combustível possuem reguladores de pressão para controlar a pressão interna do cilindro e manter a estabilidade da vazão permitindo melhores condições de soldagem. O equipamento de soldagem também conta com válvulas de segurança que são indispensáveis pois reduzem riscos e até mesmo evitam acidentes graves. As válvulas são contra retrocesso de chama e de contrafluxo, que tem como função bloquear o contrafluxo dos gases e eliminar o retrocesso de chama (BRANDI et.al 1992).

Durante a operação de soldagem alguns materiais são consumíveis, como os gases, o metal de adição e o fluxo (quando utilizado). Os gases utilizados são o oxigênio e um gás combustível, geralmente é utilizado o acetileno. Os cilindros podem estar ligados a uma instalação industrial quando utilizados em larga escala, ou podem estar em pequenos cilindros sobre um carrinho portátil (MODENESI, et.al 2011).

O oxigênio é um gás comburente, incolor, insípido e acelera as reações que ocorrem no ar, podendo reagir violentamente com óleo ou graxa, devido a isso os cilindros (inclusive de outros gases) devem ser armazenados sem lubrificação, em ambiente limpo, arejado e


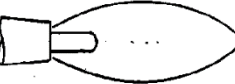

fora de contato com cabos e condutores elétricos. O acetileno é um gás combustível e incolor no estado gasoso e não possui cheiro quando puro, em condições normais ele é mais leve que o ar e possui grande facilidade de combustão. Os fluxos geralmente são utilizados apenas para soldar metais não ferrosos como alumínio, cobre e suas ligas e o ferro fundido. Aços em geral não necessitam de fluxo. Estes que melhoram a fluidez da poça de fusão e a molhabilidade, além de reagirem com óxidos metálicos presentes na superfície e formar uma camada de escória protetora (MODENESI, et.al 2011).

A soldagem oxi-acetilênica pode ser executada de duas maneiras, da esquerda para a direita (backhand), onde a chama fica direcionada para o cordão de solda; e também pode ser feita da direita para a esquerda (forehand) onde a chama fica apontada à frente do cordão, como se estivesse empurrando a poça de fusão. A técnica forehand é indicada para soldagem de chapas de até 3mm, já a backhand apresenta resultados melhores com maiores espessuras, isso se deve pois na soldagem à direita a chama fica mais afastada da poça de fusão (BRANDI et.al 1992).

Além desses dois tipos de execução, pode haver uma combinação com um movimento transversal (tecimento), que permite maior controle da poça de fusão e possibilita a formação de cordões mais largos e maior penetração em peças chanfradas (MODENESI, et.al 2011).

Para executar uma solda de qualidade é importante fazer uma boa regulagem da chama, que na sua abertura é uma chama acetilênica (bastante fuliginosa) e aos poucos a válvula de oxigênio deve ser aberta para regular o tamanho e o tipo de chama adequado à soldagem. As chamas podem ser do tipo redutora, neutra ou oxidante conforme mostra a Tabela 1 e são obtidas sucessivamente nesta ordem conforme é aumentada a vazão do oxigênio (MODENESI, et.al 2011).

Tabela 1 - Tipos e Características das Chamas.

Regulagem da chama	Tipo da chama	Formato da chama	Característica	Aplicação
$a < 1,0$	Redutora		Penacho esverdeado. Véu branco circundando o dardo. Dardo branco, brilhante e arredondado. Chama menos quente.	Revestimento duro, ferro fundido, alumínio e chumbo
$1,0 < a < 1,1$	Neutra		Penacho longo. Dardo branco, brilhante e arredondado.	Soldagem de aços (ou regulagem neutra levemente redutora). Cobre e suas ligas (exceto latão). Níquel e suas ligas.
$a > 1,1$	Oxidante		Penacho azulado ou avermelhado, mais curto e turbulento. Dardo branco, brilhante, pequeno e pontiagudo. Chama mais quente. Ruído característico.	Aços galvanizados (regulagem neutra levemente oxidante). Latão Bronze

Fonte: (Adaptada de BRANDI et.al 1992).

Devido a facilidade e versatilidade de ajustes desse processo ele pode ser facilmente aplicado em metais e ligas ferrosas e não ferrosas, como aços de baixo, médio e alto carbono, ligas de alumínio, cobre, entre outras ligas. Na soldagem de ligas não ferrosas é importante adequar o processo de acordo com as características do material, dependendo principalmente do ponto de fusão, e condutibilidade térmica, podendo utilizar fluxo e suportes para prender a peça e manter o ângulo de soldagem (BRACARENSE, 2000).

Apesar de ser simples e versátil, este processo de soldagem não é muito usual na indústria devido a sua baixa produtividade sendo aplicado geralmente para soldar materiais não ferrosos ou outros materiais em situação de reparo (MODENESI, et.al 2011).

2.2 LIGA DE ALUMINIO AA2024

O alumínio é o segundo metal mais utilizado no mundo, ficando atrás apenas do aço. Isso ocorre devido a abundância de sua matéria prima na terra (bauxita) e as suas propriedades como: ductilidade, boa condutividade térmica e elétrica, resistência a corrosão em ambiente pouco agressivo, isso tudo associado a leveza do material, o qual possui pouco mais de um terço da densidade do aço. Além disso, embora a obtenção do alumínio puro seja de custo elevado devido a redução eletrolítica do processo, o produto final se adequa a inúmeros processos posteriores, como laminação, forjamento, extrusão, trefilação, usinagem, soldagem, entre outros (ABAL, 2007; KHAN, 2011).

Embora o alumínio puro possua diversas qualidades ele é limitado quando se leva em consideração a resistência mecânica. Para tentar solucionar essa deficiência do material, em 1903 o alemão Alfred Wilm, descobriu que era possível endurecer o alumínio formando uma liga com cerca de 4% de cobre, causando endurecimento por precipitação. Posteriormente foram adicionadas quantidades pequenas de magnésio e manganês a essa liga, a qual originou as ligas da série 2XXX (ABREU, 2016).

Da série 2XXX, a liga AA 2024 é a que está sendo mais estudada recentemente devido a sua aplicabilidade na indústria aeroespacial onde é necessário materiais que relacionem alta resistência mecânica com baixa densidade. Possui cobre, magnésio, manganês e outros elementos em menor quantidade, essa liga geralmente é trabalhada por extrusão e laminação a quente. A adição de cobre aumenta a resistência mecânica gradativamente devido a precipitação do mesmo, além de possuir baixa densidade, outros fatores que tornam essa liga bastante usual é que ela pode ser envelhecida naturalmente ou artificialmente e pode ser endurecida por precipitação de segunda fase, podendo superar até mesmo um aço estrutural de médio teor de carbono (COUTO et al., 2012).

2.3 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Os compósitos poliméricos surgiram com força no mercado por volta de 1940 durante a segunda guerra mundial, onde as fibras de vidro com resina poliéster foram utilizadas na fabricação de estruturas secundárias de aeronaves americanas devido a redução de custo, peso, resistência ao ambiente corrosivo (aumentando a durabilidade) e facilidade de fabricação (MARTINS, 2007). Em outros ramos da indústria os materiais compósitos vieram para sanar a falta de materiais que atendessem as necessidades com diversas propriedades distintas que não eram possíveis em um único tipo de material (GOMES, 2015).

De uma maneira geral os materiais compósitos podem ser definidos como um

material multifásico, ou seja, que combina dois ou mais materiais com forma, composição e propriedades microscopicamente diferentes, não podendo ser solúveis entre si para possibilitar a combinação de diferentes propriedades dos materiais que constituem as fases dos compósitos, são estas fases as matrizes e as fases dispersas (MARTINS, 2007).

Para constituir um material compósito pode-se utilizar matrizes metálicas, cerâmicas ou poliméricas, além de existir outros compósitos naturais, como madeira, ossos, etc. A matriz normalmente é contínua e envolve a fase dispersa, sendo necessário que haja afinidade entre os materiais unidos, para que correspondam a esforços externos e internos de maneira eficiente (DA SILVA, 2014).

A fase dispersa pode ser constituída por ilimitadas possibilidades, porém as formas são restringidas às de fibras (naturais ou artificiais), partículas, placas, lâs, etc, esta fase determina a estrutura interna do material a ser formado. Já matriz serve para unir os constituintes e dar formato final a interface de escala microscópica (SILVA, 2010).

Para que a adesão da matriz com a fase dispersa seja estabelecida é necessário que haja interação entre os materiais por meio de ligações covalentes, ligações de hidrogênio, ligações de van der Waals ou interação eletrostática, além da afinidade química entre ambas as fases. Normalmente a fase dispersa é de natureza hidrofílica e a matriz polimérica de natureza hidrofóbica, podendo ter a compatibilidade melhorada por meio de uma modificação química da superfície de um dos componentes (DA SILVA, 2014).

Os materiais compósitos vieram para sanar a necessidade de equipamentos que solicitam propriedades incomuns ou uma combinação de propriedades impossíveis para um único material e vem sendo aplicado na indústria aeronáutica, automotiva, implantes ortopédicos, odontológicos, Fórmula1, plataformas marítimas, engenharia mecânica e civil, etc. Apesar de ser uma tecnologia ainda em desenvolvimento de inúmeras novas possibilidades, possuir um custo relativamente alto, as vantagens já citadas compensam os altos investimentos na área de pesquisa & desenvolvimento de novos métodos de fabricação ou até mesmo novos tipos de compósitos que possam atender novos ambientes de trabalho (GOMES, 2015; DA SILVA, 2014).

2.4 PEI POLI(ÉTER-IMIDA)

Dentre os materiais compósitos mais utilizados na indústria aeronáutica, os termoplásticos avançados possuem algumas vantagens em relação aos termorrígidos convencionais, pois apresentam melhor resistência ao impacto, podem ser utilizados em maiores temperaturas, são de fácil reparo, fácil transporte além do baixo custo, caracterizando assim, um excelente custo x benefício. Além dos termoplásticos possuem

resiliência, tenacidade e resistência mecânica superiores aos termorrígidos que já estão sendo utilizados na indústria aeroespacial, também abrangem o fato de não enrijecerem de forma permanente e podem ser reaquecidos e conformados inúmeras vezes (BATISTA; BOTELHO, 2009; BOTELHO; OLIVEIRA, 2007).

Em decorrência destes benefícios, os termoplásticos estão sendo mais utilizados, estudados e pesquisados. Dentre eles os compósitos poliméricos (poliimidas) estão se destacando, no qual o PEI poli(éter-imida) tem recebido maiores atenções de pesquisas devido ao seu baixo custo, fácil manuseio e por apresentar resultados superiores em relação aos outros polímeros em inúmeros ensaios como o de fadiga, tração e impacto (BOTELHO; OLIVEIRA, 2007).

O PEI é um polímero de engenharia, desenvolvido em meados da década de 70, apesar de ter sido utilizado a partir de 1982. É um material de estrutura amorfa, possui elevada temperatura de transição vítrea, alta resistência mecânica e rigidez tanto em temperatura ambiente quanto em elevadas temperaturas (até 190° C), possui resistência inerente a chama com baixa dispersão de fumaça, além de ser um material isolante e possuir ampla resistência química (ABRAHÃO, 2015).

A estrutura do PEI é composta por repetidas imidas aromáticas e unidades de éter. As moléculas de imidas agrupadas de forma rígida com anéis aromáticos ligados por um ou dois átomos sem ramificações fazem com que a energia de ligação seja alta, tornando a estrutura do PEI bastante flexível mesmo quando ocorre incidência de calor, o que torna esta estrutura pouco afetada por ciclos térmicos facilitando sua refundição e produção em larga escala, além de possibilitar união permanente utilizando calor (soldagem). Isso tudo contribui para uma excelente estabilidade dimensional/estrutural e altas propriedades mecânicas isotrópicas quando comparado com outros polímeros de engenharia, amorfos ou semicristalinos (ABRAHÃO, 2015; BOTELHO; OLIVEIRA, 2007).

Com um vasto repertório de excelentes propriedades e características o poli(éter-imida) possui um leque de possibilidades na indústria em geral, tal como na indústria aeronáutica. Tornando-se uma boa escolha para ser matriz de compósitos que serão aplicados em aeronaves principalmente em estruturas internas, secundárias e terciárias (ABRAHÃO, 2015). A Figura 1 na próxima página mostra as principais propriedades do PEI.

Figura 1 – Principais propriedades do PEI.

Propriedades PEI		
Físicas	Massa específica (g/cm ³)	1,35
	Absorção de água (%)	0,24
	Dureza Shore (D)	85,5
Mecânicas	Resistência à tração (MPa)	100
	Módulo de elasticidade (GPa)	3,6
	Ductibilidade (%)	44,9
Térmicas	Temperatura de Transição Vítrea (°C)	210 – 220
	Temperatura Máxima de serviço (°C)	200
	Condutividade térmica (W/m.K)	0,25
	Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁵ /°C)	5-6
Elétricas	Resistividade (Ω.cm)	10 ¹⁵ -10 ¹⁷
	Constante Dielétrica	3,1-3,2
	Força Dielétrica (kV/mm)	28-33

Fonte: (ABRAHÃO, 2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PREPARO DAS AMOSTRAS

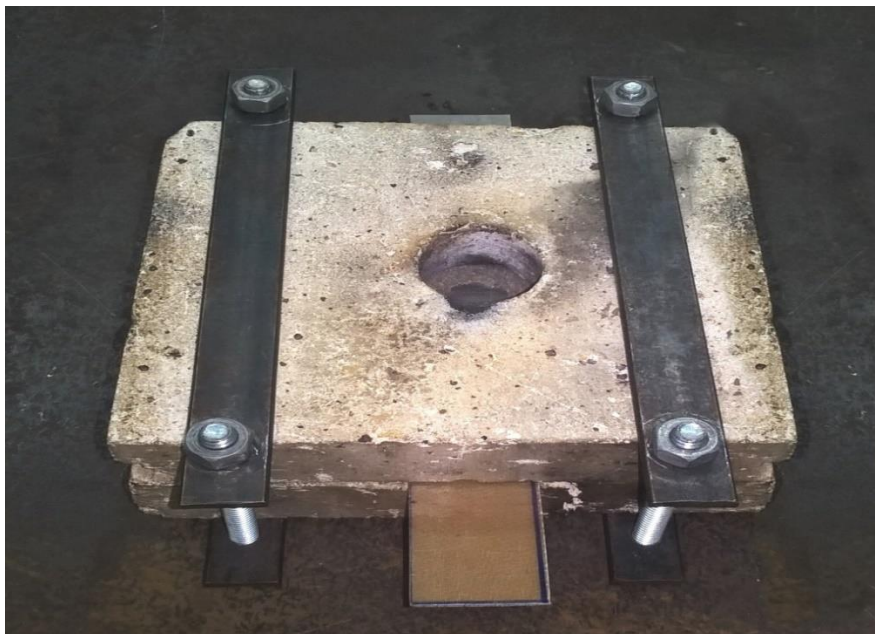
O procedimento consistiu em soldar com oxiacetileno corpos de prova de PEI Fibra de vidro com a liga de alumínio AA2024 padronizados para o *Lap Shear*, onde a chama regulada do tipo neutra incide direto no corpo de prova.

Foi feita uma preparação no corpo de prova de alumínio, antes da soldagem a área desejada para soldar foi lixada para retirar a camada de resina ou óxido formado do material como recebido, e facilitar a aproximação dos átomos das estruturas a serem unidas.

Para que fosse possível executar a soldagem foram desenvolvidos dois dispositivos refratário com dois orifícios circulares para que possibilitasse a incidência da chama focada sobre a região a ser soldada dos corpos de prova, no qual a chama entra em contato direto com o corpo de prova de alumínio e o mesmo transfere calor para o corpo de prova de PEI.

O dispositivo refratário tem função essencial no procedimento, pois além de prender os dois corpos de prova na posição correta, protege a parte que não será soldada da chama de forma a não degradar o corpo de prova, além de conferir a pressão necessária para permitir a união dos mesmos. A figura 2 ilustra o dispositivo utilizado.

Figura 2 – Dispositivo refratário para execução da soldagem.



Fonte: Próprio Autor.

Após executada a soldagem as 8 amostras foram submetidas ao ensaio de *Lap Shear* para obtenção de valores de tensão (MPa) e posteriormente foi retirada amostras da região soldada do PEI para embutimento em resina e análise microscópica.

3.2 SOLDAGEM DAS AMOSTRAS

3.2.1. CONDIÇÕES

Como condição de soldagem foi analisado a altura entre o bico do maçarico e a peça, e tempo que a chama incidiu na amostra de alumínio.

Para a regulagem da chama neutra foi utilizado vazão de 1 m³/h para ambos os gases e regulagem do penacho neutro nas válvulas do maçarico, como ilustra a figura 3.

Figura 3 – Regulagem da chama neutra oxiacetileno (Dardo branco, brilhante e penacho alongado).



Fonte: Próprio Autor

3.2.2. PROCEDIMENTO

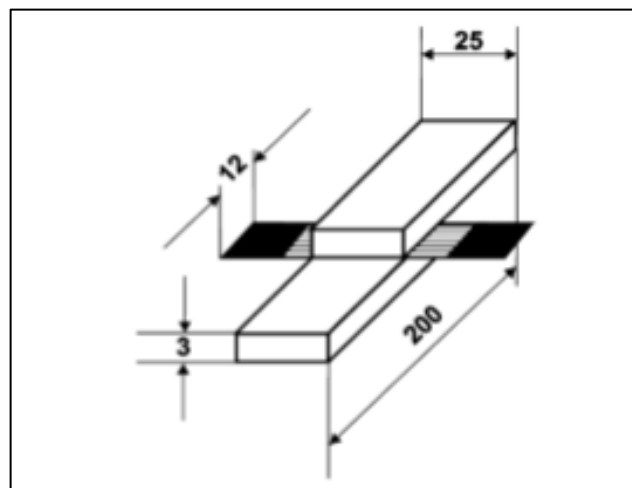
Foram soldados 8 corpos de prova para determinar os parâmetros com tempo máximo de 60 segundos e mínimo de 10 segundos e distância máxima de 75 mm e mínima de 30 mm. Onde ficou definido que dentro desses parâmetros pode-se soldar e obter resultados satisfatórios.

3.3. ENSAIO DE *LAP-SHEAR*

O ensaio de *Lap Shear*, tem como objetivo quantificar a eficiência de superfícies soldadas de materiais compósitos e consiste em solicitar o corpo de prova soldado por meio do esforço de tração longitudinal até a ruptura da amostra.

O teste geralmente segue a norma ASTM D 1002 que padroniza as dimensões do corpo de prova com 100 mm de comprimento e 25 mm de largura e a área de soldagem de 25 mm² conforme exemplo da Figura 4 (ABRAHÃO, 2015).

Figura 4 – Esquema representativo do corpo de prova soldado para Lap Shear.



Fonte: (ABRAHÃO, 2015).

3.4 MICROSCOPIA ÓPTICA

Para realizar a microscopia as amostras de maior e menor *Lap Shear* foram cortadas e embutidas em resina acrílica do tipo RPI e permaneceram em repouso de 24 horas para cura, posteriormente lixadas com lixas úmidas de granulometria 320, 1200 e 2000. Em seguida foi feito o polimento com pasta de diamante de 6 μm .

Após a preparação das amostras, foram realizadas análises microscópicas para caracterização da área onde ocorreu a soldagem, onde foi utilizado um microscópio ótico com aumento de 50x. A figura 5 ilustra as amostras embutidas em resina acrílica.

Figura 5 – Amostras embutidas em acrílico para análise microscópica.



Fonte: Próprio Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS INICIAIS PARA SOLDAGEM

Em relação a determinação de parâmetros para os materiais estudados, foram considerados em um primeiro momento a análise visual das juntas soldadas obtidas, mostradas pela Tabela 2.

Tabela 2 – Análise preliminar com o desenvolvimento dos parâmetros de soldagem.

Amostra	Tempo (s)	Distância (mm)	Resultado
01	60	30	Não soldou, houve Degradação
02	30	30	Soldou desalinhado
03	30	30	Soldou sem degradação
04	60	30	Soldou sem degradação
05	60	50	Soldou, pouca degradação
06	60	50	Soldou com pouca degradação
07	60	75	Soldou com pouca degradação
08	10	20	Soldou com degradação

Fonte: Próprio autor.

4.2. ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE SOLDAGEM PELO ENSAIO DE *LAP SHEAR*

Posteriormente para uma análise quantitativa foi realizado o ensaio mecânico de *Lap Shear* mais convencional para análise de juntas de materiais avançados. Os ensaios anteriores agora são avaliados com relação a resistência mecânica que são apresentados pela Tabela 3 na próxima pagina.

Tabela 3 – Resultados do Lap Shear.

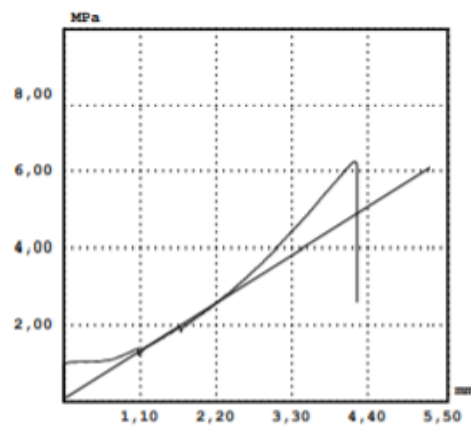
Amostra	Tensão (MPa)
01	Rompeu sem apresentar valor de MPa
02	Rompeu sem apresentar valor de MPa
03	Rompeu sem apresentar valor de MPa
04	1,41 Mpa
05	Rompeu sem apresentar valor de MPa
06	6,23 Mpa
07	1,38 MPa
08	1,07 MPa

Fonte: Próprio autor.

Como forma de análise de resultados os valores de tensão obtidos no ensaio de *Lap Shear* foram as principais considerações, onde a amostra 06, embora tenha sofrido um pouco de degradação, ainda assim foi o melhor resultado, e o pior resultado foi da amostra 08, que, além de sofrer degradação devido a pouca distância (20 mm), a soldagem ficou frágil também devido ao curto tempo de incidência de chama (10 segundos).

Conforme mostram as figuras 6 e 7 fica explícito a diferença entre o melhor e o pior resultado.

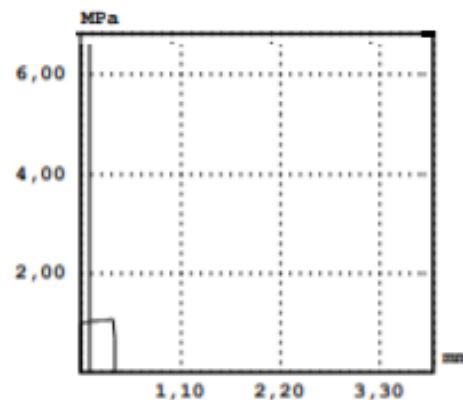
Figura 6 – Maior resultado de Lap Shear (Amostra 06).



FORÇA MÁXIMA N	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	RELAÇÃO LR/LE	ALONGAMENTO %	ALONGAMENTO LINEAR mm	ALONGAMENTO (%) CARGA MÁXIMA	ALONG. LINEAR CARGA MÁXIMA mm	LARGURA mm	ESPESSURA mm
3893,30	6,23	0,00	0,00	8,52	4,260	8,48	4,240	25,000	25,000

Fonte: Próprio Autor

Figura 7 – Menor resultado de Lap Shear (Amostra 08).



Amostra No.	FORÇA MÁXIMA N	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	RELAÇÃO LR/LE	ALONGAMENTO %	ALONGAMENTO LINEAR mm	ALONGAMENTO (%) CARGA MÁXIMA	ALONG. LINEAR CARGA MÁXIMA mm	LARGURA mm	ESPESSURA mm
1	666,86	1,07	0,00	0,00	0,76	0,380	0,72	0,360	25,000	25,000

Fonte: Próprio Autor

Os gráficos gerados após o ensaio de *Lap Shear* deixam explícito a diferença de resultado obtido por meio da soldagem de oxiacetileno. Onde o primeiro gráfico (figura 5) gerado apresenta uma curva bem definida, com alongamento do material antes da falha, o qual obteve 6,23 Mpa de valor de resistência mecânica. Em contrapartida o gráfico da pior amostra de *lap shear* (figura 6) deixa claro que a junta soldada ficou bastante fragilizada devido ao pouco tempo de incidência da chama e devido a chama muito próxima que degradou parte do PEI-Fibra de vidro, obtendo um valor de 1,07 Mpa.

4.3. ANÁLISE DA JUNTA OBTIDA POR MICROSCOPIA ÓTICA

Para uma análise visual de melhor qualidade, foram feitas análises metalográficas da região onde ocorreu a soldagem tanto nas amostras de PEI-Fibra de vidro quanto nas amostras da liga de alumínio AA2024.

De acordo com a metalografia no PEI-Fibra de vidro podemos notar a presença de vazios na estrutura do PEI que se devem ao rompimento da soldagem por meio do ensaio de *Lap Shear*, esses vazios indicam os locais onde a fibra de vidro mais aderiu a liga AA2024. Além disso fica notável o residual da liga AA2024 nos arredores dos vazios, como podemos perceber manchas um pouco mais claras que a estrutura do PEI. E tivemos partes do PEI que não chegaram a aderir e ficaram intactas, sem apresentar vazios ou alterações.

Assim podemos observar a análise na figura 8 abaixo com o aumento de 50x.

Figura 8 – Microscopia da área soldada do PEI-Fibra de vidro após teste lap shear (Melhor resultado).



Fonte: Próprio Autor.

Já a figura 9 ilustra de forma nítida como a degradação prejudicou o resultado da soldagem, não formando nenhum poro resultante de aderência com o AA2024 além de prejudicar visualmente a amostra, deixando com essa tonalidade escura que podemos notar na figura abaixo com a ampliação de 50x.

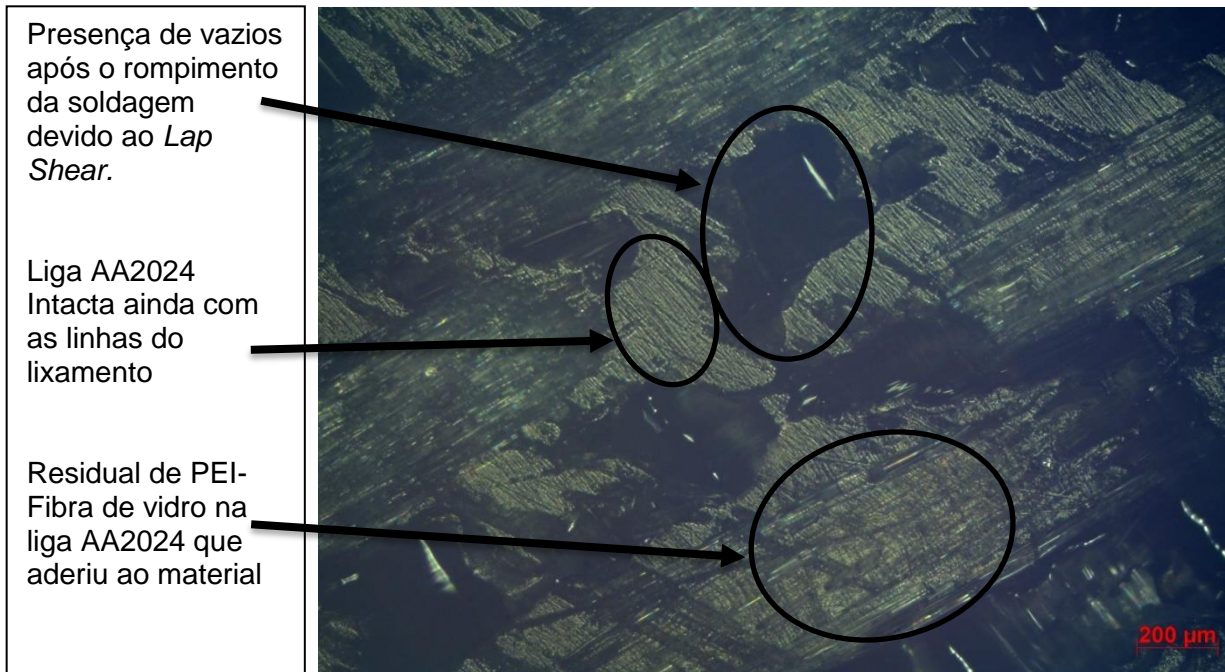
Figura 9 - Microscopia da área soldada do PEI-Fibra de vidro após teste lap shear (Pior resultado).



Fonte: Próprio Autor.

Ao analisar a imagem microscópica do corpo de prova de AA2024 que apresentou melhor resultado podemos notar a presença de vazios resultante de partes da liga que se desprenderam devido ao ensaio mecânico de *lap shear*, essas regiões são as que mais aderiram no processo de soldagem. Podemos também notar partes de manchas mais claras que são residuais de PEI ainda presentes na liga 2024. Além das partes da liga de alumínio que ficaram intactas. Estas regiões ficam exemplificadas pela figura 10 na próxima pagina.

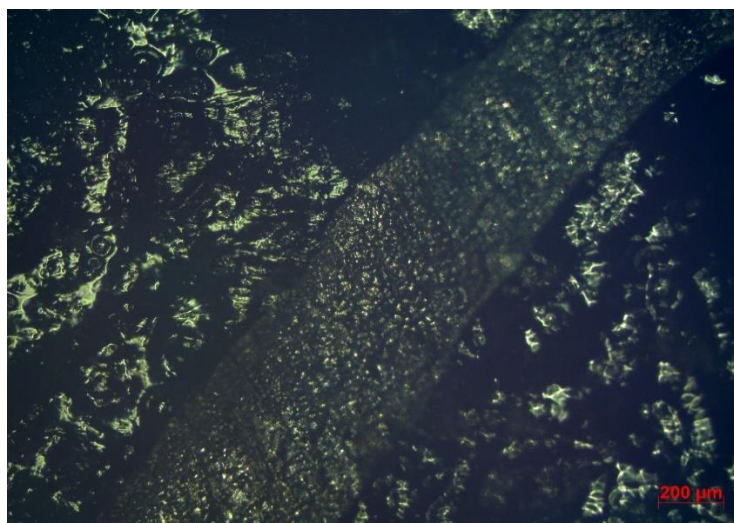
Figura 10 - Microscopia da área soldada da liga Al AA2024 após teste *Lap Shear* (Melhor resultado).



Fonte: Próprio Autor.

Abaixo podemos observar na figura 11 a metalografia da amostra de pior resultado que fica visível a ação da degradação que deixou a imagem bem escura, além de não ter nenhum vazio presente resultante de boa aderência. Apenas podemos notar uma grande mancha linear onde houve aderência de baixa intensidade, mas que foi o suficiente para prender a solda, embora tenha apresentado baixo resultado de *Lap Shear*.

Figura 11 - Microscopia da área soldada da liga de Al AA2024 após teste *Lap Shear* (Pior resultado)



Fonte: Próprio Autor.

5 CONCLUSÃO

De acordo os testes de soldagem realizados, definição de chama neutra, dispositivo refratário para a soldagem, variações de distância de chama e tempo de incidência de calor. Outro fator importante para que ocorresse a soldagem foi o fato de fazer o lixamento na região do AA2024 que seria soldado, pois esse procedimento remove uma camada de resina superficial presente na liga.

Posteriormente os valores do ensaio mecânico de *Lap Shear* obtidos, deixou explícito que é possível a realização da soldagem destes materiais dissimilares com resultados satisfatórios de resistência mecânica, embora ainda esteja em processo experimental.

Possibilitando assim a utilização do PEI-Fibra de vidro com a liga de alumínio AA2024 no âmbito aeronáutico, entre outras áreas de aplicação.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO – ABAL. **Fundamentos e Aplicações do alumínio**. São Paulo: Editora ABAL, 2007.

ABRAHÃO, A. B. R. M. **Otimização do processo de soldagem por resistência elétrica em compósitos PEI/fibras contínuas para aplicações aeronáuticas**. Tese de Doutorado. UNESP. Guaratinguetá. 2015.

ABREU, C. P. **Caracterização da reatividade das ligas de alumínio AA2024-T3 e AA7475-T651 soldadas por fricção (FSW)**. Tese de Doutorado. UNESP. São Paulo. 2016.

BATISTA, N.L; BOTELHO, E. C. **Influência do intemperismo no desempenho viscoelástico de laminados PEI/fibras de carbono com aplicações aeroespaciais**. CBPol, 10º. UNESP. Guaratinguetá. 2009.

BRACARENSE, A.Q. **Processo de Soldagem com Chama Oxi-Gás – OFW**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2000.

COUTO, A. A; REIS, D. A; JUNIOR N.I. et al. **Estudo das propriedades mecânicas em fadiga da liga de alumínio AA2024 envelhecida artificialmente para aplicações aeronáutica**. V Congresso Nacional do Alumínio. São Paulo. 2012.

DA SILVA, I. L. A. **Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta**. Tese de Doutorado. UENF. Rio de Janeiro. 2014.

GOMES, M. A. **Propriedades mecânicas de compósitos poliméricos reforçados com fibras de folhas de abacaxizeiro (palf)**. Tese de doutorado. UENF. Rio de Janeiro. 2015.

KHAN, S. S. **Low cycle lifetime assessment of Al2024 alloys**. Tese de doutorado. Technischen Universit at Dortmund. Germany. 2011.

MARTINS, J. V. **Modelagem matemática de propriedades mecânicas de Materiais compósitos de fricção**. Tese de Graduação. UFSC. Florianópolis. 2007.

MODENESI, P. J. **Soldagem I Introdução aos Processos de Soldagem**. UFMG. Minas Gerais. 2000.

OLIVEIRA, G. H; BOTELHO, E. C. **Avaliação da Resistência á fadiga do Compósito de Fibras de Carbono/PEI Com Aplicações na Indústria Aeroespacial**. CECEMM, 9º. UFSC. Florianópolis. 2007.

SILVA, H. S. P. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras de curauá e híbridos com fibra de vidro.** Tese de Mestrado. UFRGS. Porto Alegre. 2010.

VILLANI, P.M.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia.** Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

WAINER, E.; BRANDI, S.D.; MELLO, F.D.H. **Soldagem: processo e metalurgia.** São Paulo: Editora Edgard Bluncher LTDA, 1992.

ZANATTA, R. **Materiais compósitos na aviação.** Artigo. Aviação.org. 2012.