

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Guaratinguetá

TUANE STEFANIA REIS DOS SANTOS

**ESTUDO DA SOLDAGEM DE JUNTA HÍBRIDA COMPÓSITO-METAL COM
SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

Guaratinguetá

2024



TUANE STEFANIA REIS DOS SANTOS

**ESTUDO DA SOLDAGEM DE JUNTA HÍBRIDA COMPÓSITO-METAL COM
SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, para obtenção de Grau acadêmico Mestre(a) em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Rogério Pinto Mota

Coorientador: Prof. Dr. Erick Siqueira Guidi

Guaratinguetá

2024

S237e Santos, Tuane Stefania Reis dos
Estudo da soldagem de junta híbrida compósito-metal
com simulação numérica / Tuane Stefania Reis dos Santos
– Guaratinguetá, 2024.
94 f : il.
Bibliografia: f. 86-91

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Pinto Mota
Coorientador: Prof. Dr. Erick Siqueira Guidi

1. Soldagem. 2. Materiais compostos. 3. Método dos
elementos finitos. 4. Análise térmica. I. Título.

CDU 621.791(043)

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Este estudo visa otimizar os processos de união híbrida de compósito-metal, reduzindo o número de amostras e minimizando o desperdício de matéria-prima e energia, e a construção de um protótipo funcional de baixo custo do equipamento de soldagem para materiais dissimilares. Além disso, busca ampliar a compreensão dos fenômenos na soldagem por condução térmica, identificando falhas e defeitos sem muitos equipamentos, resultando em análises mais eficientes e econômicas.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This study aims to optimize the hybrid joining processes of composite-metal, reducing the number of samples and minimizing the waste of raw materials and energy, as well as developing a functional, low-cost prototype of welding equipment for dissimilar materials. Additionally, it seeks to broaden the understanding of thermal conduction welding phenomena, identifying failures and defects with minimal equipment, resulting in more efficient and cost-effective analyses.


TUANE STEFANIA REIS DOS SANTOS

**ESTUDO DA SOLDAGEM DE JUNTA HÍBRIDA COMPÓSITO-METAL COM
SIMULAÇÃO NUMÉRICA**


Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Data da defesa: 10/12/2024


Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ROGERIO PINTO MOTA**
Data: 27/01/2025 12:54:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. ROGERIO PINTO MOTA
Orientador - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **RITA DE CASSIA MENDONÇA SALES CONTINI**
Data: 27/01/2025 16:39:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. RITA DE CASSIA MENDONÇA SALES CONTINI
ITA

Documento assinado digitalmente
 **LUIS ROGERIO DE OLIVEIRA HEIN**
Data: 27/01/2025 21:04:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. LUIS ROGERIO DE OLIVEIRA HEIN
UNESP

Dedico esta dissertação a meu amado filho
Antony,
Você é minha maior motivação e fonte de
orgulho. Esta dissertação é dedicada a você,
com a esperança de que possa inspirá-lo a
sempre perseguir seus sonhos e nunca parar de
aprender.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

A Deus,

Pois sem ele nada é possível, pela graça de poder conviver com ótimas pessoas e em um ambiente onde é possível grandes realizações.

Aos meus amados pais, Fernando e Maria Auxiliadora,

Obrigada por seu amor incondicional e apoio ao longo de toda a minha jornada acadêmica. Vocês são os alicerces da minha vida, e essa conquista também é de vocês.

Ao meu querido professor, orientador e amigo Dr. Rogério,

Sua orientação, conhecimento e estímulo moldaram meu caminho acadêmico. Sua dedicação ao ensino e sua confiança em mim são inestimáveis.

Ao meu querido professor e coorientador Dr. Erick,

Sua orientação e apoio foram fundamentais para minha trajetória, sou profundamente grata pelo conhecimento, incentivo e confiança que sempre demonstrou.

Aos meus amigos, em especial Luis Felipe, Rafael e Jonas,

Por todos os bons momentos, conhecimento, apoio e experiências compartilhados. Vocês tornaram essa jornada acadêmica muito mais leve, rica e divertida.

A toda equipe do Laboratório de Plasma (LPA) da Unesp-FEG,

Por todo suporte e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho, em especial ao técnico Miguel Omena que sempre foi solícito para todas as necessidades encontradas durante a realização deste trabalho.

Esta dissertação é o resultado de muito trabalho, empenho, apoio e ensinamentos que recebi de cada um de vocês. Obrigado por serem parte essencial desta conquista.

Com gratidão, Tuane Stefania Reis dos Santos.

RESUMO

No contexto industrial moderno a necessidade de unir componentes constituídos a partir de materiais dissimilares, como compósitos de matrizes poliméricas reforçados por fibras a metais, como a liga de alumínio 2024-T3, representa um desafio significativo. Os métodos convencionais de união, como técnicas mecânicas ou adesivas são as soluções mais utilizadas, entretanto abordagens recentes como a soldagem, que combina os fatores de condução térmica e pressão têm sido exploradas. Este trabalho teve como objetivo mapear a distribuição térmica em juntas híbridas durante o processo de prensagem a quente utilizando o compósito PEI/fibra de vidro com alumínio 2024-T3, a partir de um modelo numérico com Método dos Elementos Finitos. Com foco nos impactos da temperatura nos componentes da junta, pode-se otimizar o processo. Os resultados indicam que a técnica avaliada oferece uma distribuição de calor mais uniforme em comparação a outros processos de soldagem para materiais dissimilares envolvendo compósitos de matriz polimérica. Neste contexto os parâmetros de pressão, tempo e potência foram identificados como as variáveis de maior influência no processo, com impacto direto na resistência ao cisalhamento das juntas sobrepostas. Em relação a outros processos como soldagem por fricção, esta técnica se destaca por fornecer uma área útil soldada maior, devido a melhor distribuição de temperatura.

Palavras-chave: materiais compósitos; resistência estrutural; união híbrida; método dos elementos finitos (MEF); análise térmica.

ABSTRACT

In the modern industrial context, the need to join components made from dissimilar materials, such as fiber-reinforced polymer matrix composites and metals like the 2024-T3 aluminum alloy, represents a significant challenge. Conventional joining methods, including mechanical and adhesive techniques, are the most commonly used solutions. However, recent approaches, such as welding, which combines thermal conduction and pressure, have been explored. This study aimed to map the thermal distribution in hybrid joints during the hot pressing process using PEI/glass fiber composite and 2024-T3 aluminum, based on a numerical model employing the Finite Element Method. By focusing on the temperature effects on joint components, the process can be optimized. The results indicate that the evaluated technique provides a more uniform heat distribution compared to other welding processes for dissimilar materials involving polymer matrix composites. In this context, pressure, time, and power parameters were identified as the most influential variables in the process, directly impacting the shear strength of the overlap joints. Compared to other processes, such as friction welding, this technique stands out by providing a larger effective welded area due to improved temperature distribution.

Keywords: composite materials; structural strength; hybrid bonding; finite element method (FEM); thermal analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Técnicas de União para união de juntas híbridas metal-compósito.....	14
Figura 2 - Exemplo de um componente estrutural sendo analisado por uma malha de MEF. .	17
Figura 3 - Organização das camadas de um compósito laminado.....	20
Figura 4 - Fórmula molecular da unidade de repetição PEI.	21
Figura 5 - Geometria de juntas de sobreposição coladas. a) Junta de sobreposição simples. .	23
Figura 6 - Esquema de rebitagem cega.....	24
Figura 7 - Influência dos parâmetros de pressão e temperatura na interação dos materiais nos processos de uniões termomecânicas.	27
Figura 8 - Esquema de Produção do Alumínio.....	28
Figura 9 - Aparato para soldagem oxiacetilênica de materiais dissimilares.....	35
Figura 10 - Soldagem híbrida (compósito-metal) com aferição de temperatura na junta.	36
Figura 11 - Aparato para união <i>hot press</i> de metal-compósito.....	37
Figura 12 - Emissão e absorção de radiação de energia entre corpos.	43
Figura 13 - Curvas de temperatura x tempo.	45
Figura 14 - Dimensionamento do corpo de prova conforme a norma ASTM 3063 – 01.....	48
Figura 15 - Microscópio óptico de luz refletida Nikon Epiphot 200.....	49
Figura 16 - Microscopia da secção do compósito laminado poli(eter-imida) reforçado com fibras de vidro, com indicação da região medida.	49
Figura 17 - Laminado sólido desenvolvido para simulação.	51
Figura 18 - Equipamento de soldagem oxiacetileno, A – cilindros de gás oxigênio e acetileno, B – braço móvel e tocha, C – alumínio e compósito termoplástico sendo soldados.....	52
Figura 19 - Posicionamento do termopar e aferição de temperatura na área da junta entre o alumínio e compósito.....	53
Figura 20 – Modelo 3D e equipamento do Sistema de Soldagem <i>Hot Press</i> utilizado no estudo.	54
Figura 21 - Gráfico de tendência de temperatura do processo de soldagem por prensagem a quente.....	56
Figura 22 - Processo de soldagem por prensagem a quente utilizando filme intermediário de PEI.	57
Figura 23 - Indicação de diferentes índices de temperatura sobre a superfície do alumínio....	59
Figura 24 - Representação geométrica do sólido térmico SOLID291.....	60
Figura 25 - Representação geométrica do sólido térmico SOLID279.....	60

Figura 26 - Representação geométrica do sólido térmico SOLID278.....	61
Figura 27 - Representação geométrica do elemento de contato CONTA174.	61
Figura 28 - Representação geométrica das interações possíveis do elemento TARGE170.	62
Figura 29 - Qualidade dos elementos de malha.....	63
Figura 30 – Refinamento e Qualidade dos elementos de malha do modelo Soldagem Oxiacetileno.....	64
Figura 31 - Modelo elaborado para simulação de prensagem a quente com entrada de potência de 300 Watts.	65
Figura 32 - Representação geométrica do elemento SURF152.....	66
Figura 33 - Refinamento e Qualidade dos elementos de malha do modelo Soldagem por Prensagem a Quente.	67
Figura 34 - Distribuição geral de temperatura pelo modelo completo de Soldagem por Oxiacetileno.....	68
Figura 35 - Distribuição de temperatura pelo compósito PEI-FV.....	69
Figura 36 - Distribuição de Temperatura ao longo do compósito PEI-FV.	70
Figura 37 – Progressão de temperatura alcançada ao longo do tempo pela técnica de soldagem por oxiacetileno na superfície do compósito PEI-FV.....	71
Figura 38 - Evolução do gradiente de temperatura a cada 10 segundos durante o processo de soldagem oxiacetilênica do compósito PEI-FV na interface de contato da junta.	72
Figura 39 - Fluxo de calor considerando a face de contato da junta do compósito PEI-FV no processo de soldagem oxiacetilênica.....	73
Figura 40 – Ensaio de <i>Lap Shear</i> em amostras produzidas pelo processo de Soldagem Oxiacetilênica.	75
Figura 41 – Correlação entre face de contato da junta do componente compósito PEI-FV obtido por simulação computacional com a face de contato da junta do componente de alumínio da amostra soldada por oxiacetileno.	76
Figura 42 - Distribuição do gradiente de temperatura do sistema de prensagem a quente.	77
Figura 43 - Vista lateral do corpo de prova evidenciando a distribuição do gradiente de temperatura entre os materiais.....	77
Figura 44 - Progressão de temperatura alcançada ao longo do tempo pela técnica de soldagem prensagem a quente na superfície do compósito PEI-FV.....	78
Figura 45 - Distribuição do gradiente de temperatura na superfície do compósito PEI-FV na face de contato da junta no processo de soldagem por prensagem a quente.	79

Figura 46 - Fluxo de calor considerando a face de contato da junta do compósito PEI-FV no processo de soldagem por prensagem a quente.	80
Figura 47 - Detalhe da fratura da junta da amostra 01 soldada pelo processo de prensagem a quente.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Apresentação e designação comercial dos principais elementos de liga do Alumínio.....	29
Tabela 2 - Composição Química da Liga de Alumínio 2024-T3.	46
Tabela 3 - Propriedades Físicas da liga de Alumínio 2024-T3.	47
Tabela 4 - Propriedades físicas das fases constituintes do compósito.....	47
Tabela 5 - Medidas das camadas de reforço do compósito laminado.	50
Tabela 6 - Média das temperaturas medidas por minuto durante 15 minutos para calibração do sistema de controle eletrônico.	55
Tabela 7 - Graus de liberdade assumidos para o processo de simulação.	57
Tabela 8 - Dados de entrada utilizados na simulação do processo de soldagem por prensagem a quente.....	58
Tabela 9 - Distribuição dos tipos de elementos que formam o modelo.	59
Tabela 10 – Nova distribuição dos tipos de elementos que formam o modelo Soldagem Oxiacetileno.....	64
Tabela 11 - Distribuição dos tipos de elementos que formam o modelo.	65
Tabela 12 - Fluxo de calor nas camadas de reforço e matriz do compósito PEI-FV mais próximas da fonte de calor no processo de soldagem oxiacetilênica.	74
Tabela 13 - Fluxo de calor nas camadas de reforço e matriz do compósito PEI-FV durante processo de soldagem por prensagem a quente.	81
Tabela 14 - Comparação entre os processos de soldagem por oxiacetileno e prensagem a quente.	83

SUMÁRIO

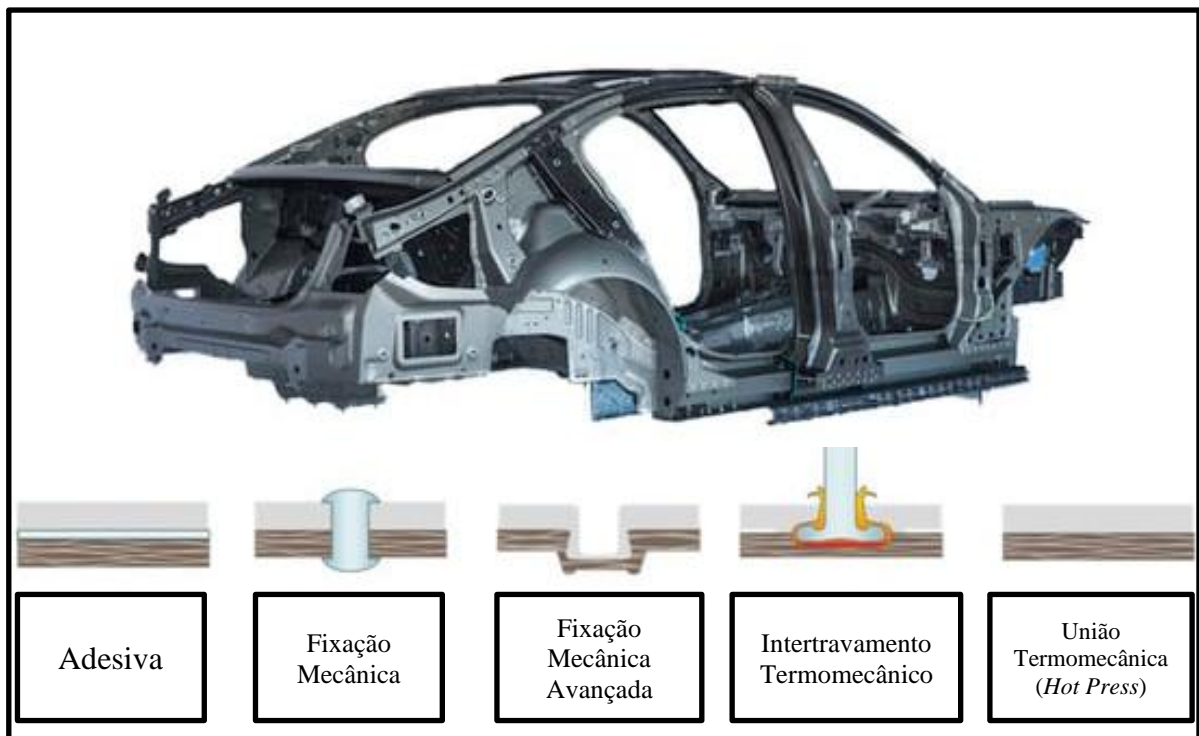
1	INTRODUÇÃO	14
2	PROPOSIÇÃO	18
2.1	PROPOSIÇÃO ESPECÍFICA.....	18
3	REVISÃO DE LITERATURA	19
3.1	COMPÓSITOS.....	19
3.1.1	Matrizes Termoplásticas	20
3.1.2	PEI - Poli (éter-imida) e Aplicações Industriais.....	21
3.2	TÉCNICAS DE UNIÃO PARA ESTRUTURAS DE MATERIAIS COMPÓSITOS.....	22
3.2.1	União Adesiva	22
3.2.2	União Mecânica.....	23
3.2.3	União de Estruturas Híbridas	26
3.2.4	Processos de união termomecânica	26
3.3	ALUMÍNIO	28
3.3.1	Ligas de Alumínio	28
3.3.2	Liga de Al 2024-T3	30
3.4	SOLDAGEM DE MATERIAIS.....	30
3.4.1	Soldagem de Compósitos	31
3.4.2	Soldagem da liga de Alumínio 2024-T3	32
3.5	SOLDAGEM DE JUNTA HÍBRIDA (COMPÓSITO-METAL)	33
3.5.1	Soldagem Oxi-gás para união de juntas compósito-metal	34
3.5.2	Soldagem por prensagem a quente (<i>Hot Press</i>)	36
3.6	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)	37
3.6.1	Modelagem de materiais compósitos com ANSYS	38
3.7	SIMULAÇÃO TÉRMICA COM ANSYS	39
3.7.1	Modos de transferência de calor.....	40
3.7.1.1	<i>Convecção</i>	41
3.7.1.2	<i>Condução</i>	41
3.7.1.3	<i>Radiação</i>	42
3.7.2	Tipos de análises térmicas no ANSYS.....	44
4	METODOLOGIA	46
4.1	MATERIAIS	46

4.1.1	PROGRAMA ANSYS	46
4.1.2	ALUMÍNIO 2024-T3	46
4.1.3	COMPÓSITO LAMINADO POLI(ÉTER-IMIDA) REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO (PEI/FV)	47
4.2	MÉTODOS.....	48
4.2.1	Caracterização Visual por Microscopia	48
4.2.2	Modelagem do sólido compósito com módulo ACP no ANSYS	50
4.2.3	União de junta híbrida compósito-metal	51
4.2.4	Simulação Térmica.....	57
4.2.4.1	<i>Condições de Contorno do modelo para processo de Oxiacetileno</i>	58
4.2.4.2	<i>Condições de contorno do modelo para processo de prensagem a quente</i>	64
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
5.1	ANÁLISE TÉRMICA NUMÉRICA DA SOLDAGEM OXI-GÁS	68
5.1.1	Gradiente de Temperatura	68
5.1.2	Fluxo de Calor	72
5.1.3	Validação do modelo com Ensaio Mecânico	74
5.2	ANÁLISE TÉRMICA NUMÉRICA DA SOLDAGEM POR PRENSAGEM A QUENTE.....	76
5.2.1	Gradiente de Temperatura	76
5.2.2	Fluxo de Calor	79
5.2.3	Validação do modelo.....	81
5.3	COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE SOLDAGEM POR OXIACETILENO E PRENSAGEM A QUENTE.....	82
6	CONCLUSÃO	84
6.1	CONTINUIDADE DO PROJETO.....	85
	REFERÊNCIAS.....	86
	DADOS CURRICULARES	92

1 INTRODUÇÃO

Compósitos termoplásticos e termoplásticos de alto desempenho são geralmente unidos a peças metálicas em montagens complexas (como uma carroceria de veículo ou a fuselagem interna de aeronaves). Assim, sistemas híbridos metal-compósito e metal-plástico estão envolvidos em muitas aplicações. A composição química, as propriedades mecânicas e as características físicas destes materiais diferentes muitas vezes tornam difícil a combinação entre eles. As tecnologias de união comumente utilizadas são a união adesiva e fixação mecânica e termomecânica, porém que envolvem algumas deficiências e desvantagens. Em contrapartida, outra técnica que se mostra mais atrativa é o estudo para união com base na aplicação de pressão em conjunto com a condução de temperatura entre as partes, o *hot press*, essas diferentes técnicas de união são ilustradas na Figura 1 (Lambiase, *et al.*, 2021).

Figura 1 - Técnicas de União para união de juntas híbridas metal-compósito.



Fonte: Lambiase, *et al* (2021).

Segundo Lambiase, *et al.*, (2021), a necessidade de pré-tratamentos na união adesiva para remoção de óleos, graxas, pó e óxido superficial, requerem o uso de processos longos e ambientalmente destrutivos, além de ser necessária a utilização de instrumentos específicos, como acessórios e gabaritos (especialmente elaborados e fabricados) para manter os componentes juntos durante o processo de cura. Ainda uniões adesivas são suscetíveis à

instabilidade a longo prazo, bem como à grave vulnerabilidade ambiental e apresentam alta sensibilidade à direção do carregamento.

Ressaltando que tanto a técnica de fixação mecânica quanto as uniões adesivas aumentam a massa total das estruturas. A produção do BMW I3, por exemplo, utiliza 16 kg de adesivo na estrutura de plástico reforçado com fibra de carbono (CFRP) e nos painéis plásticos da carroceria, o que reduz parcialmente a capacidade de redução de peso dos compósitos (Trask, 2012; Khosravani, 2019).

Os procedimentos de fixação mecânica geralmente requerem contatos pontuais, que resultam em concentração de tensão e interrupção das fibras nos compósitos. A adoção de um terceiro elemento inserido (como parafusos ou rebites) na fixação mecânica provoca excesso de peso e aumento de custos. Além disso, as conexões parafuso-porca podem envolver problemas relacionados ao afrouxamento da força de fixação devido à distribuição e concentração desiguais de tensões nas roscas. Finalmente, a fixação mecânica necessita de processos de fabricação e acabamento que prolongam o tempo geral de processamento (Zhou, 2015).

Outra solução aplicada para uniões híbridas de metal-compósito é o intertravamento termomecânico, que são processos que abrangem a auto-rebitagem por fricção, rebitagem por fricção, união baseada em modelagem de deposição fundida, soldagem por fricção e agitação, união por injeção, intertravamento por fricção e empilhamento de enchimento baseado em fricção. Este tipo de processo normalmente necessita de um alto grau de deformação termomecânica do material a ser unido para alcançar o intertravamento mecânico em escala macroscópica (Lambiase, *et al.*, 2021).

Por fim, outro método para este tipo de união de estruturas híbridas metal-compósito são os processos de união termomecânica difundidos como *hot press*. Esses métodos se caracterizam pelo princípio de intertravamento micromecânico, adesão ou ligações químicas na interface da junta, formadas por meio da aplicação de aquecimento e pressão de compressão na interface articular. Outros exemplos incluem a união direta a laser, soldagem ultrassônica, união por pontos de fricção, soldagem por fricção, união por prensagem a quente, união por pontos de resistência e moldagem por injeção. A principal diferença entre estas técnicas está em como o aquecimento e a pressão de compressão são gerados (Zhou, 2015).

Para qualquer técnica de união utilizada, o controle de parâmetros para garantir a qualidade das juntas produzidas é de suma importância, neste contexto as simulações numéricas têm se destacado como uma ferramenta essencial, favorecendo a compreensão dos mecanismos de interação térmica e mecânica envolvidos durante a soldagem. O Método de Elementos

Finitos (MEF) tem sido amplamente empregado na análise de comportamento dos materiais nesses processos, permitindo a avaliação da distribuição de temperatura, das tensões residuais e dos parâmetros de maior influência no processo. Assim, estudos recentes vêm explorando a modelagem de processos como soldagem por indução, fricção e ultrassônica, buscando aprimorar a compreensão das variáveis envolvidas e seu impacto na integridade estrutural das uniões (Gouin O'Shaughnessey, 2016; Mirlisenna, 2016).

As análises por MEF aplicado à união de materiais compósitos permutam pelos aspectos dos processos ao qual são submetidos. Em particular os modelos voltados para soldagem ultrassônica e por indução realizam uma análise simultânea da estrutura do material, incorporando os efeitos de convecção e radiação térmica, bem como as propriedades térmicas dos compósitos empregados (Ageorges, 2001; Gouin O'Shaughnessey, 2016).

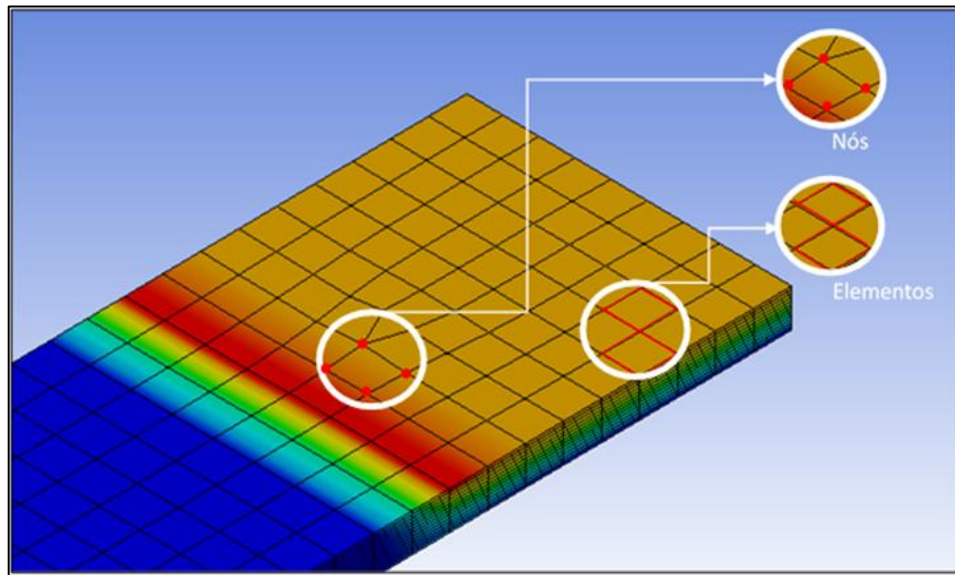
O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica numérica amplamente utilizada para obter soluções aproximadas de problemas que envolvem equações diferenciais. Essa metodologia consiste em discretizar o domínio do problema, subdividindo-o em pequenas regiões chamadas elementos finitos, o que permite simplificar e resolver sistemas complexos (Reddy, 2005; Mirlisenna, 2016).

Cada elemento é tratado individualmente, com as equações diferenciais sendo discretizadas e representadas em um conjunto de equações algébricas. Essas equações são posteriormente integradas para formar um sistema global, que é resolvido numericamente para fornecer as respostas desejadas (Mackerle, 2005; Mirlisenna, 2016; Reddy, 2005).

Os elementos finitos são interligados por nós ou pontos nodais, que servem como pontos de conexão entre os elementos. O conjunto formado por elementos e nós é denominado malha. Em geral, a precisão dos resultados aumenta conforme o número de nós e a quantidade de elementos na malha, já que uma malha mais refinada captura melhor os detalhes do domínio analisado (Mirlisenna, 2016; Reddy, 2005). Os elementos, nós e malha de uma estrutura analisada por MEF são ilustrados na Figura 2.

Esse método é importante na previsão, através de simulações, do comportamento de materiais e estruturas em condições específicas as quais podem ser submetidos, como aquecimento, por exemplo, realizando a análise de fenômenos físicos, como transferência de calor (Hassan, 2013).

Figura 2 - Exemplo de um componente estrutural sendo analisado por uma malha de MEF.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Sua utilização como ferramenta complementar de análise do processo de soldagem por prensagem a quente possibilita a simulação das condições térmicas durante o processo, tais como transferência de calor e mapeamento do gradiente térmico, sem a necessidade de produzir grandes quantidades de amostras físicas, contribuindo significativamente para a economia de materiais e tempo. Além disso, o uso de simulações numéricas reduz o número de experimentos práticos e minimiza a margem de erro no processo de união, tornando possível testar múltiplos cenários e ajustar variáveis como temperatura, pressão, potência e tempo de prensagem antes da implementação final. Desta forma, o MEF não apenas facilita a redução de custos, como também promove maior eficiência e precisão na união de materiais diferentes, otimizando tanto o desempenho quanto a resistência das juntas híbridas.

2 PROPOSIÇÃO

O objetivo deste estudo é mapear a distribuição térmica na junta híbrida durante o processo de união por condução térmica entre o compósito PEI/fibra de vidro e alumínio 2024-T3, com o intuito de se investigar os efeitos da temperatura nos materiais envolvidos no processo e otimizar o consumo de energia durante o procedimento.

2.1 PROPOSIÇÃO ESPECÍFICA

- Modelagem 3D do compósito termoplástico laminado poli(éter-imida) reforçado com fibras de vidro utilizando o módulo de processamento de compósitos, denominado *Ansys Composite PrepPost* (ACP) do programa ANSYS;
- Simulação numérica do processo de soldagem oxiacetilenica com dados obtidos experimentalmente, e de prensagem a quente com dados obtidos pela literatura para juntas híbridas de compósito PEI-fibra de vidro com alumínio 2024-T3.
- Mapeamento de distribuição de temperatura na região de união dos dois tipos de processo utilizado o Software ANSYS para modelagem numérica;
- Construção do protótipo da soldadora por prensagem a quente para obtenção de dados experimentais para simulação numérica mais eficiente.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 COMPÓSITOS

O ramo aeronáutico e automobilístico são grandes precursores no desenvolvimento de materiais compósitos aliados as técnicas variadas de união. Embora a aplicação de compósitos demande um alto custo de fabricação, apresenta ganhos significativos, tal como o aumento de carga transportada devido à redução de peso na estrutura das aeronaves e veículos (Lobão, 2015; Lambiase, *et al.*, 2021).

Os materiais compósitos podem ser definidos de uma forma geral como a combinação de dois ou mais materiais com propriedades químicas e físicas diferentes podendo claramente diferenciar suas interfaces. Quando o compósito é processado com eficiência, o material combinado resultante apresenta propriedades mecânicas e físico-químicas intermediárias entre os materiais que o constituem (Guimarães, 2018).

Um compósito comumente é formado por duas fases, sendo uma denominada da matriz e a outra de reforço. A matriz é a fase contínua responsável por manter a forma, posição e orientação, além de proporcionar ductilidade e tenacidade ao conjunto, proteger a outra fase de danos físicos e químicos, determinar a temperatura limite de serviço do material final e envolver o reforço sendo responsável por transferir as cargas. Já o reforço, que é o principal responsável pela resistência mecânica do material final, pode ser encontrado na forma de particulados, fibras unidirecionais, cabos e tecidos (Lobão, 2015; Guimarães, 2018).

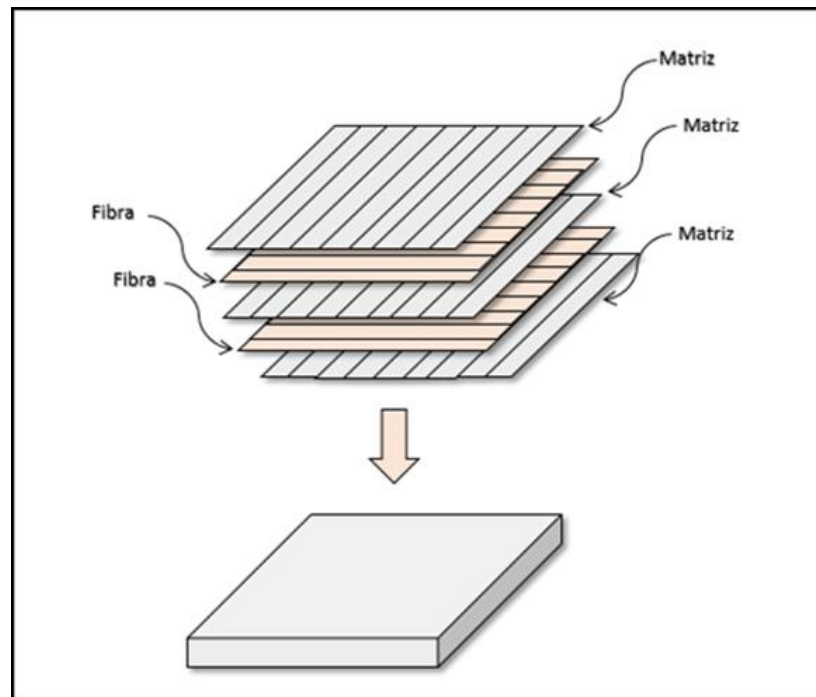
Para aplicações em estruturas mecânicas os compósitos reforçados com fibras são os mais utilizados, devido a sua alta resistência e alta rigidez em relação ao peso. A utilização de fibras contínuas em matrizes poliméricas permite o ganho da resistência proveniente dos materiais cerâmicos evitando o risco de uma fratura frágil. As fibras conduzem a uma fratura progressiva, não repentina (Lobão, 2015).

Dentre os diversos compósitos fibrosos aplicados nas indústrias, três merecem destaque, os com fibra de vidro (GFRP – *Glass Fiber Reinforced Polymer*), com fibra de carbono (CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer*) e com fibras de aramida (Lobão, 2015).

Os compósitos com matriz polimérica reforçados com tecidos de fibras podem ser classificados de acordo com o comprimento da fibra, podendo estas serem descontínuas ou contínuas. Além disso, em casos em que os compósitos são submetidos a solicitações multidirecionais, é comum posicionar as fibras em camadas sobrepostas, com diferentes orientações, denominado laminado multidirecional. As configurações mais adotadas para essas

camadas são $0^\circ/90^\circ$, como mostrado na Figura 3. As matrizes poliméricas desses compósitos podem ser classificadas em dois grandes grupos: termofixas e termorrígidas. Enquanto as matrizes termofixas oferecem elevada resistência térmica e estabilidade dimensional, as matrizes termoplásticas apresentam a vantagem de serem soldáveis por conta de suas características de amolecimento e fusão sob aquecimento, tornando-as apropriadas para processos de união térmica (Abrahão, 2015; Lobão, 2015).

Figura 3 - Organização das camadas de um compósito laminado.



Fonte: Lobão (2015).

3.1.1 Matrizes Termoplásticas

Apesar dos polímeros termorrígidos serem responsáveis pela maior demanda de matrizes para compósitos, principalmente com aplicações aeronáuticas e automobilísticas, a utilização de matrizes termoplásticas tem ganhado espaço como uma alternativa para aplicações estruturais, visto que possui diversas vantagens como maior tenacidade à fratura, maior resistência ao impacto, maior temperatura de serviço, menor absorção de umidade, maior tolerância a danos, menor custo de processamento em grande escala, menores custos de transporte e estocagem, maior facilidade na execução de reparos e maiores possibilidades de integração e de reciclagem de rejeitos (Abrahão, 2015; Lobão, 2015).

Diversos polímeros de última geração são utilizados na obtenção de compósitos termoplásticos destacando-se: poliamidas; poli-imidas; PEEK (poli(éter-éter-cetona)); PEI

(poli(éter-imida)); PPS (poli(sulfeto de fenileno)); PSU (polisulfona); dentre outros. Em meio a estes, as poli (éter-imidas) são boas candidatas como matriz impregnante de compósitos termoplásticos em função de seu custo, propriedades e facilidade de manuseio (Abrahão, 2015).

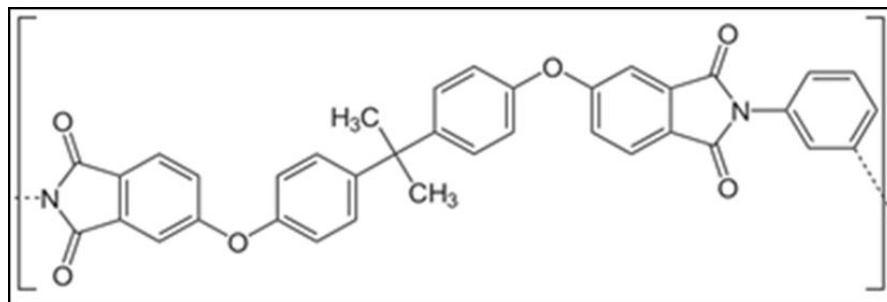
3.1.2 PEI - Poli (éter-imida) e Aplicações Industriais

O PEI (poli(éter-imida)) é um termoplástico, desenvolvido no ano de 1982 pela empresa *General Electrics Inc*, porém, já vinha sendo utilizado desde 1970. Este polímero consiste em um material amorfo, transparente e de coloração âmbar, com elevada temperatura de transição vítrea ($T_g \approx 260^\circ\text{C}$), sua resistência térmica mantém uma estabilidade em longos períodos a temperaturas de até 150°C , e possui uma faixa de manipulação acima de 400°C . Sua estrutura molecular contém anéis aromáticos, ligados por um ou dois átomos sem grupos parafínicos ou ramificações, o que garante uma alta energia de ligação entre suas moléculas e uma resistência mecânica aprimorada. A fórmula molecular da unidade de repetição de PEI é $\text{C}_{37}\text{H}_{24}\text{O}_6\text{N}_2$ e é apresentada na Figura 4 (Abrahão, 2015; Castman, 2005).

Dentre as principais vantagens do PEI, destacam-se:

- Elevada resistência mecânica em temperaturas elevadas;
- Boa resistência química e a corrosão;
- Propriedades retardantes de chama;
- Facilidade de processamento devido a sua flexibilidade molecular;
- Custo mais baixo em comparação a outros termoplásticos de alto desempenho;
- Isolamento elétrico eficiente, apresentando uma resistividade elétrica da ordem de $10^{15} \Omega\cdot\text{cm}$ (Abrahão, 2015).

Figura 4 - Fórmula molecular da unidade de repetição PEI.



Fonte: Abrahão (2015).

As propriedades e vantagens citadas tornam o PEI reforçado com fibras um compósito consolidado para aplicações industriais que exigem resistência térmica, mecânica e química. Sendo amplamente empregado nos setores aeroespacial, automotivo e energético, sendo essencial para o desenvolvimento de componentes estruturais leves e resistente. Suas aplicações variam desde peças aeronáuticas sujeitas a altas temperaturas até elementos automotivos expostos a cargas mecânicas severas (Reis, *et al*, 2020; Blanco, *et al*, 2022; Li, *et al*, 2024).

No contexto de métodos de união, além das técnicas tradicionais adesivas e mecânicas, o PEI tem mostrado também compatibilidade com técnicas como soldagem por resistência, ultrassom e indução, que eliminam a necessidade de adesivos e redução dos tempos de montagem. Inovações tecnológicas de processos, como a texturização a laser em superfícies metálicas, melhoraram a adesão por meio de microancoragens mecânicas, aumentando significativamente a resistência das uniões. Pesquisas demonstram que a aplicação dessas estratégias modernas produziu uniões com resistência mecânica superiores a 10 Mpa em aplicações estruturais, melhorando a tolerância a impactos e falhas interlaminares (Reis, *et al*, 2020; Blanco, *et al*, 2022; Li, *et al*, 2024).

3.2 TÉCNICAS DE UNIÃO PARA ESTRUTURAS DE MATERIAIS COMPÓSITOS

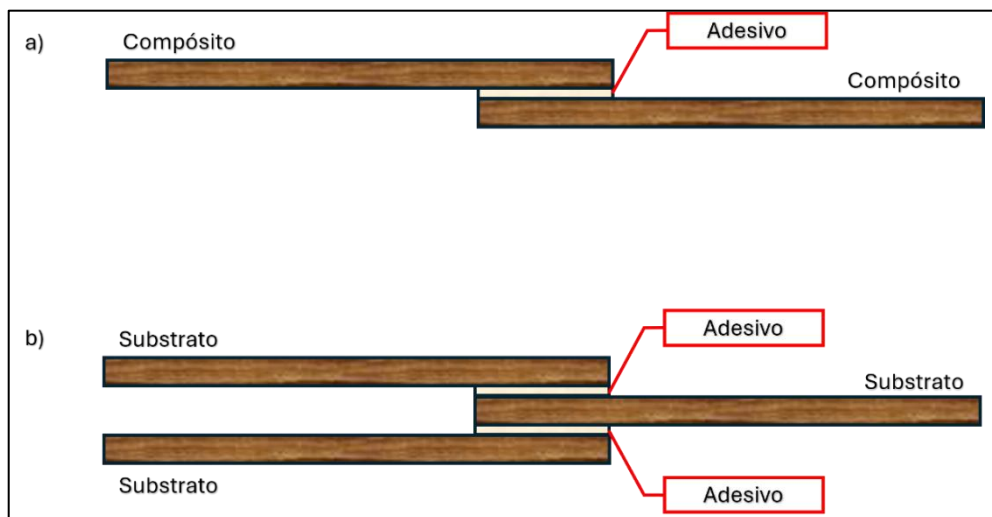
Conforme discutido por Amancio-Filho *et al.* (2009), as técnicas mais utilizadas para a união de componentes fabricados com compósitos reforçados com fibras de matrizes poliméricas incluem fixação mecânica, colagem adesiva e diferentes processos de soldagem. Além disso, a junção de técnicas tem ganhado relevância, como a combinação entre ligação adesiva e fixação mecânica ou a integração de soldagem com injeção de plástico em sobremoldagem sobre peças metálicas.

3.2.1 União Adesiva

Segundo Amancio-Filho *et al.* (2009), a técnica de união adesiva frequentemente utilizada na indústria consiste basicamente em quatro passos, preparação de superfície, aplicação do adesivo em uma ou ambas as partes, aplicação de contato das faces a serem unidas, processo de cura. A cura do adesivo resulta na formação da junta; sendo uma etapa que pode ocorrer tanto em temperaturas elevadas quanto em temperatura ambiente, levando aproximadamente duas horas.

Dentre as juntas produzidas por união adesiva, as de sobreposição simples e dupla são as mais comuns (Figura 5), sua resistência mecânica em geral, tratando-se de uma junta colada depende, em sua maioria, das propriedades do adesivo (resistência e ductilidade), mas a configuração da junta também desempenha um papel importante. Porém a distribuição de tensões cisalhantes em juntas sobrepostas coladas é desigual. O movimento entre as faces gera uma ação de flexão na junta, introduzindo componentes adicionais de tensão; e a distribuição de tensão ao longo da sobreposição não é uniforme, apresentando concentrações elevadas nas extremidades (Amancio-Filho, *et al.*, 2009; Baldan, 2004).

Figura 5 - Geometria de juntas de sobreposição coladas. a) Junta de sobreposição simples. b) Junta de sobreposição dupla.



Fonte: Baldan (2004).

Dentre os adesivos mais usados industrialmente estão os cianoacrilatos, os à base de silicone e os poliuretanos. Na indústria automotiva e ferroviária, as aplicações de união com adesivos vão desde partes decorativas até partes estruturais em polímeros, compósitos e ligas leves. Um exemplo representativo é o *Lamborghini Murciélago*, que possui peças de carbono/epóxi unidas a metais, como aço e ligas leves, em aplicações que incluem para-choques, para-lamas e capô, sendo essas junções cuidadosamente preparadas durante o processo de adesão (Amancio-Filho, *et al.*, 2009; Baldan, 2004).

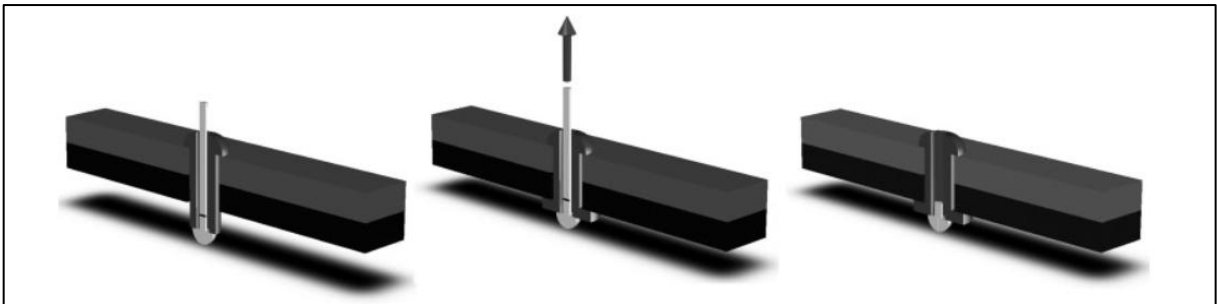
3.2.2 União Mecânica

As juntas formadas por materiais compósitos reforçados por fibras geralmente representam o ponto mais vulnerável de uma estrutura, determinando, assim, sua eficiência

estrutural como um todo. A união mecânica nesse tipo de configuração requer a realização de furos nas partes compósitas, o que resulta em concentração de tensão associada à presença dessas aberturas. No entanto, quando a desmontagem é necessária, a fixação mecânica apresenta vantagens significativas, permitindo a separação e a reciclagem de peças e fixadores de maneira mais prática em comparação com outros métodos de montagem (Amancio-Filho, *et al.*, 2009).

Diversos métodos de fixação mecânica para compósitos são abordados na literatura. De acordo com Amancio-Filho *et al.* (2009), destacam-se os parafusos autoatarraxantes, que pertencem ao grupo de fixadores reabreíveis e não dependem de uma rosca fêmea, e a fixação por pressão, na qual um dispositivo é projetado para criar um encaixe de interferência com o furo no compósito, como rebites (Figura 6).

Figura 6 - Esquema de rebiteagem cega.



Fonte: Amancio-Filho (2009).

No caso de materiais compósitos reforçados por fibras, o processo de perfuração exigido por algumas técnicas de fixação mecânica compromete a continuidade da fase de reforço, reduzindo a capacidade de carga do material e ocasionando danos como delaminação, arrancamento de fibras e microflambagem. Para mitigar esses efeitos, foram desenvolvidos métodos alternativos de união mecânica, incluindo a rebiteagem autoperfurante, a rebiteagem por fricção, o *clinch*, juntas de forma bloqueada não adesivas, juntas de pino e juntas de laço. Algumas dessas técnicas, como as juntas de forma bloqueada não adesivas, juntas de pino e de laço, não requerem a realização de furos no compósito já curado, preservando a integridade das fibras e evitando os danos induzidos pela perfuração. Em contrapartida, métodos como a rebiteagem e o *clinch* continuam a interferir significativamente na estrutura interna do compósito (Dawei, *et al.*, 2018; Galińska, 2020). No Quadro 1 uma comparação detalhada entre as principais técnicas de fixação mecânica abordadas na literatura, é apresentada.

Quadro 1 - Comparação de técnicas de fixação mecânica de juntas de compósitos reforçados com fibras.

	JUNÇÃO APARAFUSADA	REBITAGEM AUTOPERFORANTE	REBITAGEM POR FRICÇÃO	CLINCHING MECÂNICO	JUNÇÃO NÃO ADESIVA COM BLOQUEIO DE FORMA	PINO DE JUNÇÃO	JUNÇÃO DE LOOP
Possibilidade de desmontagem conjunta	Sim	Não	Não	Não	Sim	Não	Não
Danos e falhas induzidos pelo processo em material compósito	Significativo, mas possível de ser reduzido	Danos mecânicos significativos	Danos mecânicos e térmicos significativos	Danos mecânicos significativos	Sem danos	Baixo - falhas causadas por alinhamentos de fibras	Sem danos
Adequação para compósitos de matriz termofixa/termoplástica	Termoendurecível/termoplástico	Usado para ambos, mas devido às altas tensões compostas, é mais aconselhável para termoplásticos	Somente termoplástico	Usado para ambos, mas devido às altas tensões compostas, é mais aconselhável para termoplásticos	Termoendurecível/termoplástico	Somente termofixo	Somente termoplástico
Nível de desenvolvimento da técnica	Comumente usados em todos os ramos da indústria de compósitos	Usado com sucesso na indústria automotiva	Nível de teste de amostra. Considerado como um método de união de pontes de emergência compostas	Usado com sucesso na indústria automotiva	Usado com sucesso em planadores e motoplanadores	Nível de teste de amostra	Nível de teste de amostra. Inadequado para uso devido à falta de confiabilidade da técnica de junção no momento

Fonte: Galińska (2020).

3.2.3 União de Estruturas Híbridas

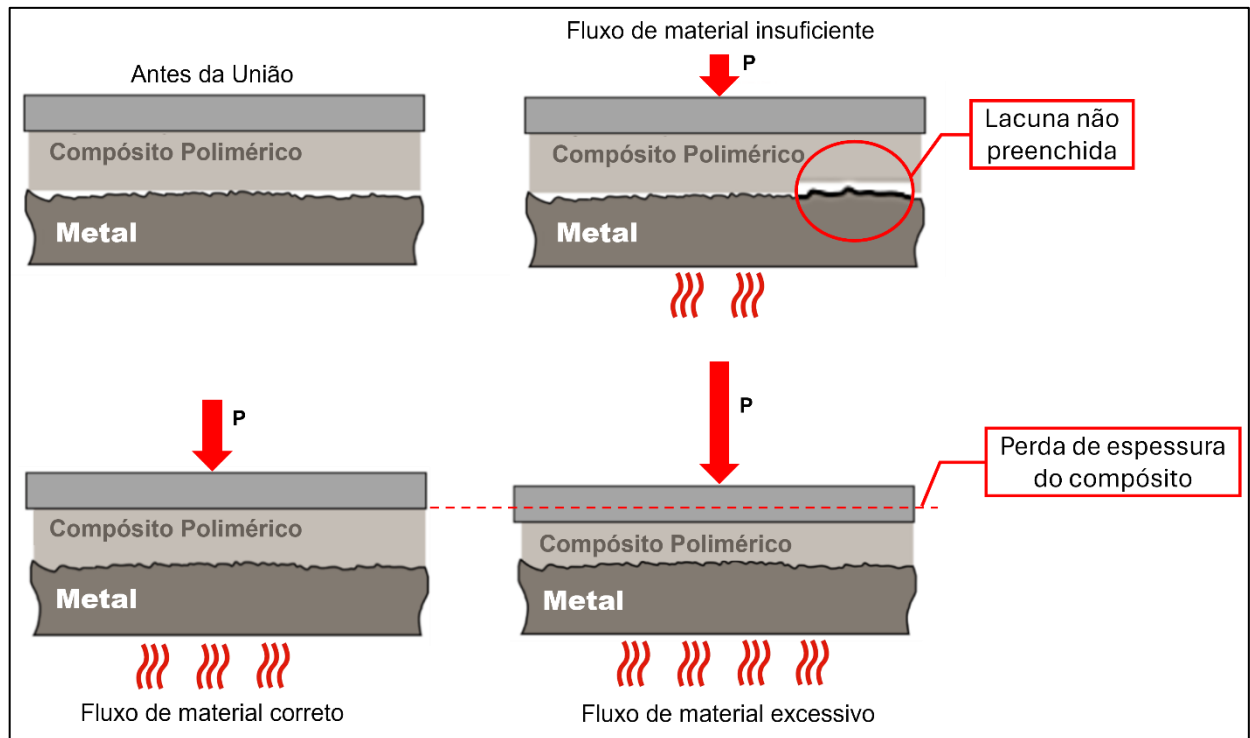
A união de estruturas híbridas compósito-metal acarreta desafios significativos devido às diferenças nas propriedades físico-químicas e mecânicas entre os materiais envolvidos, como no caso de compósitos reforçados por fibras e ligas de alumínio. Para este tipo de situação as técnicas amplamente empregadas na industrial atualmente são as citadas anteriormente. A fixação mecânica, embora facilite a desmontagem e reciclagem, frequentemente requer a perfuração do compósito, resultando na interrupção da continuidade das fibras, redução da capacidade de carga e ocorrência de danos como delaminação e microflambagem. Já a adesão com adesivos elimina a necessidade de furos e proporciona uma distribuição mais uniforme das tensões, permitindo a união eficaz de materiais dissimilares, mas exige preparação cuidadosa das superfícies e apresenta limitações em termos de desmontagem e sensibilidade térmica (Amancio-Filho, *et al.*, 2009; Dawei, *et al.*, 2018; Galińska, 2020).

Com intuito de sanar os problemas já mencionados, estudos recentes na área de uniões termomecânicas têm focado no desenvolvimento de métodos de soldagem para essas juntas, como a prensagem a quente, utilizando a condução térmica e pressão controlada. Essas técnicas buscam integrar o alumínio e compósitos, como o PEI reforçado com fibras por meio do intertravamento micromecânico e macromecânico, proporcionando maior eficiência estrutural e melhor resistência das juntas, destacando-se como alternativas promissoras para superar as limitações das abordagens tradicionais (Tolephih, *et al.*, 2020).

3.2.4 Processos de união termomecânica

A união termomecânica é um conceito que aborda técnicas que utilizam uma fonte externa de energia, como laser, fricção, indução ou ultrassom, para aquecer a interface da junta até uma faixa de temperatura ideal para união, combinada com a aplicação de pressão. O controle destes parâmetros é fundamental para formação de uma junta de qualidade, na Figura 7 é ilustrado como o uso de parâmetros errados alteram o comportamento dos materiais na interface de união. As técnicas de união termomecânicas minimizam a deformação das peças, e destacam-se por integrar intertravamentos micromecânicos e macromecânicos, interações físicas e ligações químicas na interface (Tolephih, *et al.*, 2020; Lambiase, *et al.*, 2021).

Figura 7 - Influência dos parâmetros de pressão e temperatura na interação dos materiais nos processos de uniões termomecânicas.



Fonte: Lambiase, *et al* (2021).

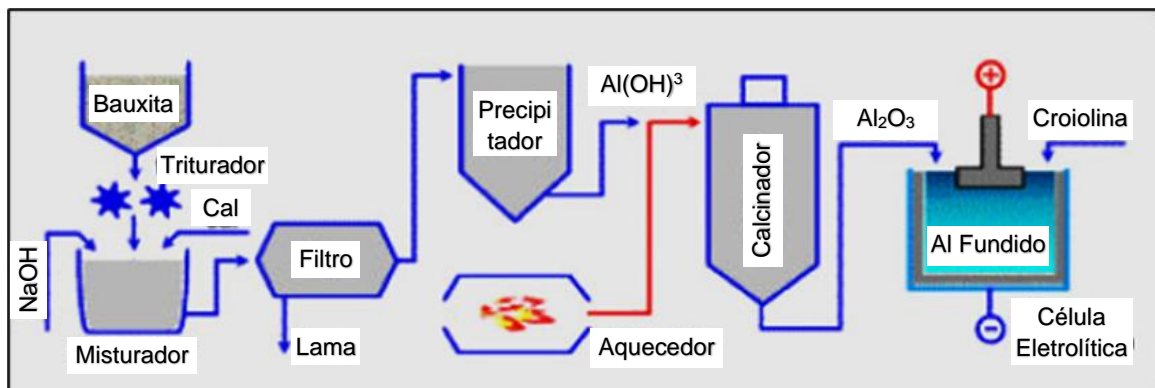
O intertravamento micromecânico ocorre por meio da deformação localizada do composto polimérico que envolve as fibras ou pelo preenchimento dos vazios (rugosidade) naturais ou artificiais na superfície metálica pelo polímero fundido. Já o intertravamento macromecânico pode ser promovido por texturas adequadas, como ranhuras e filmes porosos (tratamentos superficiais), que aumentam a adesão. Além disso, interações físicas, como forças de *Van der Waals*, ligações de hidrogênio e ligações químicas covalentes entre os materiais também colaboram para a robustez da junta (Lambiase, *et al.*, 2021; Tolephih, *et al.*, 2020)

A eficácia desses processos é influenciada por fatores como condições de superfície dos materiais, parâmetros operacionais e distribuição de temperatura. Estudos destacam que a otimização desses fatores, muitas vezes por meio de simulações numéricas como MEF, são essenciais para assegurar a qualidade e resistência da junta. As técnicas de união termomecânicas oferecem vantagens em relação à colagem adesiva, incluindo maior velocidade de processamento e capacidade de restauração de juntas danificadas (Jiménez, 2013; Lambiase, *et al.*, 2021).

3.3 ALUMÍNIO

O alumínio, assim como outros metais, não é encontrado diretamente em estado metálico na crosta terrestre, sua obtenção deve partir da mineração de um minério, a bauxita, e segue para as etapas posteriores de refinaria e redução, até por fim estar apropriado para utilização, como ilustrado na Figura 8. A bauxita é um minério encontrado em três grupos climáticos: Mediterrâneo, Tropical e Subtropical. Para ser economicamente viável para a produção de alumínio a bauxita deve apresentar no mínimo 30% de óxido de alumínio (Al_2O_3) (ABAL, 2024).

Figura 8 - Esquema de Produção do Alumínio.



Fonte: Mui (2016).

Outra forma de obtenção de alumínio é possível através da reciclagem de sucatas, um processo atualmente muito utilizado, visto que apresenta uma economia expressiva de energia e matéria prima, o que resulta em um aumento da produtividade, além da redução de detritos no meio ambiente. Este processo economiza até 95% da energia necessária para produzir alumínio a partir da mineração de matéria prima, a bauxita (ABAL, 2024; Mui, 2016).

3.3.1 Ligas de Alumínio

Na indústria aeroespacial, aeronáutica e automobilística é facilmente perceptível a evolução de materiais empregados na construção de aeronaves e veículos, como a adoção de ligas metálicas especiais, um exemplo são as ligas de alumínio que atualmente são amplamente utilizadas já que com a adição de outros elementos em sua matriz como Mg, Cu, Zn, Si, dentre outros, passam a reunir características mecânicas e químicas interessantes como a baixa densidade, boa ductilidade, eficiente condutividade térmica e elétrica, além de apresentarem

boa resistência mecânica e à corrosão. Alguns dos elementos mais utilizados como elementos de liga ao alumínio e suas designações comerciais são apresentados na Tabela 1 (ABAL, 2024; Lucas, 2022).

Tabela 1 - Apresentação e designação comercial dos principais elementos de liga do Alumínio.

PRINCIPAIS ELEMENTOS DE LIGA	DESIGNAÇÃO COMERCIAL
Al puro (pelo menos 99%)	1XXX
Cu	2XXX
Mn	3XXX
Si	4XXX
Mg	5XXX
Mg e Si	6XXX
Zn	7XXX
Fe e Ni	8XXX

Fonte: Lucas (2022).

A fim de melhorar mais as propriedades mecânicas do alumínio, estas ligas podem ser submetidas a tratamentos térmicos e/ou termomecânicos, que resultam na formação de microestruturas e propriedades mecânicas distintas. Estes tratamentos são padronizados pela norma ABNT NBR 6835:2000, as nomenclaturas e descrição de aplicação são apresentadas no Quadro 1 (ABAL, 2024; Lucas, 2022).

Quadro 2 - Nomenclatura de tratamentos térmicos ABNT NBR 6835 (2000).

NOMENCLATURA	COMO SE LÊ	DESCRIÇÃO
F	Como fabricada	Não possuem propriedades mecânicas especificadas, sendo atribuídas a produtos de processos de conformação que não têm controle especial sobre condições térmicas e/ou de encruamento
O	Recozida	Produtos acabados, que apresentam menor valor de resistência mecânica.
H	Encruada	Produtos que tiveram sua resistência mecânica aumentada através de deformação plástica a frio. A nomenclatura “H” deve sempre vir acompanhado de um ou dois dígitos.
W	Solubilizado	Ligas que envelhecem naturalmente à temperatura natural.
T	Tratado Termicamente	Aplicado em ligas para estabilizar a microestrutura (além da O), podendo a liga sofrer ou não tratamento mecânico. O “T” é seguido de um ou mais dígitos, sendo o primeiro indicando a sequência de tratamentos. Sendo essa classificação de 1 a 10

Fonte: Lucas (2022).

3.3.2 Liga de Al 2024-T3

Neste estudo foi aplicada a liga 2024-T3, que é amplamente utilizada para fabricação de estruturas leves e em veículos de transporte. A liga da série 2XXX apresenta boa resistência mecânica, porém sua resistência a corrosão fica comprometida por conta do elemento adicionado, o cobre, que favorece a formação de corrosão localizada tipo pite. Este fato tem impulsionado a utilização de ligas mais nobres das séries 6XXX/7XXX, porém que possuem um custo monetário mais elevado. Para contornar esse empecilho, são aplicados tratamentos superficiais ao alumínio, como o tratamento por oxidação eletrolítica a plasma (PEO) que vem sendo aplicado em estudos para, dentre outros, sanar esse problema (Reis, 2021; Lucas, 2022).

3.4 SOLDAGEM DE MATERIAIS

Dentre as técnicas de união utilizadas, a soldagem é considerada a mais eficiente para a união permanente de componentes. Este processo une materiais do mesmo tipo ou classe (como metais, cerâmicas ou polímeros) através da formação de ligações químicas primárias, ou

ocasionalmente secundárias, sob a ação combinada do calor e, por vezes, da aplicação de pressão. Diferentemente da colagem adesiva, a soldagem não requer uma reação química, baseando-se na tendência natural dos átomos, íons ou moléculas de se atraírem e se ligarem. As ligações formadas na região soldada são as mesmas presentes no material de base. Assim, a principal vantagem da soldagem é a produção de junções de alta integridade estrutural, eficiência e permanência (Messler, 2004; Reis, 2021).

No entanto, também existem desvantagens, como a alteração da composição e da microestrutura dos materiais decorrente do aquecimento, além da incapacidade de desmontar a junta sem danificar os componentes. A soldagem pode ser classificada em dois métodos: com fusão e sem fusão. Nos métodos por fusão, os materiais envolvidos, tanto o material de base quanto possivelmente um material de preenchimento, são aquecidos até sua temperatura de fusão, levando à formação da ligação e à solidificação da junta. Esses métodos dependem de temperatura elevada e de pressão para manter os elementos da junta em contato durante todo o processo de fusão e solidificação (Messler, 2004; Reis, 2021).

Por outro lado, nos métodos de não fusão, a formação da ligação e da junta é realizada sem depender da fusão, mistura e ressolidificação. Estes métodos dependem de pressão ou fricção para causar a ligação no estado sólido por meio de deformação plástica macroscópica ou microscópica. A interdifusão no estado sólido também é crucial para a boa formação da ligação e da junta (Messler, 2004; Reis, 2021).

A soldagem, comumente referida como "ligação térmica" pelos engenheiros de polímeros, é amplamente empregada atualmente para unir com sucesso compósitos poliméricos termoplásticos (Messler, 2004; Reis, 2021).

3.4.1 Soldagem de Compósitos

A soldagem de compósitos poliméricos reforçados com fibras é um campo de estudo amplamente explorado atualmente, com cada técnica oferecendo vantagens e parâmetros de controle específicos. A soldagem por indução contínua proporciona aquecimento rápido através do aquecimento volumétrico intrínseco dos aderentes, resultando em melhorias na estrutura do laminado, nos sistemas de resfriamento e nas fases de consolidação (Yousefpour, 2012).

A soldagem por fricção e agitação (FSW) e suas variantes, como a soldagem por fricção por ponto (FSSW) e a soldagem por ponto por fricção com recarga (RFSSW), são eficazes para compósitos poliméricos reforçados com fibras, com parâmetros como velocidade

de rotação e profundidade influenciando significativamente o processo. Essas técnicas de soldagem por fricção são utilizadas para unir compósitos reforçados com fibras a materiais metálicos, onde parâmetros como velocidade de rotação e tempo são cruciais para a obtenção de juntas bem-sucedidas. A soldagem ultrassônica (USW) também é um método econômico para unir compósitos termoplásticos reforçados com fibra, focando na soldabilidade, qualidade e mecanismos subjacentes na formação das juntas (Rogalski, 2019).

O uso dessas técnicas demonstra a versatilidade e a eficácia dos métodos de soldagem para compósitos poliméricos reforçados com fibra, contribuindo para suas amplas aplicações em diversos setores.

3.4.2 Soldagem da liga de Alumínio 2024-T3

O alumínio e suas ligas apresentam características físicas que influem diretamente em sua soldabilidade. Dentre as várias ligas já citadas, a liga leve de alumínio 2024-T3 se trata de uma liga com elevada resistência mecânica, maior dureza e resistência à tração em relação ao alumínio puro e, também, com alta resistência específica, que é a razão entre sua resistência e peso. Contudo, de acordo com a literatura a soldagem do alumínio e suas ligas apresentam desvantagens, das quais pode-se citar três que são de grande impacto:

- A fusão e o aquecimento parcial das ligas de alumínio são difíceis, por sua alta condutibilidade térmica e pelo alto valor de seu calor específico;
- O alumínio e suas ligas são facilmente oxidáveis e seu óxido, Al_2O_3 , tem um alto ponto de fusão.
- Formação de trincas e a degradação das propriedades mecânicas na zona afetada pelo calor.

A soldagem da liga 2024-T3 é crucial para as indústrias de alta tecnologia, contribuindo com componentes mais leves e resistentes, melhorando a eficiência de combustível e o desempenho dos veículos e aeronaves. Técnicas avançadas que evitam a fusão completa do metal reduzindo trincas e mantendo boas propriedades mecânicas, estão sendo estudadas para superar os desafios de soldagem dessa liga (Reis, 2021; Reis, *et al*, 2021; Lucas, 2022).

3.5 SOLDAGEM DE JUNTA HÍBRIDA (COMPÓSITO-METAL)

A união de compósitos poliméricos reforçados com fibras a metais por meio de processos de soldagem é um campo de estudo aplicável a diversos setores, como automotivo e aeroespacial. Técnicas variadas como soldagem por resistência elétrica, soldagem por ponto com recarga por fricção, soldagem ultrassônica e rebitagem automática por fricção, são amplamente exploradas para criar conexões robustas e específicas entre materiais dissimilares (Qu, 2020).

Contudo um dos principais problemas na utilização de dois materiais tão distintos em aplicações estruturais de qualquer dimensão consiste exatamente em sua união efetiva para a junção de componentes. Devido às grandes diferenças físicas e químicas entre os compósitos poliméricos e os metais, a colagem adesiva, a conexão mecânica e a união dessas duas técnicas são frequentemente utilizadas para unir esses dois materiais, porém a tecnologia de soldagem tem sido amplamente estudada para ser utilizada na união de materiais dissimilares sem a necessidade de um terceiro material/elemento na junta (Qu, 2020).

De acordo com Mitschang (2013), dependendo das combinações de materiais, pré-tratamento e método de teste, pode-se alcançar valores de resistência à tração e cisalhamento da ordem de 4 a 25 MPa, algumas das técnicas para soldagem de materiais dissimilares e valores de resistência a tração são descritas no Quadro 3.

Quadro 3 - Técnicas de Soldagem para união híbrida entre materiais dissimilares.

Processo de Manufatura	Material 1	Material 2	Pré-tratamento	Método de Teste	Resistencia a Tração (MPa)
Prensagem a Quente	Al 6061-T6	PP	Metal: Anodizado em ácido fosfórico PP: Plasma	ASTM 3163	19
Soldagem por Resistência	Al 7075-T6	PEEK/FC	Metal: Limpeza com tricloroetano, anodização em H ₃ PO ₄ Revestido com PEI	ASTM 3163	Até 20
Ligação Térmica com PEKEKK	Ti-6Al-4V	PEKEKK	Jateamento com grão 60 Al ₂ O ₃ e anodização em NaOH	Barra com Ø 19 mm	95–130
Ligação Térmica	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V	Filme de PPQ, GF/PEI, PEI e PES	ASTM D-1002	17–34
Colagem Térmica com (Poli)imida 422	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V	Filmes de (Poli)imidas	ASTM D-1002	30–41
Ligação Térmica	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V	Ti: ácido nítrico-fluorídrico e ácido crômico anodizado Al: FPL bem como jateamento, ácido crômico, com e sem primer	ASTM D-1002	44–55
Soldagem por Indução	Al 2024-T3	PEEK/FC	Metal: decapagem em ácido crômico	ASTM D-1002	31–33
Dobra Térmica PEEK	DC01	DC01	Metal: Tratamento com acetona, jateamento, polimento	DIN EN 1465	20–45

Fonte: Velthuis (2007).

3.5.1 Soldagem Oxi-gás para união de juntas compósito-metal

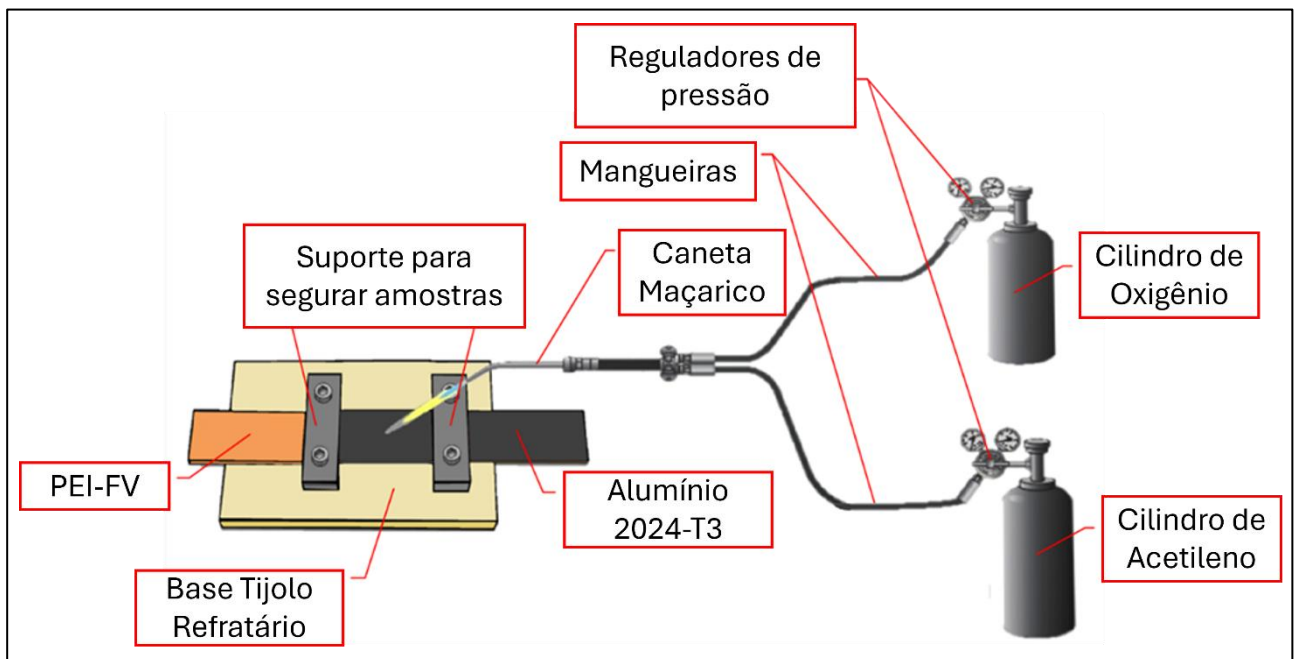
A abordagem de uma junta híbrida (compósito-metal) formada utilizando a técnica de soldagem com oxi-gás fornece a possibilidade de uma união que agrega boa rigidez, com baixa massa específica e sem a necessidade de um terceiro material que fique permanente na junta após o processo de soldagem, características que são atraentes (Reis, *et al*, 2021).

Na literatura, as informações sobre soldagem híbrida metal/compósitos utilizando essa técnica ainda são bastante escassas, devido a diversas complicações que ocorrem durante o processo, como o controle de temperatura da chama dentro do limite de trabalho de

compósitos termoplásticos (210 °C ~ 220 °C, no caso do PEI). No entanto, estudo visando a viabilidade desta soldagem em materiais compósitos foram surgindo em meados de 2015 (Abrahão, 2015; Reis, 2021; Marques, 2020; Reis, *et al*, 2021).

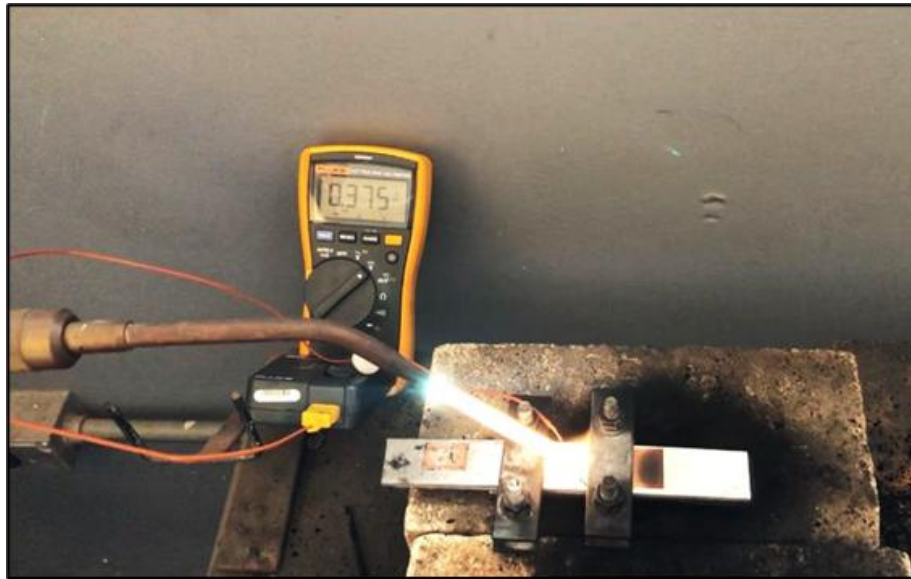
Levando em conta as particularidades de soldabilidade dos dois materiais, foi adotado um sistema para soldagem oxiacetilênica normalmente composto por um cilindro de acetileno, que é o combustível para a chama de soldagem; um cilindro de oxigênio, necessário para a combustão do acetileno; reguladores de pressão; mangueiras de gases; maçarico de soldagem, onde as mangueiras se conectam e onde os gases se misturam antes de serem queimados; e o bico de soldagem, são responsáveis por criar a chama. Existem bicos de diferentes tamanhos para diferentes aplicações. As amostras são montadas sobre um tijolo refratário, presas por dois suportes um de cada lado, de forma que a parte de metal (alumínio) fique na parte superior recebendo a chama e o compósito polimérico fique na parte inferior, como ilustra a Figura 9. O processo de união real com aferição de temperatura, por meio de um termopar tipo K, na junta soldada é apresentado na Figura 10. (Reis, *et al*, 2021)

Figura 9 - Aparato para soldagem oxiacetilênica de materiais dissimilares.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 10 - Soldagem híbrida (compósito-metal) com aferição de temperatura na junta.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

3.5.2 Soldagem por prensagem a quente (*Hot Press*)

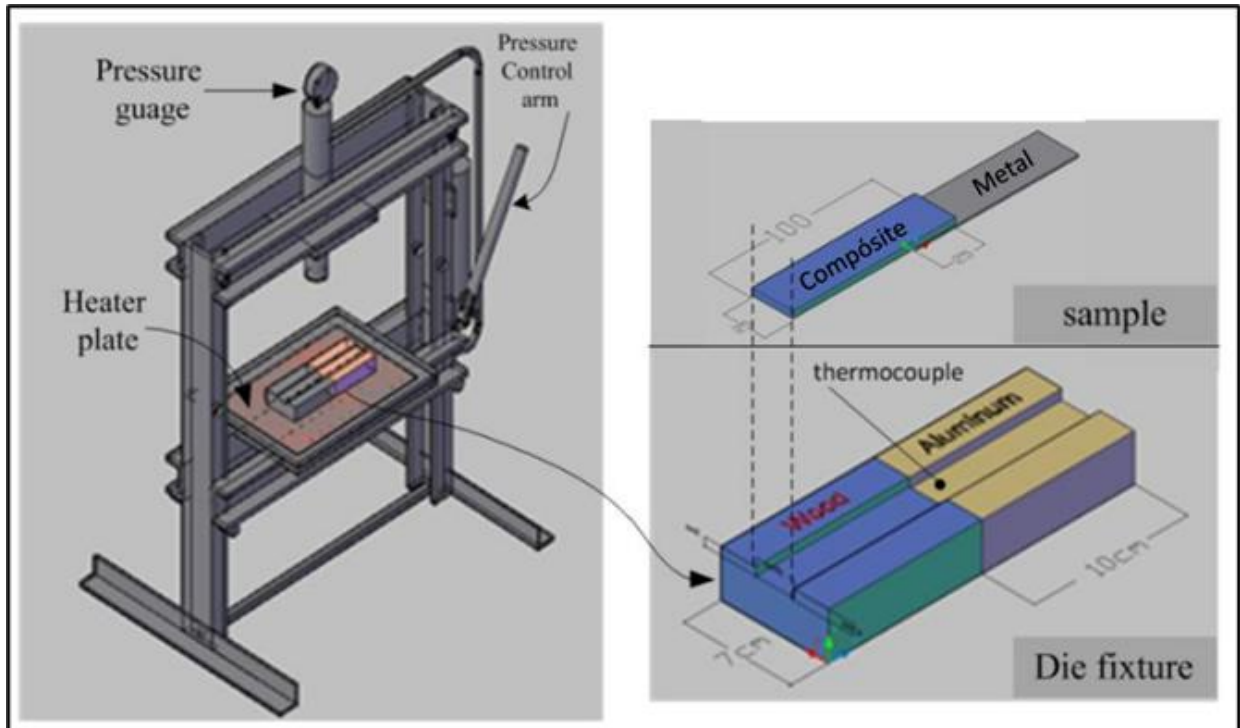
A soldagem *hot press*, também conhecida como soldagem por prensagem a quente, é um método de união de materiais que utiliza calor e pressão. Neste processo, aplicado a soldagem para união de juntas de mesmo material, as superfícies dos materiais a serem unidos são comprimidas juntas enquanto são aquecidas até um ponto em que suas superfícies se fundem e formam uma ligação consistente, ou no caso de materiais dissimilares, uma das partes chegue ao ponto de fusão promovendo a ancoragem mecânica (Zhang, 2023).

Esta técnica também pode ser aplicada a união de juntas híbridas, metal-compósito, pois é concretizada pela condução térmica provida da parte metálica para o compósito termoplástico, que é aquecido até uma temperatura de transição vítrea (T_g), onde ocorre o relaxamento das cadeias poliméricas e quebra das ligações químicas secundárias (Van Der Waals) gerando o amolecimento da matriz polimérica. A união é efetivada através da difusão das cadeias poliméricas entre as interfaces em contato e sob pressão até a solidificação da matriz polimérica por resfriamento, aderindo à superfície metálica. Um exemplo de aparato utilizado para esta técnica de união híbrida é ilustrado na Figura 11 (Tolephih, *et al*, 2020).

Por conta de a temperatura atingida não ser suficiente para a fusão do componente metálico, essa união é caracterizada em suma pelo intertravamento micro e macro mecânico,

visto que a matriz quando amolecida escoia pelos picos e vales de rugosidade superficial do componente metálico (Hussein, 2017).

Figura 11 - Aparato para união *hot press* de metal-compósito.



Fonte: Hussein (2017).

3.6 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

O método de elementos finitos (MEF) se tornou familiar nos últimos anos e agora é a base de uma indústria multibilionária anual. Utilizando MEF é possível obter uma solução numérica para diversos tipos de problemas de projeto muito complicados (Hassan, 2013).

De acordo com D. Roylance (2001), os códigos de elementos finitos são menos complicados do que muitos dos programas de processamento de dados atualmente encontrados nos computadores modernos. Porém, eles são complexos o suficiente para que a maior parte dos usuários os considere difíceis de programar, pois trata-se de um procedimento numérico focado na solução aproximada de problemas sobre contorno de equações diferenciais. Este método divide um problema numérico em partes menores denominadas de elementos finitos.

Essa segregação em subelementos permite uma análise mais precisa de concentração de tensões; propriedades distintas em materiais dissimilares e representação de geometrias complexas. O método trata cada subdomínio (subelemento) como uma

representação conjunta de equações. Assim, os subdomínios são recombinaados, recombinaando todos os conjuntos de equações em um sistema denominado sistema global onde são aplicadas as técnicas de soluções para obter-se respostas numéricas (Mackerle, 2005; Mirlisenna, 2016; Reddy, 2005).

Atualmente existem uma variedade de programas destinados a realizar este tipo de método de análise, o programa ANSYS é um deles. Sendo um software de simulação de engenharia amplamente utilizado que a partir do método de elementos finitos pode resolver uma variedade de problemas de engenharia. Ele é usado para modelar e simular o comportamento de estruturas, fluidos, calor, eletricidade, entre outros. É comumente utilizado em setores como aeroespacial, automotivo, eletrônica e muitos outros para otimizar o desempenho e a eficiência de sistemas e componentes (Santos, 2022).

3.6.1 Modelagem de materiais compósitos com ANSYS

De acordo com Santos (2022), a modelagem de materiais compósitos no programa Ansys, é feita a partir da utilização do modulo de ACP (*Ansys Composites PrepPost*). Essa ferramenta possui uma vasta biblioteca de materiais com suas propriedades (como módulo de elasticidade, espessura, entre outros), além de permitir que novos materiais sejam adicionados e caracterizados conforme as necessidades da análise a ser realizada e possibilitar que durante a modelagem da estrutura se possa especificar orientações das fibras em cada camada formada com a matriz (ANSYS, 2013).

Pode-se separar o método de desenvolvimento e análise de um modelo no modulo ACP em 3 etapas, modo de pré-processamento, análise e pós-processamento. No modo de pré-processamento, todas as definições estruturais do compósito são criadas e mapeadas para a geometria (malha FE). Essas definições compostas são transferidas para o modelo FE e o arquivo de entrada do solucionador, sendo direcionado para as condições de análise. No modo de pós-processamento, após a solução concluída e a importação dos arquivos de resultados, os resultados de pós-processamento (falha, segurança, deformações e tensões) podem ser avaliados e visualizado no sólido completo ou ainda individualmente em cada camada ou fase com material compósito (ANSYS, 2013).

3.7 SIMULAÇÃO TÉRMICA COM ANSYS

Modelos numéricos empregados em simulações térmicas apresentam uma menor complexidade em relação aos modelos para análises estruturais devido a características físicas dos fenômenos estudados. Dado que, nas simulações térmicas, as malhas numéricas têm apenas um grau de liberdade por nó, que é a temperatura, a quantidade de equações a serem resolvidas é, portanto, menor em comparação com uma malha estrutural que possui a mesma quantidade de elementos. Nessa malha estrutural, cada nó apresenta três ou até seis graus de liberdade, incluindo translações e rotações em elementos de casca ou viga. Logo mesmo uma malha tendo elementos considerados “grandes”, consegue-se obter resultados de boa qualidade, visto que essa condição exibe um comportamento de condução linear e devido ao fato de que os elementos não sofrem deformações em uma análise puramente térmica (Silva, 2020).

A simulação térmica no ANSYS utiliza uma abordagem de elementos finitos fundamentada na equação de balanço de calor, derivada do princípio de conservação de energia, as equações utilizadas para essa análise são:

- Equação de Balanço de Calor:

Considera a conservação de energia térmica e pode ser expressa na forma diferencial geral como:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + Q \quad (1)$$

Sendo:

ρ a densidade do material;

c a capacidade térmica específica;

T a temperatura;

t o tempo;

k a condutividade térmica do material;

Q a taxa de geração de calor interno por unidade de volume;

∇ o operador divergente do gradiente, que representa a taxa de fluxo de calor que entra ou sai de um ponto.

- Equação de Condução Transiente:

Em problemas de regime transiente, onde a temperatura varia com o tempo, a equação de condução de calor é usada na forma transiente:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (2)$$

A Equação 2, é uma forma da equação de balanço de calor, porém é adotada em situações em que a temperatura varia com o tempo. No ANSYS, essas equações são discretizadas através do método dos elementos finitos, que divide o problema em elementos menores para facilitar a solução numérica. O sistema de equações lineares resultante é resolvido para calcular as temperaturas em cada nó da malha. A partir dessas temperaturas nodais, o software também determina outras propriedades térmicas, como fluxos de calor e gradientes de temperatura (ANSYS, 2005).

3.7.1 Modos de transferência de calor

Uma análise térmica calcula a distribuição de temperatura e os valores térmicos relacionados em um sistema ou componente. Comumente as propriedades térmicas típicas de interesse são:

- As distribuições de temperatura;
- A quantidade de calor perdido ou ganho;
- Gradientes térmicos;
- Fluxos térmicos.

As simulações térmicas desempenham um papel importante na elaboração de vários projetos de engenharia, como aplicações em muitos ramos da indústria, incluindo motores de combustão interna, processos de soldagem, turbinas, trocadores de calor, tubulações sistemas e componentes eletrônicos (Jiménez, 2013).

Compreender fenômenos térmicos utilizados nas simulações é essencial, o ANSYS utiliza três modos de transferência de calor: convecção, condução e radiação. Cada um desses mecanismos contribui de forma distinta para a transferência de energia térmica nos sistemas analisados (ANSYS, 2005; Jiménez, 2013).

3.7.1.1 Convecção

O modo de transferência de calor por convecção pode ser entendido como uma carga superficial aplicada em elementos sólidos condutores ou elementos de casca. É especificado o coeficiente do filme de convecção e a temperatura numa superfície; o programa então calcula a transferência de calor apropriada através dessa superfície. Se o coeficiente do filme depender da temperatura, deve ser especificada uma tabela de temperaturas juntamente com os valores correspondentes do coeficiente de filme em cada temperatura. (ANSYS, 2005; Jiménez, 2013) Em regimes de análise de convecção de calor a modelagem associa à movimentação de fluidos devido a efeito gravitacional ou escoamento é realizada através da lei de resfriamento de Newton:

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad (3)$$

Sendo:

q a taxa de transferência de calor por unidade de área;

h o coeficiente de transferência de calor convectivo;

T_s a temperatura da superfície;

T_∞ a temperatura do fluido longe da superfície.

Para uso em modelos de elementos finitos com elementos de barra de condutores (que não permitem carga superficial de convecção), ou em casos onde a temperatura do fluido não é conhecida, o ANSYS oferece dados de condições genéricas, considerando casos simplificados, como trocas de calor com o ar ambiente, permitindo simular detalhes de um processo de convecção, como fluido, velocidades, valores locais de coeficiente de filme e fluxo de calor e distribuições de temperatura em regiões fluidas e sólidas (ANSYS, 2005; Jiménez, 2013).

3.7.1.2 Condução

O programa ANSYS é preparado para avaliar diversas condições de condução de calor, sendo de modelos em 2D ou 3D, pois leva em consideração o modo de ligação dos elementos considerados durante a condução. Dependendo do modelo a simular, é utilizado um ou outro modo de ligação diferente, isso se define em grande parte com relação a geometria que

o sólido ou a seção transversal possui. Como exemplo, pode-se citar o modelo de ligação *LINK32* que é usado como modelo de condução ao longo de uma barra, é composto por 2 nós para situações espaciais em 2D. (ANSYS, 2005; Jiménez, 2013)

Para análise de condições envolvendo condução de calor o ANSYS caracteriza fluxos térmicos através da matéria, portanto utiliza a lei de Fourier em forma diferencial, expressa por:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = Q + (K \nabla T) \quad (4)$$

Sendo:

Q o vetor de fluxo de calor;

K a condutividade térmica do material;

∇T o gradiente de temperatura.

Além disso, há uma grande variedade de Links que são usados com sólidos 2D e 3D, modelos térmicos e elementos planos, como: *PLANE35*, *PLANE55*, *PLANE78*, *SOLID70*, *SOLID877*, *SHELL57*, *PLANE 75* *PLANE77*, *SOLID90*, são os mais comuns e assim por diante. (ANSYS, 2005; Jiménez, 2013)

3.7.1.3 Radiação

A radiação térmica é a energia emitida pela matéria na forma de ondas eletromagnéticas, devido à presença de energia térmica em toda matéria com uma temperatura acima do zero absoluto. A radiação térmica se propaga com ou sem a presença de matéria, como através no vácuo do espaço (Hassan, 2013; ANSYS, 2005; Jiménez, 2013).

O programa ANSYS trata a radiação térmica pela lei de Stefan-Boltzmann para superfícies emissoras:

$$q = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (5)$$

Sendo:

q a taxa de transferência de calor por unidade de área;

ϵ a emissividade da superfície;

σ a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma \approx 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$);

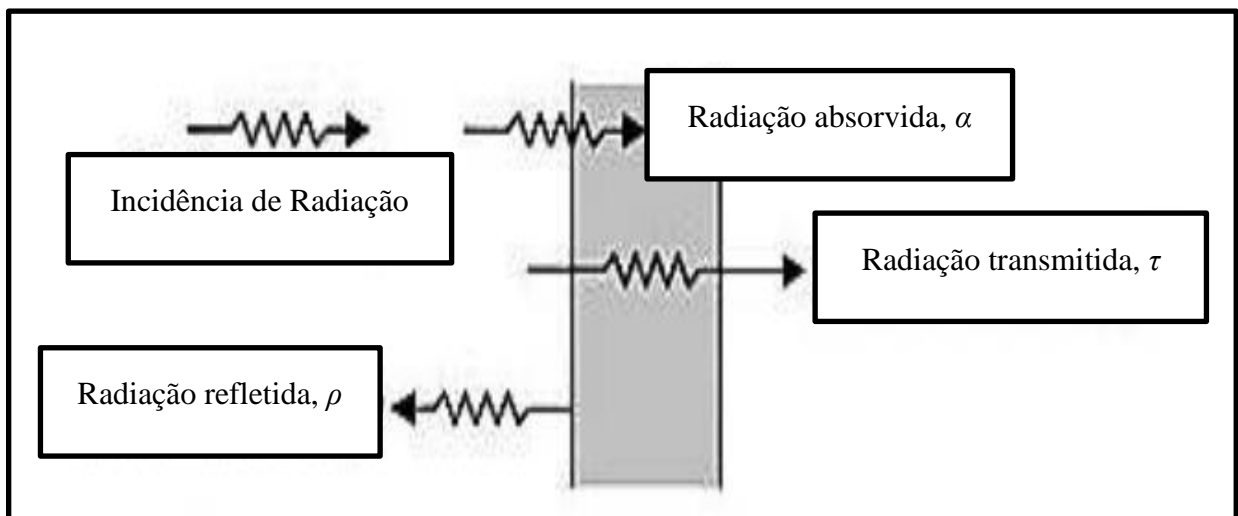
T_s a temperatura da superfície;

T_{amb} a temperatura ambiente.

A emissão de radiação térmica decorre diretamente das movimentações aleatórias de átomos e moléculas presentes na matéria. Uma vez que esses átomos e moléculas são compostos por partículas carregadas (prótons e elétrons), seus movimentos resultam na emissão de radiação eletromagnética, que transporta energia para longe da superfície (Hassan, 2013; ANSYS, 2005; Jiménez, 2013).

Todos os corpos irradiam energia na forma de fótons movendo-se em direções, fases e frequências aleatórias. Quando os fótons irradiados atingem outra superfície, eles podem ser absorvidos, refletidos ou transmitidos, como ilustrado graficamente pela Figura 12.

Figura 12 - Emissão e absorção de radiação de energia entre corpos.



Fonte: Jiménez (2013).

O comportamento de uma superfície com radiação incidente pode ser descrito pelas seguintes grandezas:

α = absorvância - fração da radiação incidente absorvida;

ρ = refletância - fração da radiação incidente refletida;

τ = transmitância - fração da radiação incidente transmitida.

3.7.2 Tipos de análises térmicas no ANSYS

Além dos modos de transferência de calor, o programa permite levar em conta efeitos como mudança de fase (derretimento ou congelamento) e geração de calor interno (devido ao efeito Joule), como também fases de aquecimento dependendo do tempo. Logo o programa ANSYS é capaz de trabalhar com dois tipos de análises térmicas, em estado estacionário e em estado transitório (ANSYS, 2005; Jiménez, 2013).

- *Steady-State Thermal Analysis:*

Uma análise térmica em estado estacionário tem por objetivo determinar a distribuição de temperatura e outras propriedades térmicas em condições de carga constante, nas quais os efeitos de armazenamento de calor que variam ao longo do tempo podem ser desconsiderados (ANSYS, 2005).

Este tipo de análise calcula os efeitos de cargas térmicas constantes em um sistema ou componente. Usualmente realiza-se uma análise em estado estacionário antes de realizar uma análise térmica transitória para ajudar a estabelecer as condições iniciais de um processo de aquecimento. Além disso, uma análise em estado estacionário pode ser o último passo de uma análise térmica transitória, realizada após todos os efeitos transitórios terem diminuído (ANSYS, 2005; Jiménez, 2013).

Também é possível utilizar uma análise térmica em estado estacionário para determinar temperaturas, gradientes térmicos, taxas de fluxo de calor e fluxos de calor em um objeto causados por cargas térmicas que não variam ao longo do tempo. Essas cargas incluem:

- Convecção;
- Radiação;
- Taxas de fluxo de calor;
- Fluxos de calor (fluxo de calor por unidade de área);
- Taxas de geração de calor (fluxo de calor por unidade de volume);
- Limites de temperatura constantes.

Uma análise térmica em estado estacionário pode ser linear, com propriedades do material analisado sendo constantes, ou não linear, com propriedades dependentes da temperatura. A maioria dos materiais tem propriedades térmicas que variam com a temperatura, tornando a análise geralmente não linear. A inclusão de efeitos de radiação também torna a análise não linear.

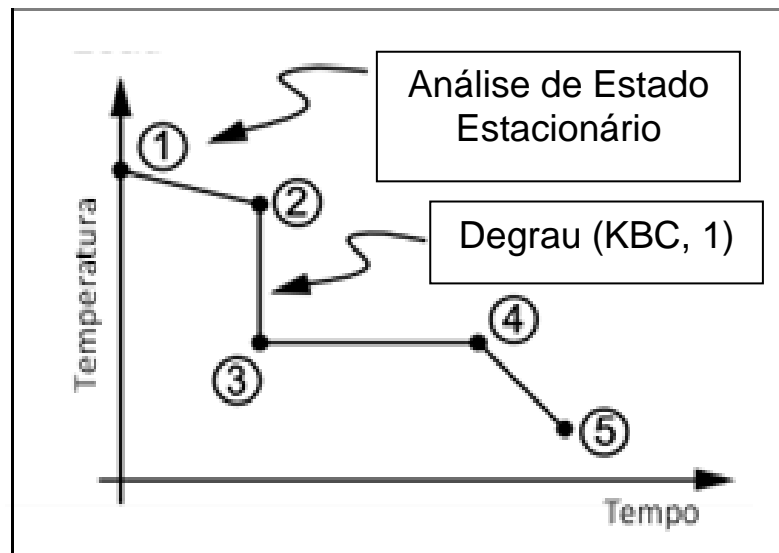
- *Transient Thermal Analysis:*

A análise térmica transitória determina as temperaturas e outras propriedades térmicas que variam ao longo do tempo. Na engenharia frequentemente utilizam as temperaturas calculadas por meio da análise térmica transitória como entrada para avaliações de estresse térmico em análises estruturais (ANSYS, 2005; Jiménez, 2013).

Segundo Jiménez (2013), muitas aplicações de transferência de calor, como problemas de tratamento térmico, bocais, blocos de motores, sistemas de tubulação e recipientes de pressão, envolvem análises térmicas transitórias. A análise transitória segue, em sua essência, os mesmos procedimentos de uma análise térmica em estado estacionário. A principal diferença reside no fato de que a maioria das cargas aplicadas em uma análise transitória é em função do tempo.

Para especificar cargas dependentes do tempo, é possível utilizar a *Function Tool* para definir uma equação ou função que descreva a curva e, em seguida, aplicar essa função como condição de contorno. Como alternativa, é possível dividir a curva de temperatura em relação ao tempo em etapas de carga. Cada "ponto" na curva temperatura/tempo pode representar uma etapa de carga, conforme ilustrado na Figura 13 (ANSYS, 2005; Jiménez, 2013).

Figura 13 - Curvas de temperatura x tempo.



Fonte: ANSYS (2005).

4 METODOLOGIA

Foi desenvolvido um modelo térmico tridimensional utilizando o método dos elementos finitos para prever a distribuição de temperatura no compósito termoplástico na região da junta formada pelos processos de união termomecânica, soldagem oxiacetilênica e soldagem por prensagem a quente. A análise foi realizada com o software ANSYS, adotando um modelo térmico baseado em uma simulação transitória que incorpora os principais fenômenos envolvidos na geração e transferência de calor através dos volumes dos materiais unidos.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Programa ANSYS

ANSYS, Inc. é uma empresa desenvolvedora de softwares que é referência quando se trata de fazer simulações de problemas no campo da engenharia. Nesse estudo foram utilizados a versão R1 de 2023, juntamente com dois módulos de análise o *Ansys Composites PrepPost* (ACP) para formação do compósito e o módulo *Steady-State Thermal Analysis* para a análise térmica do processo de soldagem.

4.1.2 Alumínio 2024-T3

A liga de alumínio utilizada neste estudo foi adquirida da empresa VB Tec (Viner Brasil Tecnologia) em formato de chapa de 3,50 mm de espessura, tendo sua composição química nominal apresentada na Tabela 2, para análise térmica as propriedades físicas aplicadas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 2 - Composição Química da Liga de Alumínio 2024-T3.

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
%	Balanco	<0,5	<0,5	3,8-4,9	0,3-0,9	1,2-,1,8	0,10	<0,25	<0,15

Fonte: Viner Brasil Tecnologia.

Tabela 3 - Propriedades Físicas da liga de Alumínio 2024-T3.

Propriedade	Valor	Unidade
Densidade	2,78	g/cm ³
Ponto de fusão	640	°C
Coefficiente de expansão térmica	23,2 x 10 ⁻⁶	K ⁻¹
Calor específico (Pressão Constante)	0,875	J / (kg·K)
Condutividade térmica	121	W / (m·K)

Fonte: Viner Brasil Tecnologia.

4.1.3 Compósito laminado poli(éter-imida) reforçado com fibras de vidro (PEI/FV)

Para o estudo, foi considerado como base de simulação o compósito PEI/FV laminado fornecido pela TORAY, uma empresa reconhecida pela produção de compósitos laminados de alta performance. Esses laminados são fabricados com tecidos na configuração 8-*Harness Satin* (8HS), caracterizada por uma trama de tecido em que cada fio de base passa por cima de sete fios de trama e por baixo de um, proporcionando maior flexibilidade e conformabilidade em comparação a tecelagens mais simples, como a plana. A espessura nominal dos laminados varia entre 2,5 mm e 3 mm.

A configuração estrutural dos laminados é de (0/90)_{5s}, indicando uma sequência simétrica de dez camadas, com orientações alternadas em ângulos de 0° e 90° em relação ao eixo principal do laminado. Essa configuração é amplamente utilizada para equilibrar as propriedades mecânicas e minimizar tensões residuais, sendo composta, aproximadamente, por 50% em volume de matriz polimérica.

Os laminados foram utilizados conforme fornecidos pela empresa, sem modificações adicionais. Os dados das propriedades físicas necessárias para a simulação das fases constituintes do compósito, incluindo a resina polimérica e as fibras de reforço, são apresentados nas Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades físicas das fases constituintes do compósito.

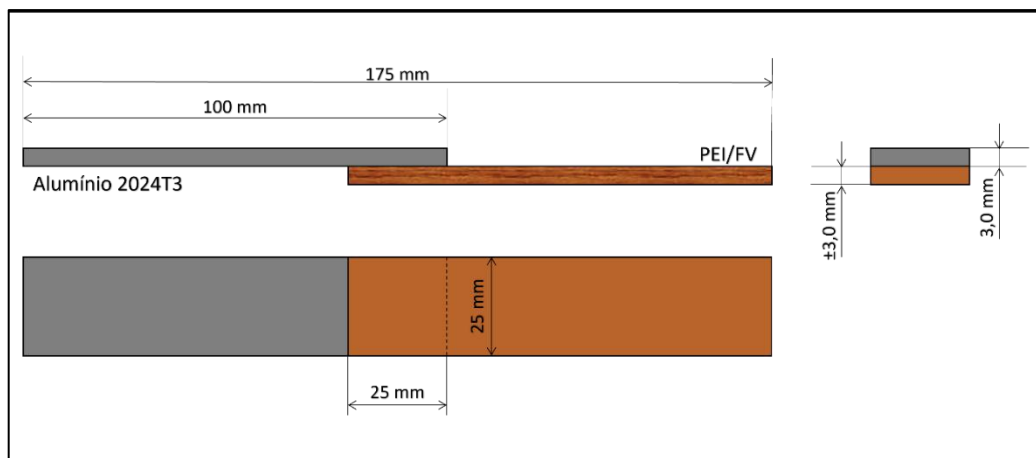
Fase	Densidade (g/cm³)	Coefficiente de Expansão Térmica (K⁻¹)	Módulo de Young (GPa)	Razão de Poisson	Condutividade Térmica (W/(m·K))	Calor Específico a Pressão Constante (J/(g·K))
Termoplástico (PEI)	1,27	6 x 10 ⁻⁵	3,2	0,36	0,22	1,2
Reforço (fibra de vidro)	2,5	-	-	-	0,046	0,84

Fonte: TORAY.

4.2 MÉTODOS

Nessa etapa, foi considerando somente o calor aferido na área correspondente a junta soldada que é de 25,4 mm por 25,4 mm, a amostra foi desenvolvida adotando a geometria padrão conforme a norma ASTM 3063 – 01 para ensaio *Lap Shear*, visto que após a soldagem os corpos de prova são submetidos a este ensaio para avaliação de resistência da junta soldada, possui 100 mm x 25 mm x 3 mm, como mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Dimensionamento do corpo de prova conforme a norma ASTM 3063 – 01.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

4.2.1 Caracterização Visual por Microscopia

Para modelagem do material compósito no programa ANSYS foi necessária a aferição das medidas de espessuras das camadas de resina polimérica e fibras que formam o compósito. Para isso foi utilizado um microscópio óptico de luz refletida (Nikon Epiphot 200), conforme a Figura 15, este equipamento possui ampliação de até 50x, em campo claro ou escuro, possui ainda filtros de luzes polarizadas que auxiliam na aquisição de imagens

eficientes. Neste estudo, foram utilizadas as objetivas com ampliação de 5x e 10x, em campo claro e sem polarização de luz.

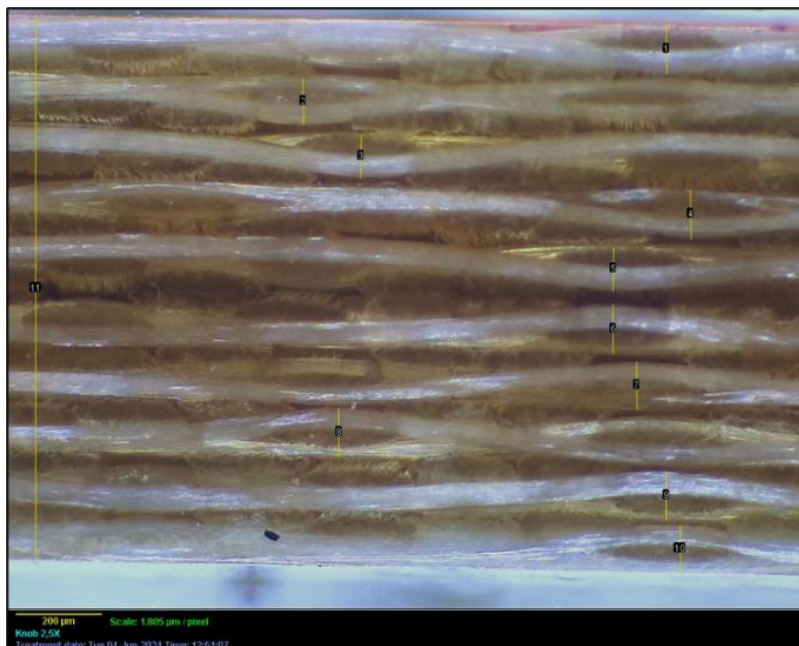
Figura 15 - Microscópio óptico de luz refletida Nikon Epiphot 200.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A imagem obtida com escala para verificação das camadas é apresentada na Figura 16 com indicação de onde foram realizadas as medidas da espessura da fibra de vidro. As medidas obtidas são apresentadas na Tabela 5. Para construção do modelo foi considerada a média de 0,108 mm de espessura para cada camada de reforço de tecido de fibra de vidro.

Figura 16 - Microscopia da secção do compósito laminado poli(eter-imida) reforçado com fibras de vidro, com indicação da região medida.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Tabela 5 - Medidas das camadas de reforço do compósito laminado.

Medida	Espessura (μm)	Espessura (mm)
1	111,92	0,112
2	108,31	0,108
3	99,29	0,099
4	113,72	0,114
5	99,29	0,099
6	111,90	0,112
7	110,11	0,110
8	110,10	0,110
9	110,10	0,110
10	110,11	0,110
Média	108,49	0,108
Desvio Padrão	4,80	0,0051
Erro Padrão	5,27	0,0053

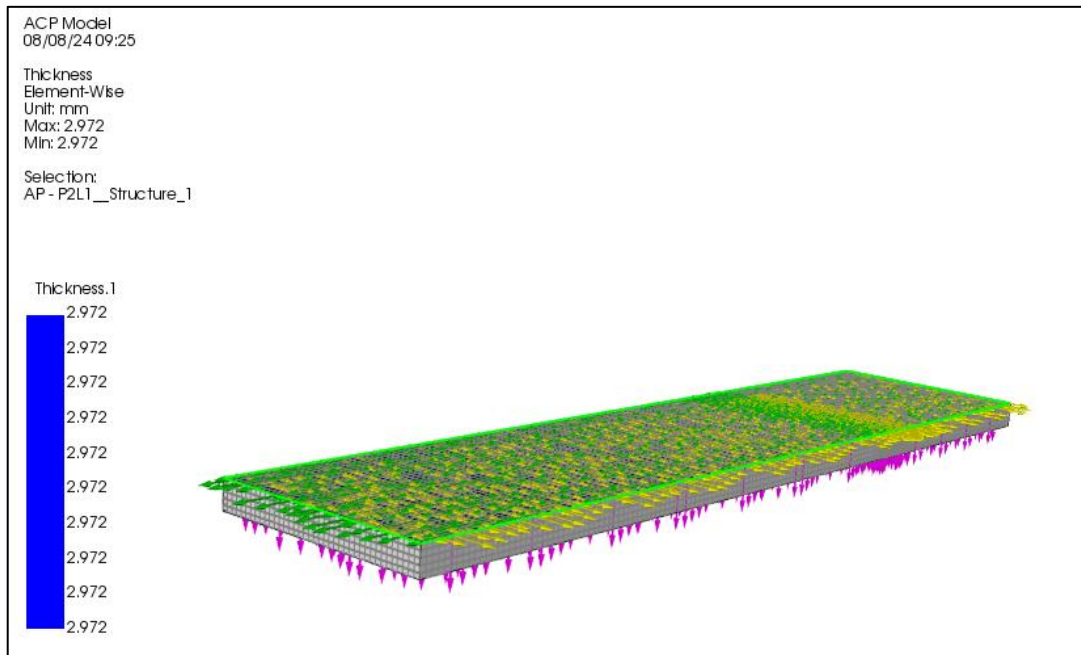
Fonte: Elaborada pela autora (2024).

4.2.2 Modelagem do sólido compósito com módulo ACP no ANSYS

O modelo de compósito foi desenvolvido em tipo casca, para iniciar foi adicionado ao ANSYS Workbench, o módulo ACP(Pré), onde é configurado todo o pré-processamento utilizado em análises posteriores. Com esse módulo, um novo catálogo de materiais compósitos é disponibilizado no banco de dados do programa. Os dados físico-químicos do compósito PEI-FV, tanto da fase de matriz quanto do reforço, foram inclusos ao banco de dados do software utilizando o *Contents of Engineering Data*.

Para o laminado sólido formado a partir do modelo em casca desenvolvido foi utilizado o método de extrusão *Modeling Ply Wise* onde é extrudada cada camada de modelagem como uma camada de elemento sólido. Este método é altamente recomendado para análises térmicas de compósitos porque permite capturar a variação das propriedades térmicas de cada camada individualmente, o que é essencial para uma análise precisa. Cada empilhamento ou sublaminado é extrudado como uma camada de elemento sólido, garantindo que qualquer diferença nas propriedades térmicas ou nos gradientes de temperatura seja adequadamente modelada. O modelo sólido final, contendo 2,972 mm de espessura é ilustrado na Figura 17, as setas amarelas indicam direção de referência, as verdes a orientação do plano em destaque (no caso uma das fibras de vidro) e as rosas a força normal na superfície da casca.

Figura 17 - Laminado sólido desenvolvido para simulação.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

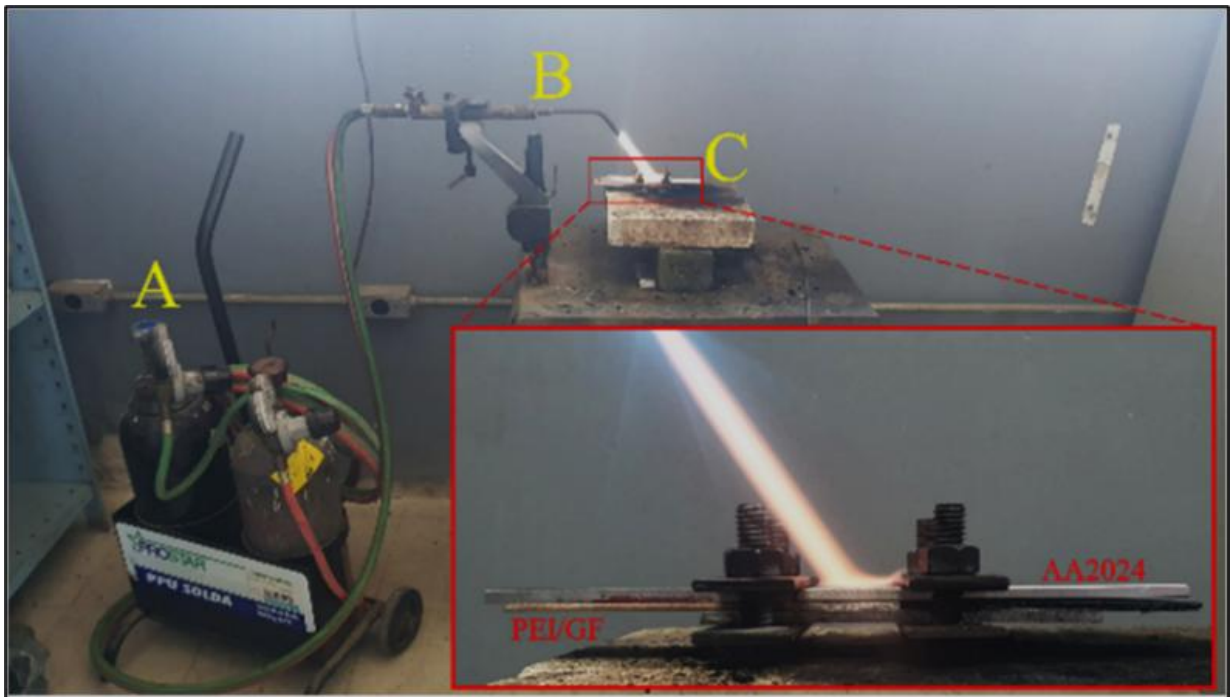
4.2.3 União de junta híbrida compósito-metal

- Soldagem Oxiacetileno:

Durante o processo de soldagem, a energia (calor) da chama é transmitida através do alumínio e absorvida pela superfície do compósito polimérico. O contato entre as partes faz com que o compósito aqueça (através da transferência de calor por condução), ocorrendo assim o amolecimento da fase polimérica do compósito e a união da interface de ambos os materiais. A extensão do volume do material amolecido depende da energia entregue aos componentes através da condução de calor pelo alumínio. A energia absorvida (ou seja, a quantidade de calor) é amplamente afetada pelo meio de condução (alumínio), pelo tempo de soldagem, pela distância do foco da chama, pela vazão de gás durante a soldagem e pela espessura do componente de alumínio.

Neste processo foi utilizado o equipamento de soldagem oxiacetileno convencional, com a amostra montada entre grampos para garantir o contato efetivo entre o alumínio e o compósito, a amostra de alumínio é posicionada acima da amostra de compósito, pois o calor gerado pela chama aquece o alumínio, que, por condução, transfere calor para o compósito, amolecendo-o, conforme pode ser observado em detalhe na Figura 18.

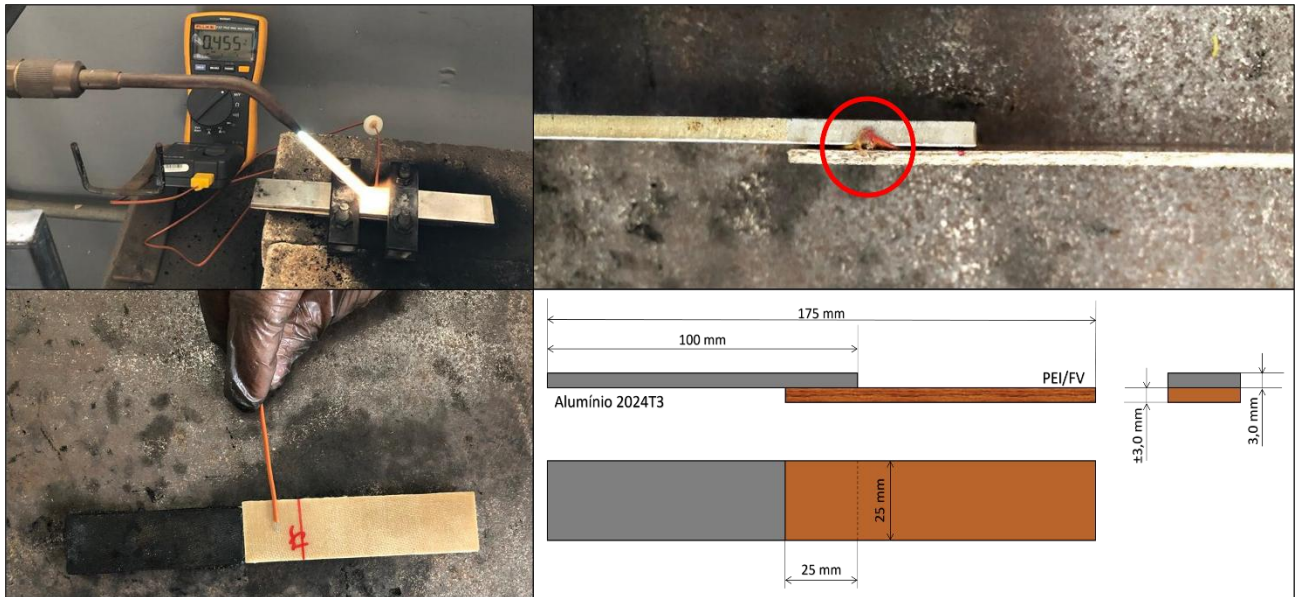
Figura 18 - Equipamento de soldagem oxiacetileno, A – cilindros de gás oxigênio e acetileno, B – braço móvel e tocha, C – alumínio e compósito termoplástico sendo soldados.



Fonte: Lucas, *et al* (2024).

Os parâmetros utilizados foram os já definidos em estudos anteriores por Lucas (2024), sendo a pressão dos gases fixadas em $0,5 \text{ kgf/cm}^2$ para acetileno e $1,0 \text{ kgf/cm}^2$ para oxigênio sendo a chama aplicada diretamente sobre o alumínio por 120 s a uma distância de 70 mm. Para aferição da temperatura que chega até o compósito no interior da junta, foram utilizados termopares do tipo K modelo TP-01 indicados para temperaturas na faixa de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ a $400 \text{ }^\circ\text{C}$ conectados a um multímetro digital modelo TRUE-RMS 117 da marca FLUKE. Os termopares foram posicionados no centro da área soldada entre o alumínio e o compósito, na parte inferior a junta e um encapsulado próximo a superfície que recebeu a chama, o posicionamento do termopar no centro da junta e a aferição de temperatura é mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Posicionamento do termopar e aferição de temperatura na área da junta entre o alumínio e compósito.

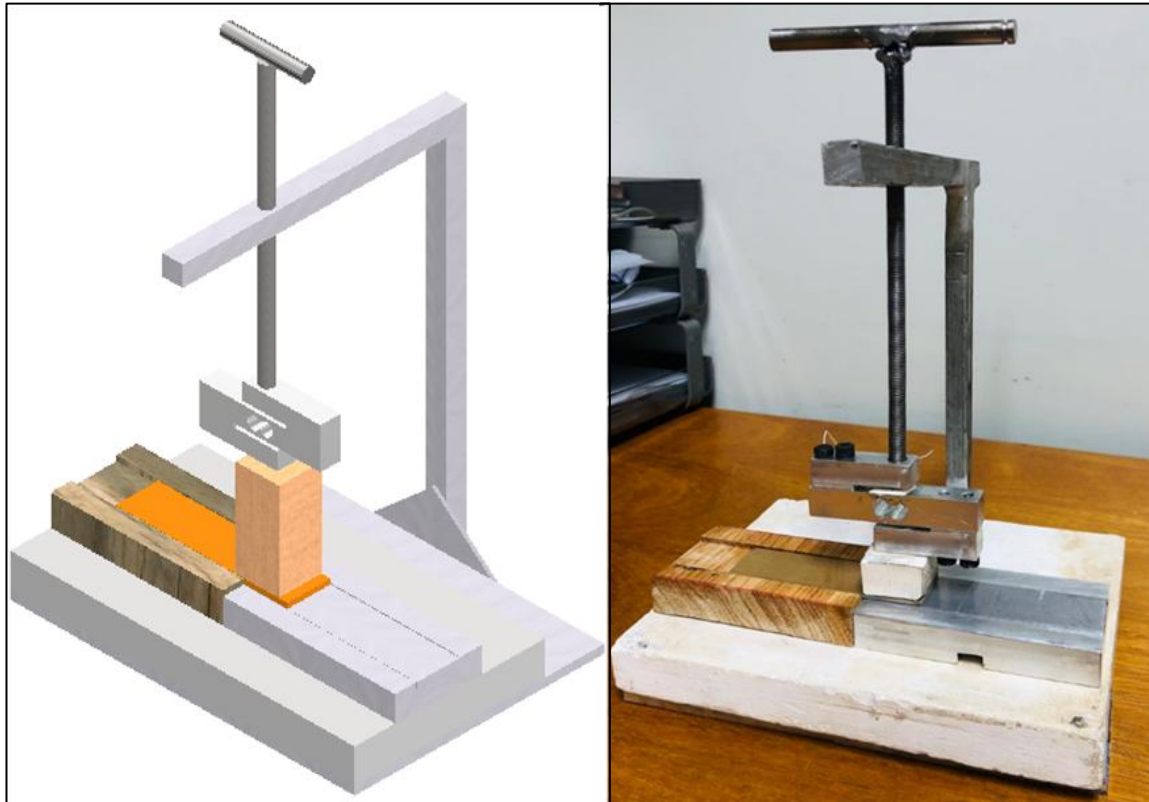


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

- Soldagem *Hot Press*:

O sistema com base no conceito *Hot Press* é composto por uma base metálica (alumínio 1000) que é aquecida por uma resistência elétrica acoplada na parte inferior com potência de 300 *Watts*, mantendo a temperatura por um período, esta resistência é controlada por um sistema eletrônico em Arduino que mantém a temperatura constante, utilizando um termopar acoplado permanentemente no sistema, pelo tempo determinado; e uma base de madeira para isolamento térmico do componente compósito termoplástico. A pressão é aplicada na área da junta de 25 mm por 25 mm por um sistema de aperto por fuso, acoplado a uma célula de carga sensor de peso de até 2kg de pressão, adaptada para uma célula de carga S que faz aferição da intensidade de pressão utilizada, o modelo 3D e o equipamento são apresentados na Figura 20.

Figura 20 – Modelo 3D e equipamento do Sistema de Soldagem *Hot Press* utilizado no estudo.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A amostra de junta sobreposta é montada nas bases de forma que o alumínio fique posicionado na base de metal aquecida, e a parte de compósito na base de madeira, um filme intermediário de PEI com $110\ \mu\text{m}$ é posicionado na superfície do alumínio, pois em seus estudos André, *et al.* (2016), comprovou que a utilização de filmes de PEI intermediários na soldagem de materiais dissimilares melhoram a resistência mecânica das juntas.

A medição e calibração da temperatura no interior da junta foram realizadas com o mesmo modelo de termopar utilizado no processo anterior, complementado por um termômetro digital modelo HH801 B, da marca Omega. Esse equipamento permite aferir temperaturas em dois pontos simultaneamente, eliminando possíveis discrepâncias causadas pela utilização de instrumentos distintos. A base de aquecimento foi equipada com um termopar tipo K embutido, blindado com aço inoxidável em formato de parafuso, o que amplia sua faixa de operação para até $800\ ^\circ\text{C}$. Esse termopar foi integrado a um sistema eletrônico baseado no Arduino, utilizando o módulo de leitura Max6675. Esse módulo é responsável por converter os sinais do termopar tipo K em dados digitais, transmitidos ao microcontrolador por meio do protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*). O SPI utiliza três fios principais: MISO (transmissão de dados ao

microcontrolador), SCK (sincronização) e CS (ativação do módulo). Essa configuração permite uma comunicação rápida e precisa, ideal para monitoramento em tempo real.

O sistema eletrônico foi configurado para permitir ao operador monitorar em tempo real a temperatura alcançada na interface da junta durante o processo de união. Para validar e correlacionar as temperaturas medidas, foram registradas cinco leituras por minuto ao longo de um período de 15 minutos. A média das temperaturas aferidas por minuto foi calculada e apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Média das temperaturas medidas por minuto durante 15 minutos para calibração do sistema de controle eletrônico.

Tempo (min)	Temperatura da Base (°C)	Temperatura da Junta (°C)
1	85	46
2	130	76
3	173	112
4	216	150
5	255	187
6	290	221
7	323	250
8	357	276
9	375	297
10	393	318
11	406	334
12	415	342
13	427	357
14	434	367
15	440	373

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

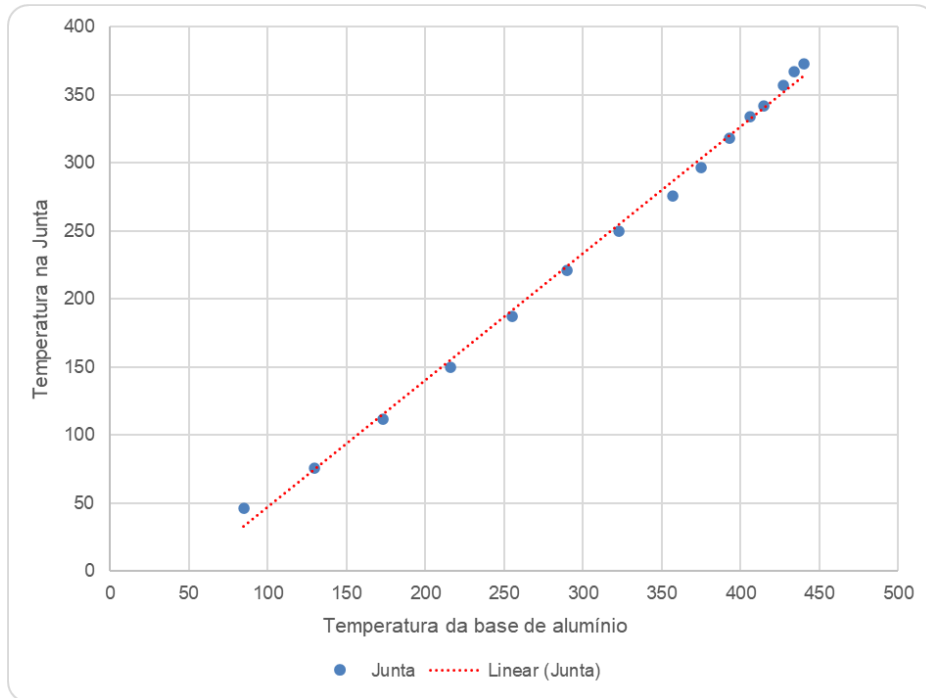
A partir dos valores médios obtidos, foi gerado um gráfico (Figura 21) relacionando a temperatura da base com a temperatura medida na interface da junta, traçando-se a linha de tendência correspondente. Essa linha forneceu uma equação de regressão linear, no formato:

$$T_{junta} = a * T_{base} + b \quad (6)$$

Onde T_{junta} representa a temperatura na interface da junta, T_{base} é a temperatura na base de aquecimento metálica e a e b os coeficientes determinados pela análise dos dados. Essa equação foi incorporada ao sistema Arduino, permitindo que, com base na leitura do termopar da base, o microcontrolador calcule e exiba a temperatura estimada da interface da

junta em tempo real. Essa abordagem elimina a necessidade de sensores adicionais na interface e garante um monitoramento confiável e preciso durante o processo.

Figura 21 - Gráfico de tendência de temperatura do processo de soldagem por prensagem a quente.

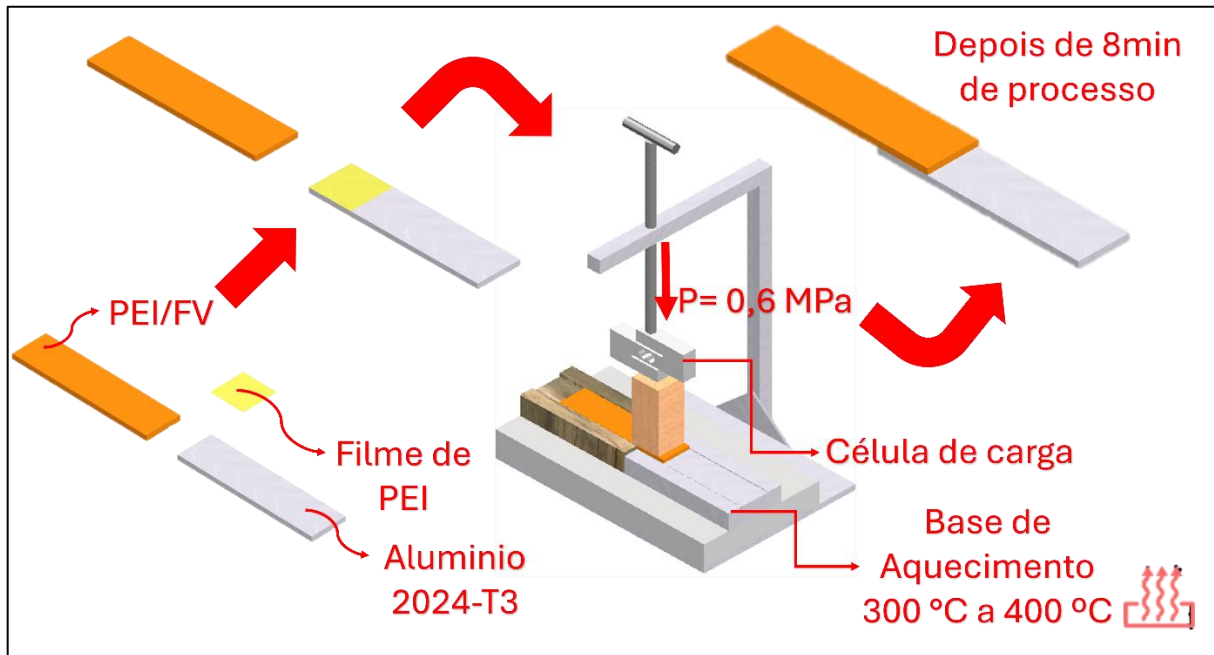


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O posicionamento correto dos componentes da amostra soldada é garantido pelos canais que contém as bases, confeccionados nas dimensões adequadas para o corpo de prova. Com a amostra devidamente posicionada nas bases, uma pressão de 0,6 MPa foi fornecida pelo aperto do fuso sobre a área da junta para garantir o contato efetivo entre as interfaces.

De acordo com Zhang (2024), tanto a temperatura quanto o tempo de duração do processo de prensagem a quente afetaram o aporte de calor durante a união, o que influencia a formação da junta. Uma adesão firme não acontece sob menor aporte de calor, enquanto uma grande deformação e até a degradação da parte do compósito ocorre sob maior aporte de calor, portanto, os parâmetros de união adotados também foram os já estabelecidos pela literatura. A temperatura de aquecimento foi de 300°C a 400 °C e o tempo foi mantido por 8 minutos. Na Figura 22 é ilustrado o processo de prensagem a quente de forma simplificada. Nestas condições, apenas o filme de PEI e uma fina camada da matriz polimérica é fundida na superfície em contato com o metal, e as juntas se formaram após o resfriamento.

Figura 22 - Processo de soldagem por prensagem a quente utilizando filme intermediário de PEI.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

4.2.4 Simulação Térmica

A simulação térmica tem o objetivo de determinar a distribuição de temperatura através do modelo, neste estudo de caso é considerado quando o calor é aplicado na parte metálica e conduzido através do compósito considerando os processos de soldagem oxiacetileno e prensagem a quente.

Para simplificar o sistema de análise no processo de soldagem oxiacetileno foram consideradas uma temperatura ambiente de 25 °C no instante zero tanto na interface da junta quanto na superfície do alumínio que recebe a chama, e uma temperatura final, a 120 s, conforme é mostrado na tabela 7, de acordo com a média dos valores experimentais colhidos.

Tabela 7 - Graus de liberdade assumidos para o processo de simulação.

Condição	Local da junta	Temperatura no Tempo Inicial 0 s (°C)	Temperatura no Tempo Final 120 s (°C)
Fluxo de calor	Face superior	25	450,1
Condução	Interface Al/PEI-FV	25	405,1
Condução	Face inferior	25	136,3

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

No processo de soldagem por prensagem a quente, o principal grau de liberdade do sistema permanece sendo a temperatura. No entanto, os dados de entrada para a simulação incluem parâmetros específicos do processo, como a potência elétrica aplicada à resistência responsável pelo aquecimento da base, a temperatura ambiente inicial do sistema e o tempo total de 8 minutos (equivalente a 480 segundos). Esses parâmetros são fundamentais para modelar com precisão a evolução térmica ao longo do processo. A Tabela 8 contém os dados de entrada utilizados na simulação deste método.

Tabela 8 - Dados de entrada utilizados na simulação do processo de soldagem por prensagem a quente.

Parâmetro	Local no sistema	Valor	Temperatura no Tempo Final 480 s (°C)
Potência	Base de aquecimento	150 W	450,1
Temperatura Inicial	Sistema	25 °C	450,6
Temperatura Inicial	Junta	25 °C	296,4

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

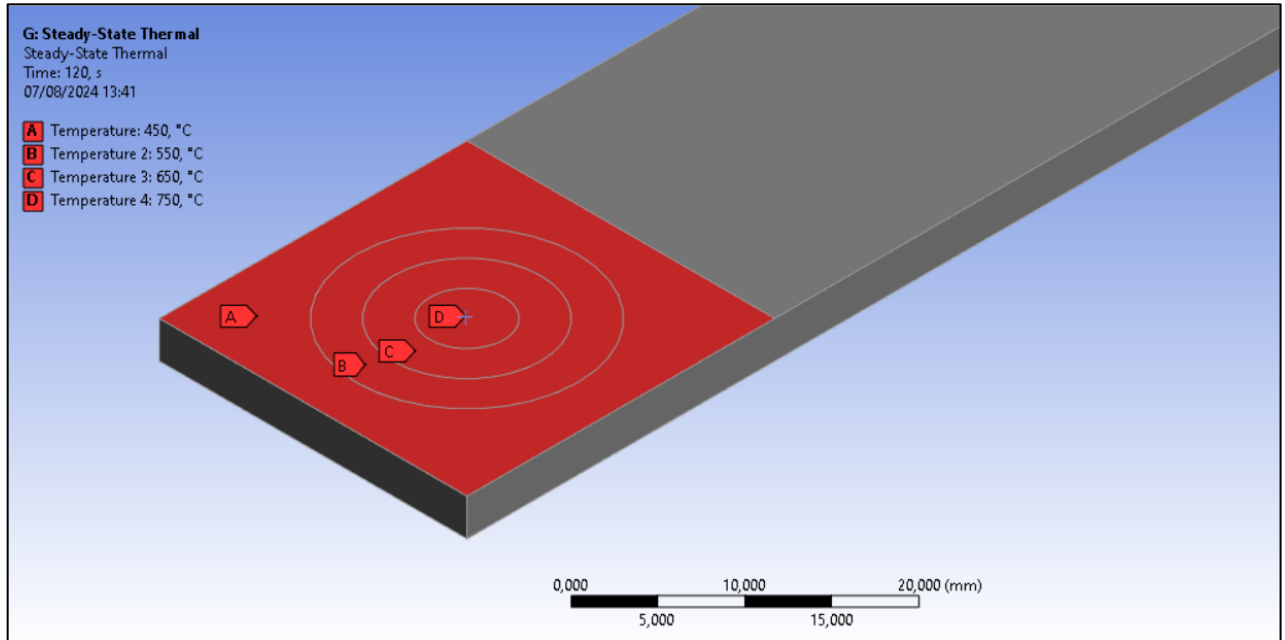
4.2.4.1 Condições de Contorno do modelo para processo de Oxiacetileno

Durante o processo de soldagem por oxiacetileno existe a dificuldade para aferição de temperatura na superfície de alumínio pois a intensidade atingida quando aquecida por uma chama depende de vários fatores, incluindo a intensidade da chama, a distância entre a chama e a superfície, o tempo de exposição e as propriedades térmicas do alumínio.

De acordo com O'Brien (2007), a chama de um maçarico oxiacetilênico pode alcançar temperaturas de até aproximadamente 3.200°C. No entanto, a superfície de alumínio não atingirá essa temperatura máxima devido à sua alta condutividade térmica e capacidade de dissipar calor. O alumínio tem uma alta condutividade térmica, permitindo a dissipação rápida de calor, e seu ponto de fusão é de aproximadamente 660°C. Logo, a temperatura da superfície de alumínio durante a soldagem oxiacetilênica pode variar entre 500°C até 800°C, sendo mais que suficiente para fundir o alumínio se exposto por demasiado tempo.

Portanto, como ilustrado na Figura 23, foi delineada sobre a superfície de alumínio 3 polígonos hexagonais delimitando 3 superfícies que representam diferentes intensidades de temperatura, considerando o espalhamento da chama (fonte de calor) sobre o metal.

Figura 23 - Indicação de diferentes índices de temperatura sobre a superfície do alumínio.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O modelo final considerando os dois componentes de materiais dissimilares contém 19618 elementos de malha, sendo eles o SOLID291, SOLID279 e SOLID278, CONTA174 e TARGE170, distribuídos conforme a Tabela 9, o tipo de contato definido entre os materiais é o *Bonded* (ligado) o qual considera que as superfícies em contato estão coladas uma na outra.

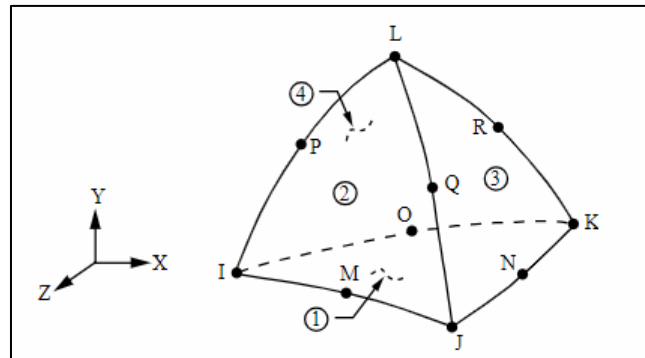
Tabela 9 - Distribuição dos tipos de elementos que formam o modelo.

Tipo de Elemento	Quantidade
SOLID 291	174
SOLID 279	4.935
SOLID 278	14.589
CONTA 174	844
TARGE 170	844
TOTAL	19.618

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O SOLID291 ilustrado na Figura 24 é um elemento tetraédrico tridimensional de 10 nós com um grau de liberdade, temperatura, em cada nó é indicado para modelagem de materiais compósitos anisotrópicos como o PEI-Fibra de vidro, devido a sua capacidade de capturar a condução de calor nas diferentes direções do material reforçado com fibras (ANSYS, 2004, 2005, 2010).

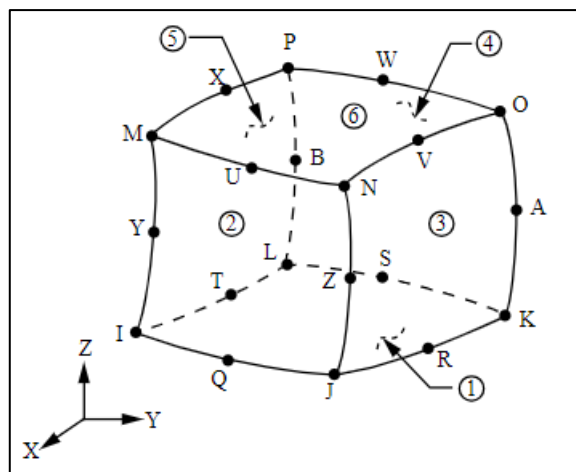
Figura 24 - Representação geométrica do sólido térmico SOLID291.



Fonte: ANSYS (2005).

O SOLID279 ilustrado na Figura 25, é um outro tipo de sólido com 20 nós e um grau de liberdade, temperatura, em cada nó. É aplicado em regiões onde as propriedades térmicas variam com a temperatura, sendo adequado para modelar malhas irregulares (ANSYS, 2004, 2005, 2010).

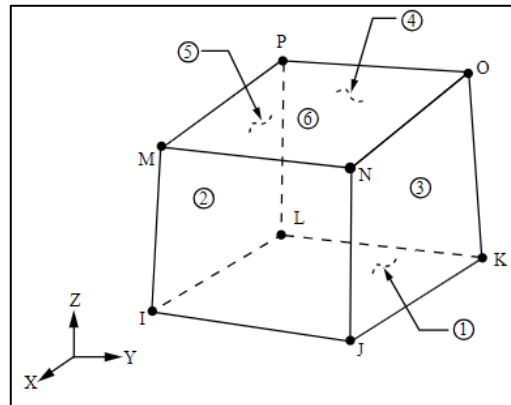
Figura 25 - Representação geométrica do sólido térmico SOLID279.



Fonte: ANSYS (2005).

O SOLID278, um elemento de 8 nós com um único grau de liberdade, temperatura, em cada nó, ilustrado na Figura 26. Foi utilizado para modelar áreas com condutividade térmica mais uniforme, o componente metálico do modelo, garantindo eficiência computacional. (ANSYS, 2004, 2005, 2010)

Figura 26 - Representação geométrica do sólido térmico SOLID278.

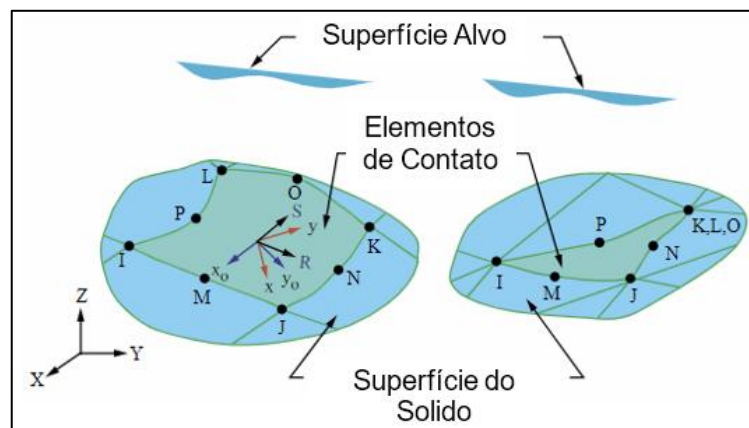


Fonte: ANSYS (2005).

A transferência de calor através das interfaces de contato entre o alumínio e o compósito foi modelada utilizando os elementos de contato CONTA174 e TARGE170.

O CONTA174 ilustrado na Figura 27 é um elemento de 8 nós utilizado para análise de contato geral. Neste estudo de caso ele faz a convergência de nós entre uma superfície alvo, definida pelo elemento TARGE170, e uma superfície deformável. Podendo ser aplicado nas superfícies de elementos sólidos ou de casca, mantendo características geométricas consistentes com o elemento base ao qual está associado (como SOLID279 ou SOLID278 também aplicados a este modelo). Sua função principal é modelar o fluxo de calor na interface de contato, permitindo a separação ou adesão térmica entre os materiais conforme necessário. Esse elemento é essencial para análises em que a transferência de calor ocorre entre materiais com propriedades distintas, como no caso de contato entre alumínio e compósitos reforçados (ANSYS, 2004, 2005, 2010).

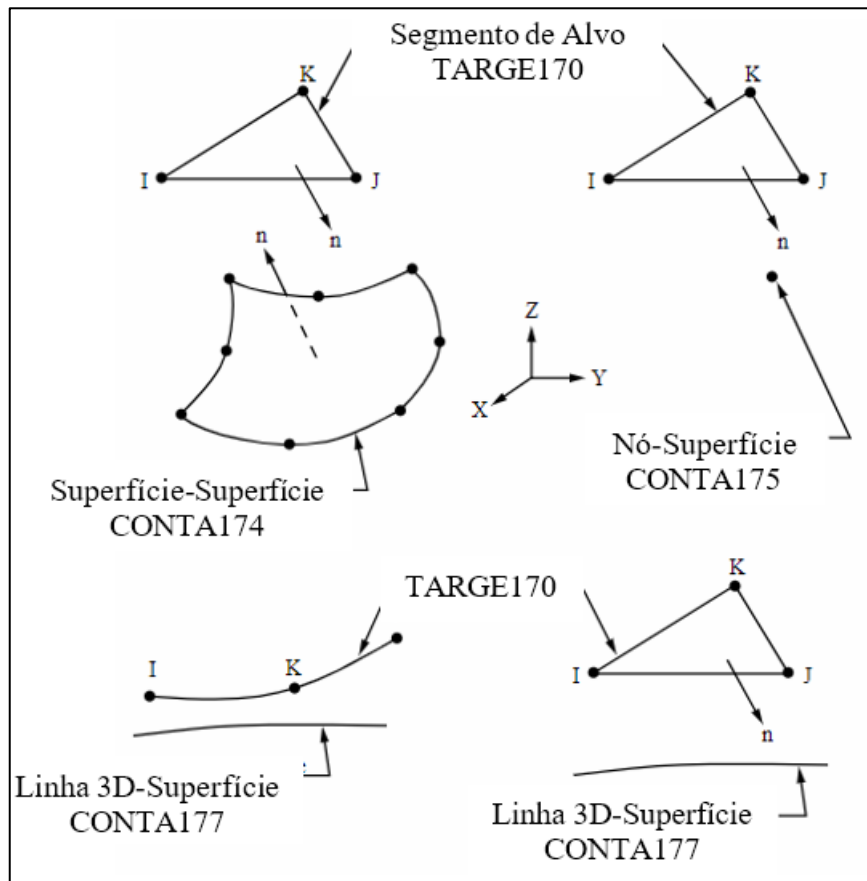
Figura 27 - Representação geométrica do elemento de contato CONTA174.



Fonte: ANSYS (2005).

O TARGE170 é um elemento que faz interação com outros elementos de contato como o CONTA174 criando um “alvo” 3D nas superfícies de interesse para efetivar o contato entre elas. Pode ser utilizado tanto para superfícies rígidas quanto flexíveis, na Figura 28 é ilustrado as formas de interação que este elemento possui, que possibilitam a determinação de condições como temperatura, voltagem e outras grandezas físicas diretamente nos segmentos-alvo. Para este estudo de caso, uma simulação térmica, este elemento funciona como o limite da superfície que interage termicamente com a superfície de contato, garantindo a precisão na transferência de calor e no comportamento térmico do sistema (ANSYS, 2004, 2005, 2010).

Figura 28 - Representação geométrica das interações possíveis do elemento TARGE170.

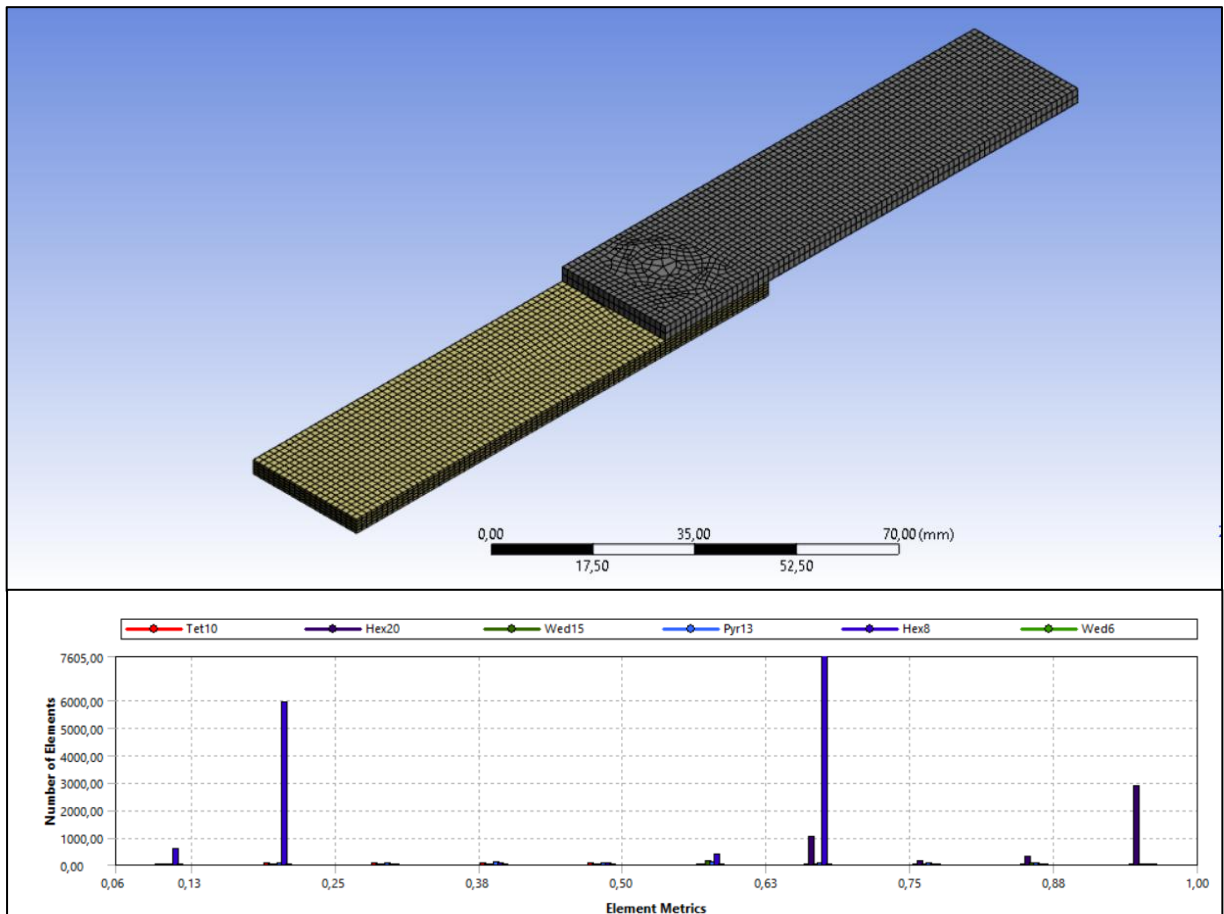


Fonte: ANSYS (2005).

A qualidade dos elementos é importante em uma análise de elementos finitos, logo é ilustrada na Figura 29 a relação de qualidade dos elementos que compõem o modelo.

Devido ao método de extrusão adotado no compósito, a malha nas áreas referentes ao reforço de fibra de vidro que tem uma espessura bem menor que o restante das partes necessita de um refinamento, visto que os elementos dessas áreas estão com uma qualidade métrica abaixo de 0,5.

Figura 29 - Qualidade dos elementos de malha.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para melhorar a qualidade métrica foram tomadas algumas medidas de correção nos parâmetros de construção da malha. A dissipação de calor foi tomada em modelo radial para simplificação do modelo, o tamanho dos elementos gerais foi definido com 2 mm, com controle de método na malha referente ao componente metálico, esse controle foi para garantir que o software trabalhe com elementos preferencialmente da série dos quadriláteros; um refinamento de malha com fator 2 foi aplicado ao componente compósito e por fim uma malha de contato foi aplicada na interface de contato entre os dois componentes com um fator 4 de transição suave. É ilustrado pela Figura 30 o modelo com a malha trabalhada com detalhe da área de contato e o gráfico de qualidade dos elementos, pode-se observar que já não existem elementos com qualidade abaixo de 0,5.

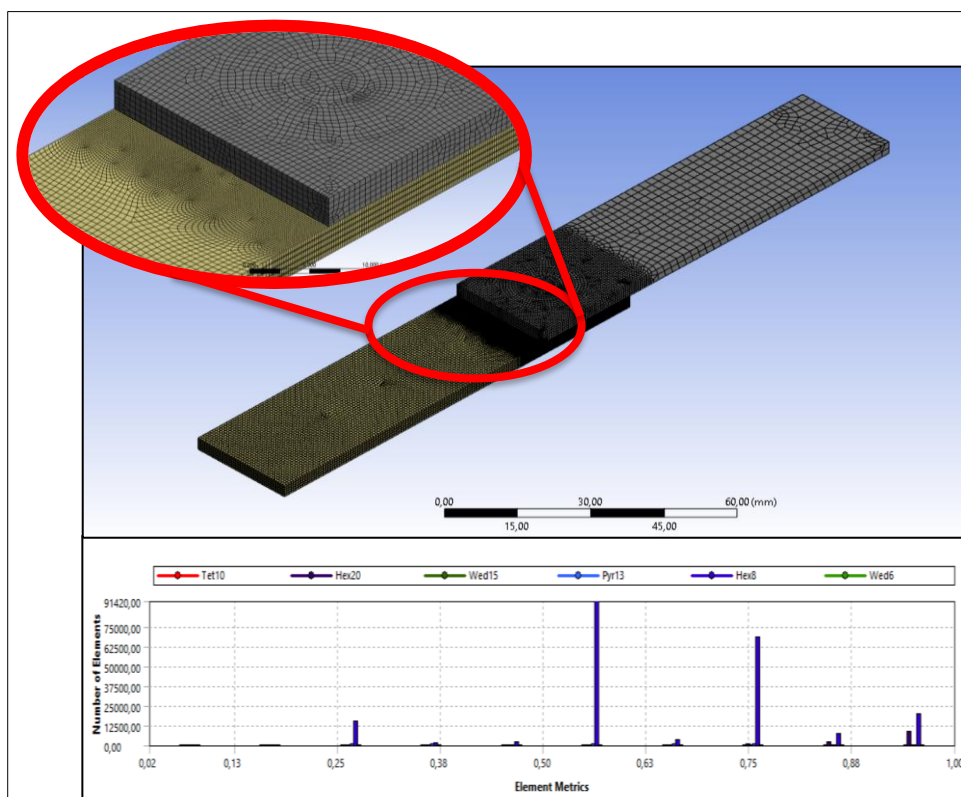
A malha trabalhada contém 116.629 elementos, dos mesmos tipos citados anteriormente, porém em maior quantidade, como mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 – Nova distribuição dos tipos de elementos que formam o modelo Soldagem Oxiacetileno.

Tipo de Elemento	Quantidade
SOLID 291	850
SOLID 279	14.161
SOLID 278	92.088
CONTA 174	4.765
TARGE 170	4.765
TOTAL	116.629

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 30 – Refinamento e Qualidade dos elementos de malha do modelo Soldagem Oxiacetileno.



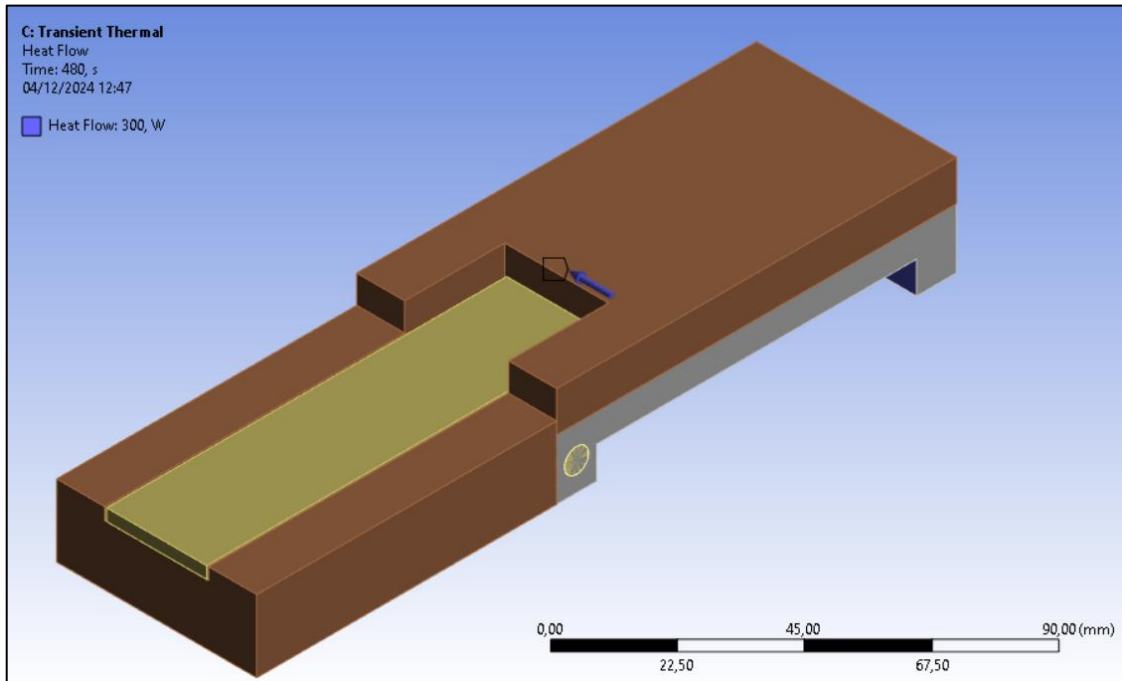
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

4.2.4.2 Condições de contorno do modelo para processo de prensagem a quente

No processo de soldagem por prensagem a quente, o componente metálico da junta, o alumínio, é aquecido por uma base metálica equipada com uma resistência elétrica de 300 *Watts*. Enquanto isso, o componente compósito é isolado termicamente por uma base de madeira, minimizando a transferência de calor indesejada. o sistema eletrônico, ao ser acionado, ativa a resistência elétrica e inicia a contagem do tempo em minutos. Para a simulação, o modelo foi desenvolvido considerando todos os elementos do sistema, incluindo o mecanismo de

aquecimento e o isolamento térmico dos componentes que compõem a junta, conforme ilustrado na Figura 31, as condições de contorno foram definidas pela entrada da potência da resistência elétrica representada pela seta roxa, simulando com precisão o comportamento térmico do processo.

Figura 31 - Modelo elaborado para simulação de prensagem a quente com entrada de potência de 300 Watts.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O modelo considerando todo o sistema contém 172.763 nós e com 66.738 elementos de malha. Dentre os elementos constituintes do modelo, temos SOLID291, SOLID279, CONTA174 já citados anteriormente e também o SURF152 distribuídos conforme a Tabela 11, o tipo de contato definido entre os dois componentes da junta é o *Bonded* (ligado) o qual considera que as superfícies em contato estão coladas uma na outra, já as demais faces em contato foram definidas como *Frictionless* (junto), um tipo de contato que considera as superfícies juntas, mas permite escorregamento e separação entre elas.

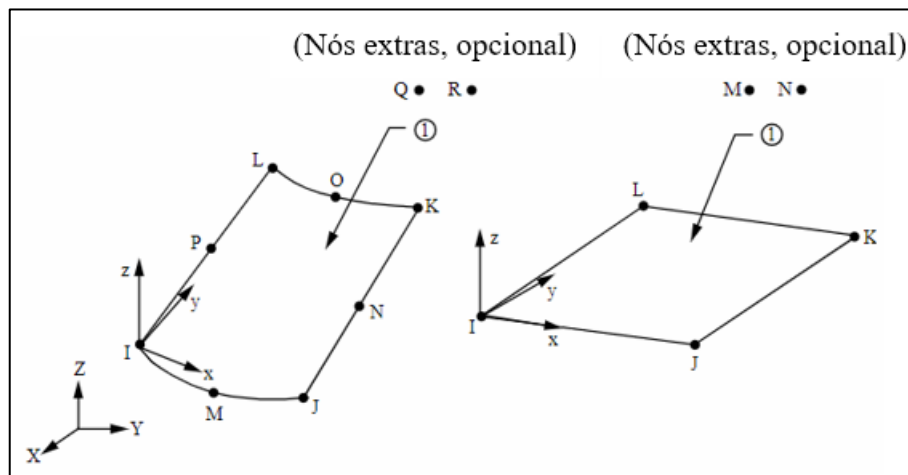
Tabela 11 - Distribuição dos tipos de elementos que formam o modelo.

Tipo de Elemento	Quantidade
SOLID 291	139
SOLID 279	36.810
CONTA 174	14.795
SURF152	14.984
TOTAL	66.738

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O elemento SURF152 é utilizado em análises térmicas tridimensionais para representar cargas e efeitos de superfície em elementos sólidos subjacentes. É aplicável em situações que envolvem transferência de calor por convecção, fluxo de calor e outras condições térmicas de superfície, sendo sobreposto a uma face de área de um elemento térmico 3D. Como ocorre com os componentes do sistema estudado. Sua definição inclui de quatro a dez nós compartilhados com o elemento sólido base, e nós adicionais podem ser usados para modelar efeitos de convecção ou radiação, como é ilustrado na Figura 32. O elemento permite calcular a matriz de condutividade térmica e o vetor de fluxo de calor considerando coeficientes de filme e espessuras definidas nos nós.

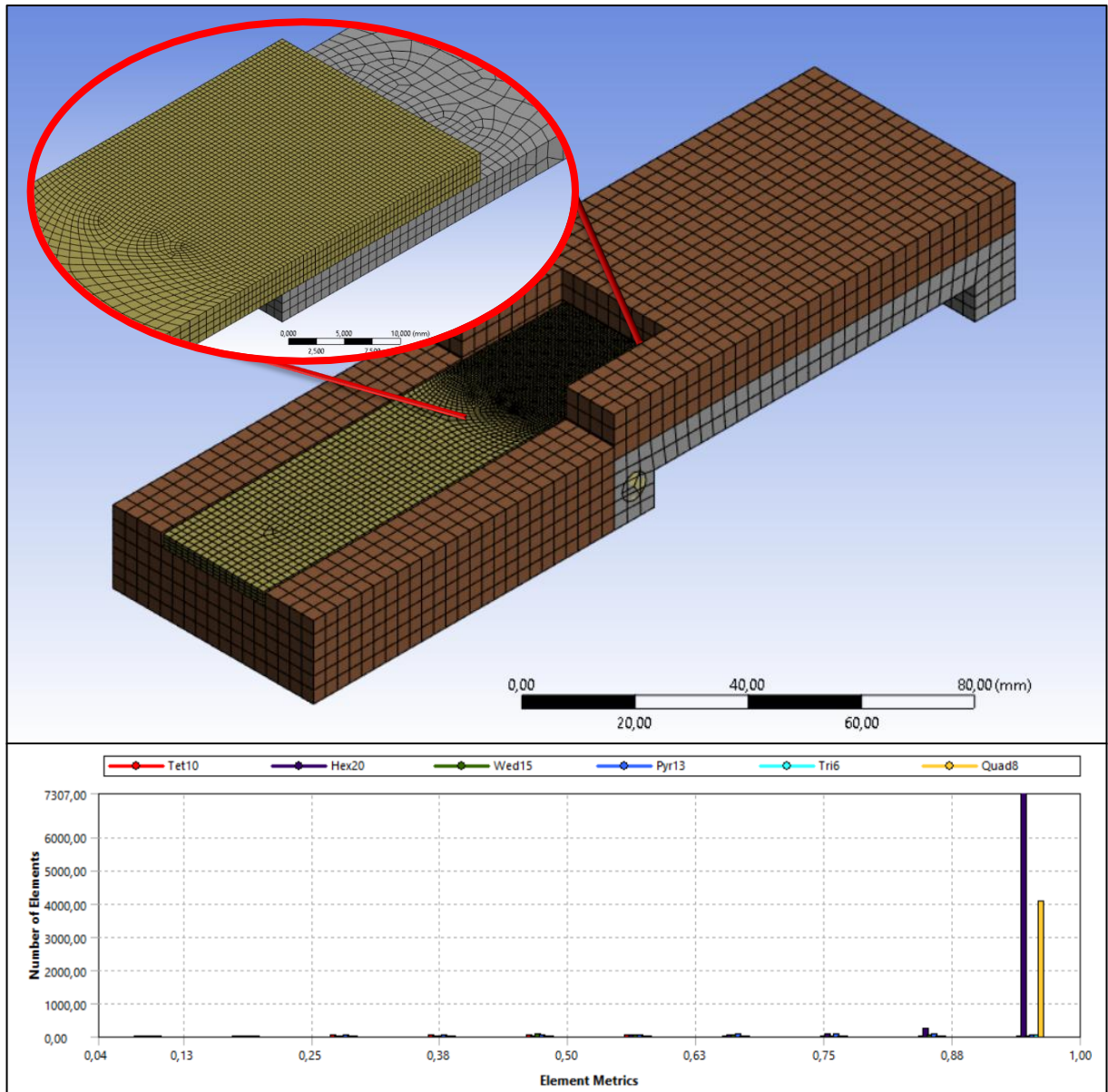
Figura 32 - Representação geométrica do elemento SURF152.



Fonte: ANSYS (2005).

Para assegurar a qualidade da malha e a precisão dos resultados, foram adotadas estratégias específicas na definição dos elementos. O corpo de prova soldado recebeu um maior detalhamento, enquanto os demais componentes do sistema foram modelados com uma malha mais robusta, considerando que o foco da análise é a distribuição de temperatura na junta soldada. Os elementos gerais foram definidos com um tamanho de 3 mm, enquanto a malha nos componentes da junta foi refinada. No compósito, aplicou-se um fator de refinamento igual a 1, enquanto no componente metálico utilizou-se o método de controle de elementos, garantindo que o software priorizasse elementos da série dos quadriláteros. Adicionalmente, na interface da junta foi aplicada uma malha de contato, restringindo o tamanho máximo dos elementos a 1 mm. Essas medidas foram determinantes para alcançar a convergência dos nós no sistema, otimizando a análise computacional e assegurando tanto a qualidade dos elementos da malha quanto o detalhamento da área refinada. A métrica de qualidade da malha e o refinamento aplicado são apresentados na Figura 33.

Figura 33 - Refinamento e Qualidade dos elementos de malha do modelo Soldagem por Prensagem a Quente.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

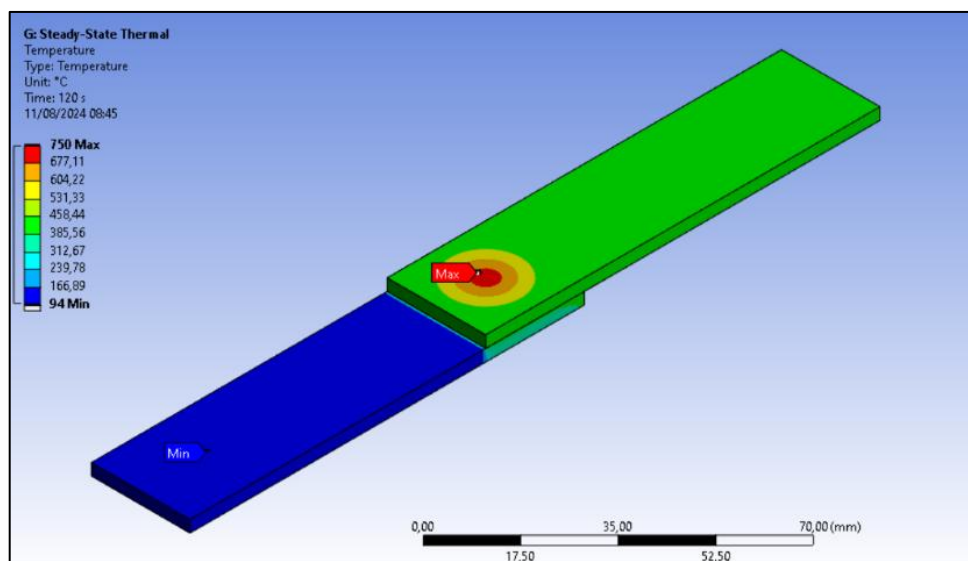
Os resultados obtidos para os dois tipos de processos analisados foram satisfatórios, uma vez que ambos demonstraram a capacidade de produzir juntas soldadas. Contudo, ao comparar os métodos, observam-se vantagens significativas do processo de prensagem a quente em relação ao de oxiacetileno. Essas vantagens tornam-se evidentes, especialmente, pela superioridade na resistência mecânica das juntas soldadas pelo processo de prensagem a quente, indicando um desempenho mais eficiente e consistente na formação das conexões. Os detalhes específicos de cada processo e suas respectivas análises serão apresentados nas seções subsequentes.

5.1 ANÁLISE TÉRMICA NUMÉRICA DA SOLDAGEM OXI-GÁS

5.1.1 Gradiente de Temperatura

A combinação dos diferentes tipos de elementos de malha e de contato permitiu simular de forma satisfatória a entrada de calor pela superfície do componente metálico, o alumínio 2024-T3, e sua condução através do compósito PEI-Fibra de vidro. A atribuição do grau de liberdade de temperatura a cada nó da malha possibilitou uma modelagem detalhada da distribuição de calor, levando em consideração as propriedades térmicas anisotrópicas do compósito e a eficiência na condução térmica do alumínio. O gradiente de temperatura pelo modelo completo é apresentado na Figura 34.

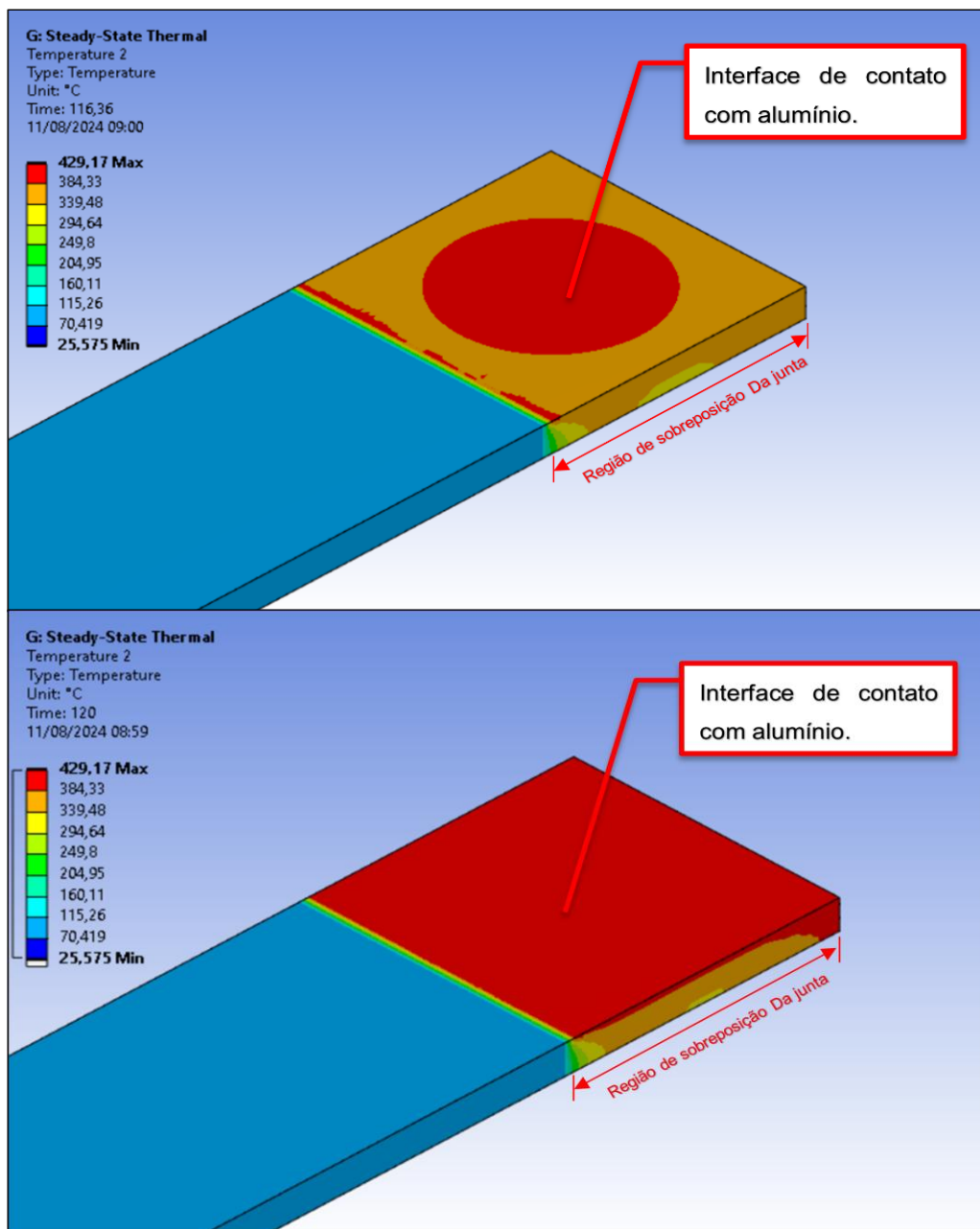
Figura 34 - Distribuição geral de temperatura pelo modelo completo de Soldagem por Oxiacetileno.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Ao isolar visualmente o componente compósito do modelo, como ilustrado na Figura 35, observa-se que a incidência da chama sobre o alumínio é pontual, concentrando-se no centro da área da junta. Isso resulta em um gradiente de temperatura não uniforme, o que compromete a união eficiente da junta. A fase polimérica do compósito que recebe menos calor não amolece o suficiente para fluir pela superfície do alumínio e formar uma ancoragem mecânica adequada, prejudicando a resistência mecânica da junta.

Figura 35 - Distribuição de temperatura pelo compósito PEI-FV.



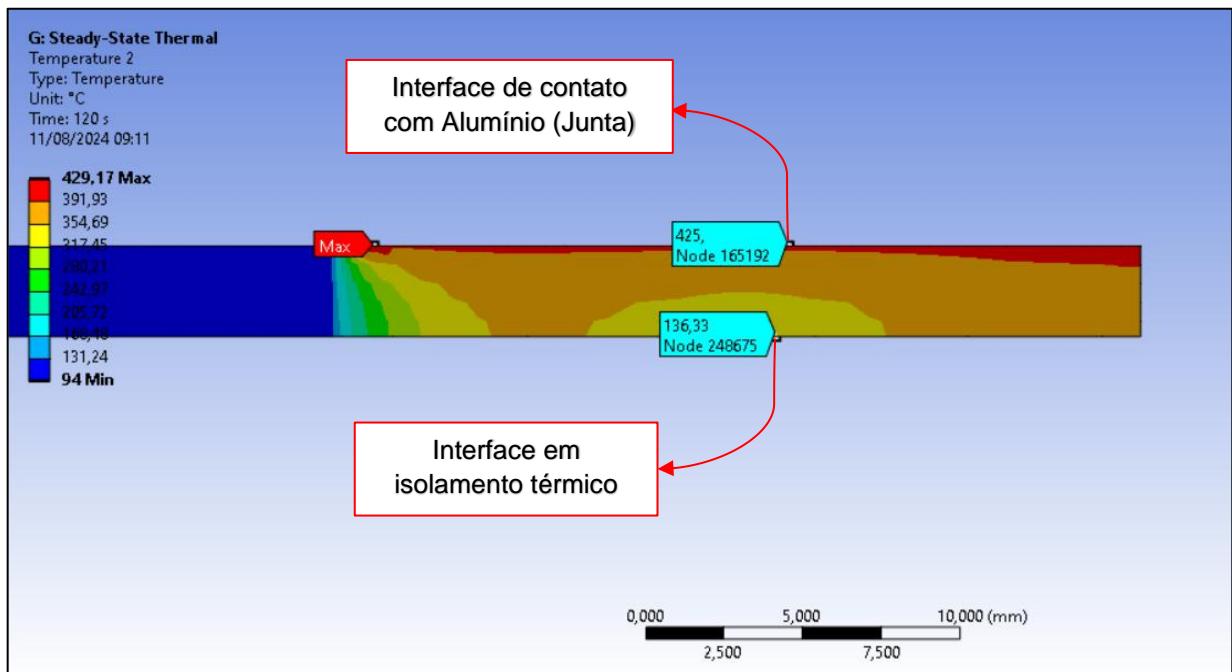
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

É possível observar que a simulação com 116 segundos apresenta temperaturas da ordem de ± 430 °C na região central da interface da junta. Esta faixa está acima da temperatura

de transição vítrea (T_g) e abaixo da temperatura de degradação (T_d), porém é muito concentrada. À medida que se aproxima das bordas do corpo de prova, a temperatura diminui para aproximadamente ± 380 °C. Observa-se, pela escala de cores, que a distribuição de temperatura ao longo do comprimento do compósito, fora da área da junta, é homogênea e se estabiliza em 103 °C, ao chegar ao final do processo com 120 segundos, a temperatura fica uniforme por toda área da junta, porém o tempo é muito curto para que de fato ocorra de fato uma boa adesão com a superfície do alumínio.

Como previsto, ocorre uma variação de temperatura significativa entre as faces do compósito, aproximadamente 290 °C, conforme é ilustrado na Figura 36. A resistência térmica que resulta nessa variação de temperatura é atribuída ao próprio polímero poli(éter-imida) e ao reforço de fibra de vidro, que são materiais com características de isolantes térmicos. Essa característica impede o amolecimento completo da espessura do laminado, prevenindo problemas como distorções dimensionais e delaminações.

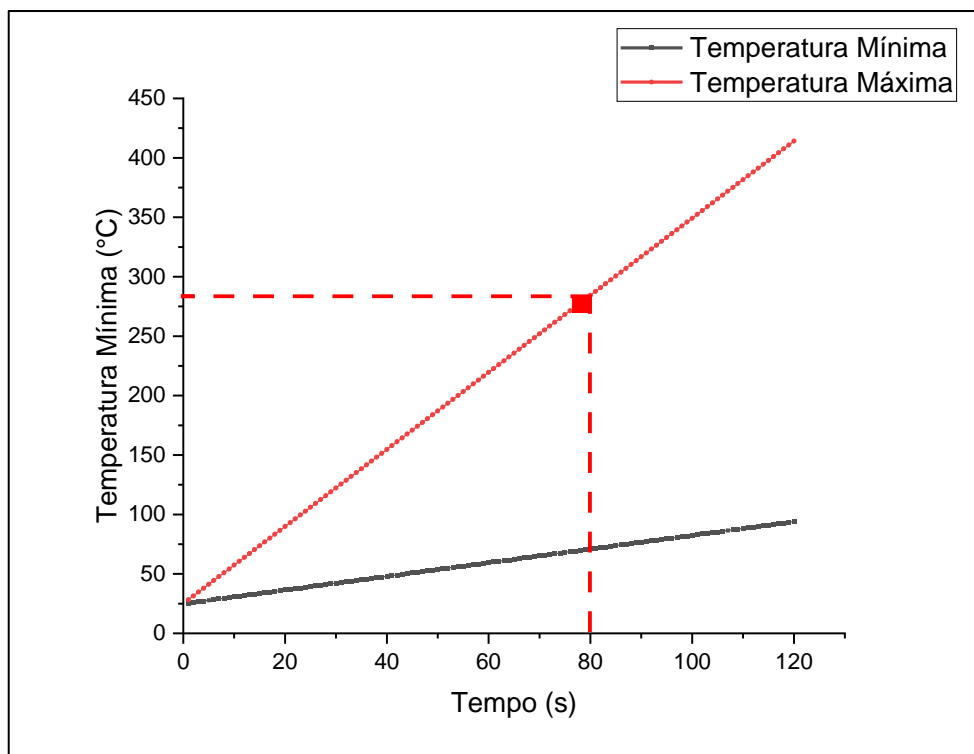
Figura 36 - Distribuição de Temperatura ao longo do compósito PEI-FV.



Segundo Xiong, *et al.* (2021), para a soldagem por resistência elétrica do compósito PEI/FV, a temperatura na junta deve alcançar entre 270 °C e 300 °C por 30 segundos para uma união efetiva. Com base nos dados de variação de temperatura apresentados no gráfico da Figura 37, verifica-se que, apesar da má distribuição de temperatura pela superfície, para a melhor condição de soldagem, com o maior valor de resistência no ensaio de *lap shear*, essa

faixa de temperatura ideal é atingida por volta de 80 segundos, quando alcança um patamar de 275 °C. Após esse ponto, durante os 40 segundos restantes do processo, ocorre a união efetiva da matriz polimérica com a superfície do alumínio, destacando-se que a temperatura continua a subir até aproximadamente 400 °C, permanecendo no limite de temperatura de degradação.

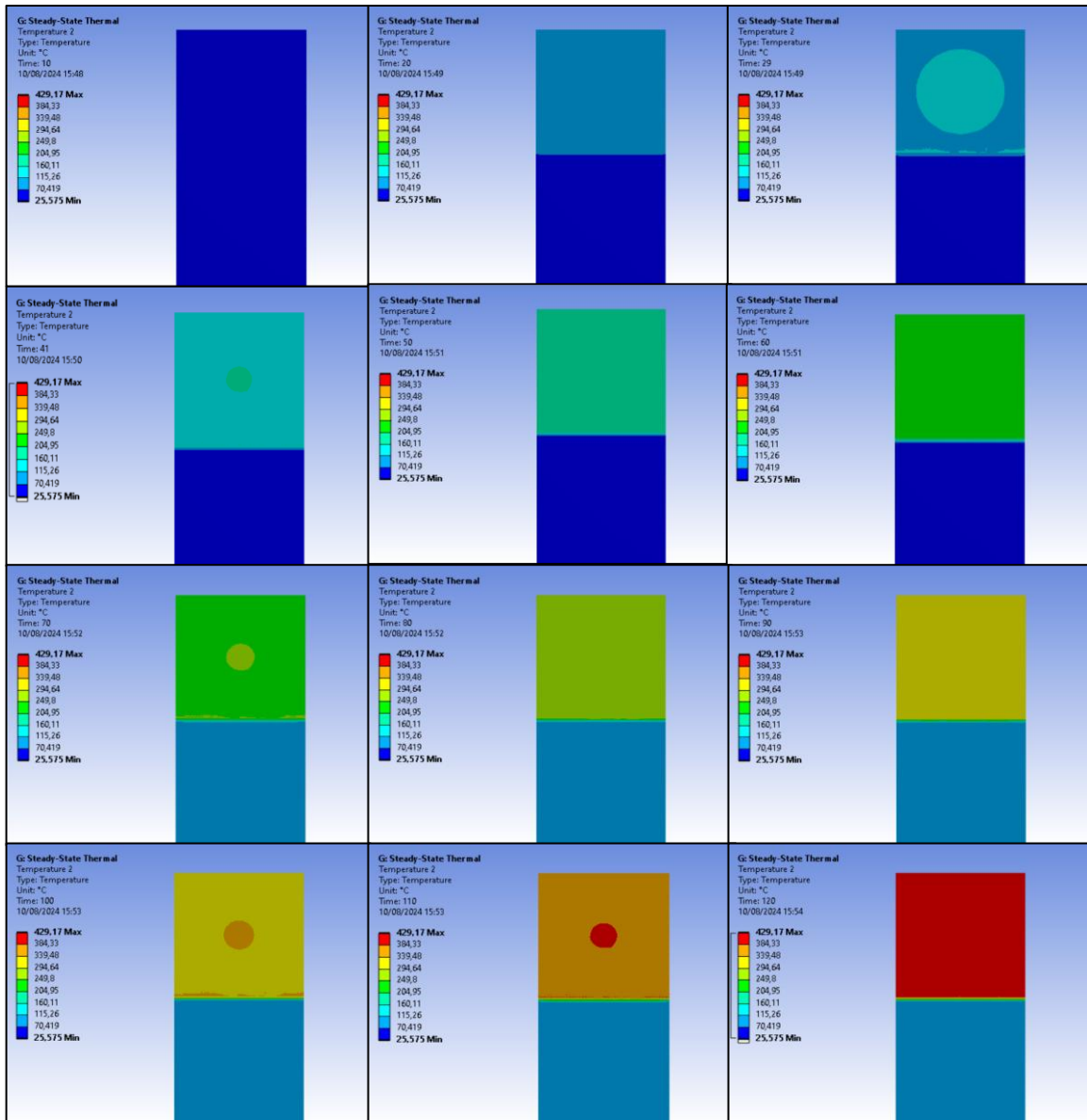
Figura 37 – Progressão de temperatura alcançada ao longo do tempo pela técnica de soldagem por oxiacetileno na superfície do compósito PEI-FV.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Contudo, devido à uniformidade na distribuição de temperatura durante o tempo de soldagem pela face do compósito, a simulação mostra que, aos 80 segundos, a faixa de temperatura ideal é alcançada apenas no centro da área da junta. Essa temperatura só atinge as extremidades após 100 segundos de soldagem, não deixando tempo suficiente para formar uma boa adesão das bordas da junta. A Figura 38 ilustra a evolução do gradiente de temperatura a cada 10 segundos ao longo dos 120 segundos do processo de soldagem na interface de contato entre o compósito e alumínio.

Figura 38 - Evolução do gradiente de temperatura a cada 10 segundos durante o processo de soldagem oxiacetilênica do composto PEI-FV na interface de contato da junta.

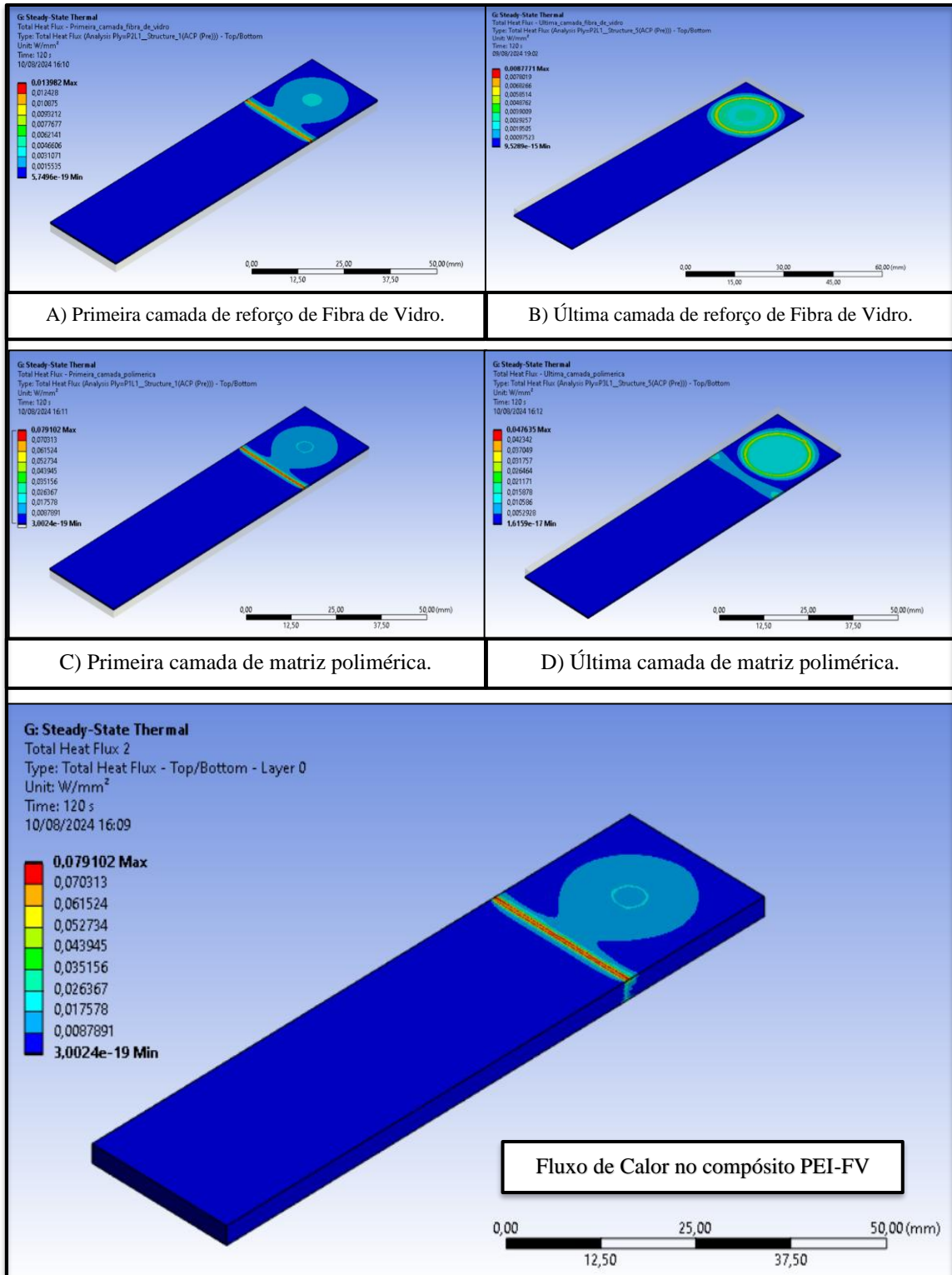


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

5.1.2 Fluxo de Calor

O fluxo de calor foi avaliado separadamente nas camadas de reforço de fibra de vidro e da matriz polimérica poli(éter-imida), tanto nas mais próximas quanto nas mais distantes da fonte de calor, e, por fim, no laminado completo. Essa estratégia de análise facilita a validação do comportamento de cada camada distinta que compõe o laminado, como é mostrado na Figura 39.

Figura 39 - Fluxo de calor considerando a face de contato da junta do compósito PEI-FV no processo de soldagem oxiacetilênica.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Observa-se uma variação na intensidade do fluxo de acordo com o tipo de material. O fluxo de calor, sendo uma grandeza regida pela Lei de Fourier, descreve como a temperatura

varia no meio em função da condutividade térmica do material. A simulação demonstrou um fluxo de calor menor ao longo da camada de reforço de fibra de vidro em comparação à camada de matriz de poli(éter-imida), comportamento esperado devido às propriedades térmicas da fibra de vidro, que é um excelente isolante térmico. Pode-se observar na imagens da Figura 39 que a mudança no fluxo de calor também está relacionada com a distância das camadas em relação à fonte de calor , pode-se observar que as camadas mais próximas da superfície em contato com o alumínio apresentam maior fluxo de calor do que as camadas abaixo, o que é um comportamento esperado porque as camadas superficiais mais próximas da fonte de calor recebem mais energia térmica, resultando em maior fluxo de calor , enquanto as camadas inferiores mais distantes da fonte de calor apresentam menor fluxo de calor devido à redução da energia térmica em toda a espessura da fonte de calor, como é comprovado pelos dados da Tabela 12.

Tabela 12 - Fluxo de calor nas camadas de reforço e matriz do compósito PEI-FV mais próximas da fonte de calor no processo de soldagem oxiacetilênica.

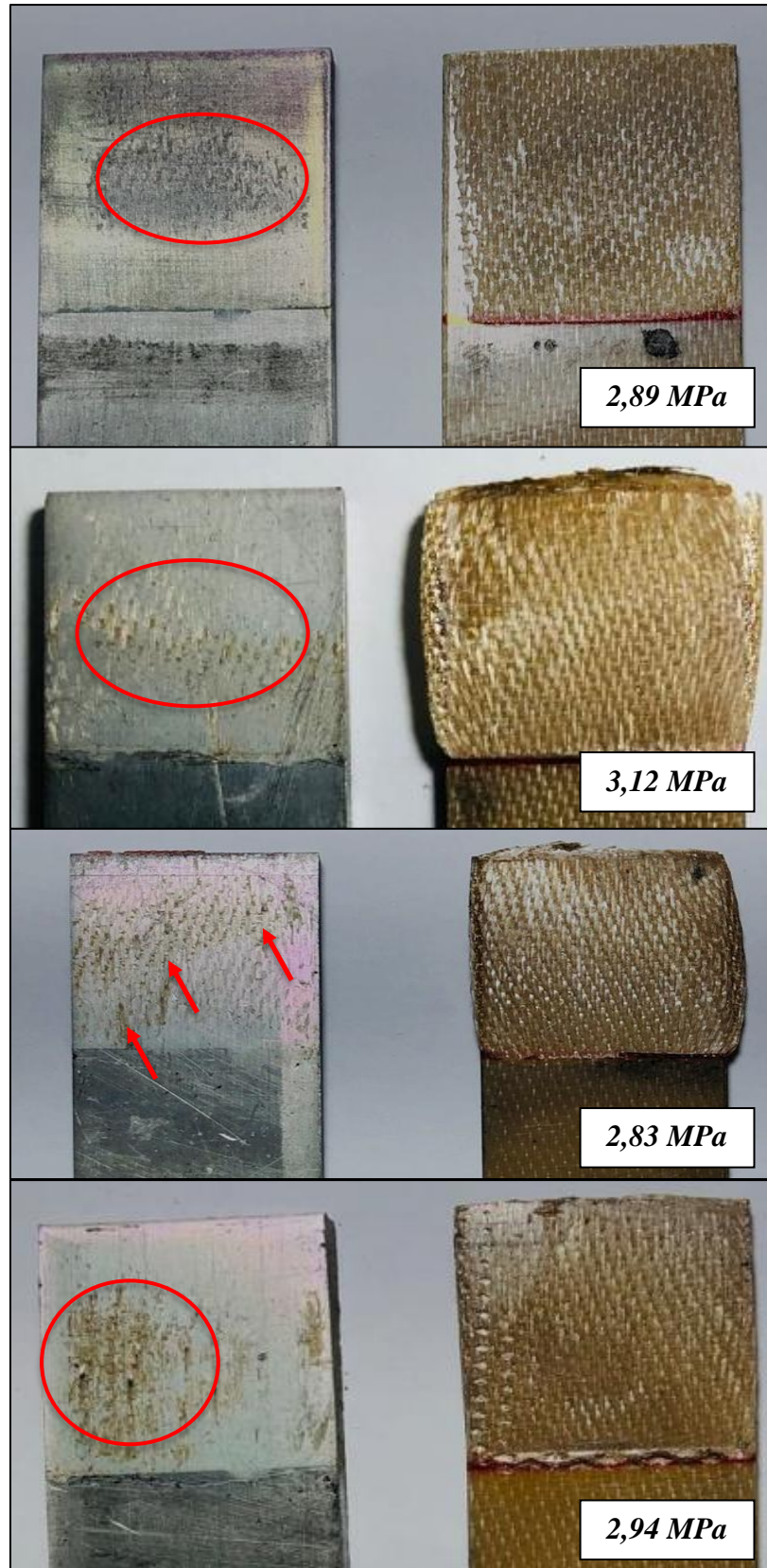
Camada	Constituinte	Fluxo de Calor (W/mm²)
Primeira	Reforço de Fibra de Vidro	13,982 x 10 ⁻³
	Matriz Polimérica	79,102 x 10 ⁻³
Última	Reforço de Fibra de Vidro	09,979 x 10 ⁻³
	Matriz Polimérica	47,635 x 10 ⁻³
Compósito	Laminado reforçado	79,102 x 10 ⁻³

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

5.1.3 Validação do modelo com Ensaio Mecânico

Após o processo de soldagem, os corpos de prova foram submetidos à avaliação de resistência mecânica por meio do ensaio de tração para juntas poliméricas sobrepostas, conhecido como ensaio de *Lap Shear*. Foram ensaiadas quatro amostras, os valores de resistência a tração estão indicados nas imagens em Mega Pascal. Conforme ilustrado na Figura 40, observou-se que as juntas não apresentaram uma adesão uniforme. Resquícios da fase polimérica são visíveis na superfície do alumínio, indicadas pelas setas e círculos em vermelho, porém estão concentrados principalmente na parte central da área da junta.

Figura 40 – Ensaio de *Lap Shear* em amostras produzidas pelo processo de Soldagem Oxiacetilênica.

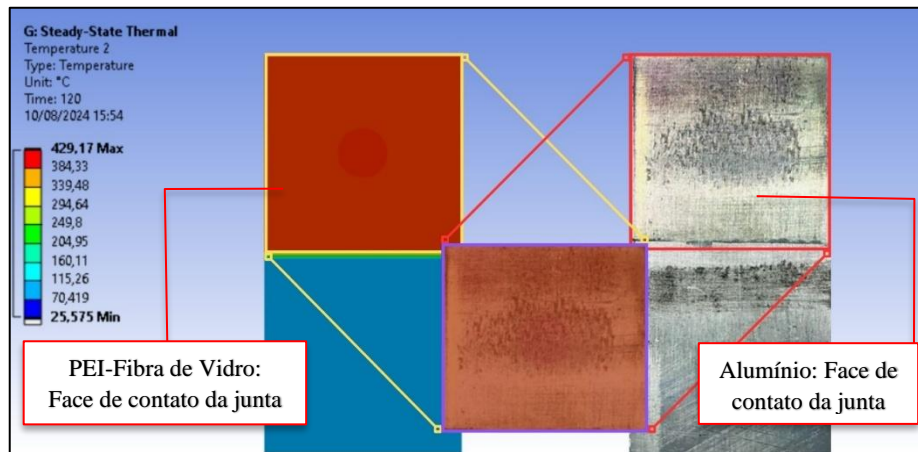


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

De acordo com a norma ASTM D 5573-98 (2012), que classifica os tipos de falhas em materiais compósitos unidos por adesão, as amostras apresentam diferentes modos de falhas, o que indica a influência da adesão interfacial na junta formada. As quatro amostras apresentam rupturas com padrão de falhas mistas, combinando a falhas interfaciais, indicando a deficiência na ancoragem mecânica e na adesão físico-química entre o PEI e o alumínio, e falhas coesivas na matriz polimérica, que são evidenciadas pela presença de resquícios do polímero aderidos à superfícies dos alumínios. Essas morfologias de fraturas podem estar associadas a uma distribuição desigual do calor e da pressão durante o processo de soldagem.

Correlacionando as imagens da simulação com a superfície do alumínio após os ensaios das juntas conforme a Figura 41, é possível observar que a simulação representa bem o fenômeno de aquecimento, a adesão da fase polimérica ocorrendo somente no centro do componente metálico corroborando os dados numéricos, o polímero mais fluido devido a maior concentração de calor na área central possibilita melhor interação com o alumínio e por sua vez a garante uma ocupação de maior volume de polímero nos vales e picos rugosos na superfície do alumínio.

Figura 41 – Correlação entre face de contato da junta do componente compósito PEI-FV obtido por simulação computacional com a face de contato da junta do componente de alumínio da amostra soldada por oxiacetileno.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

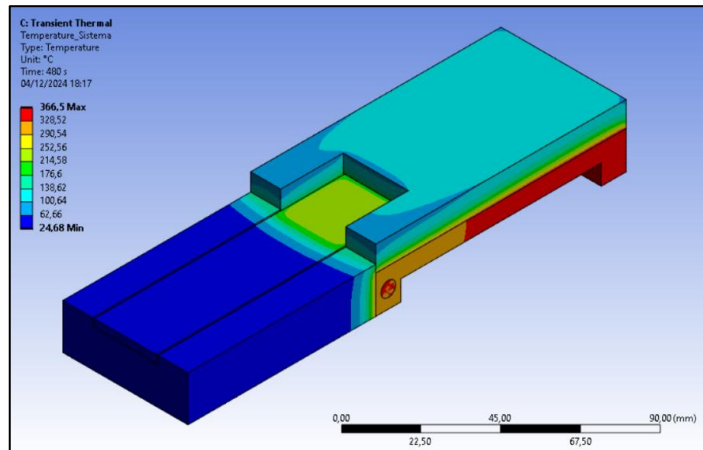
5.2 ANÁLISE TÉRMICA NUMÉRICA DA SOLDAGEM POR PRENSAGEM A QUENTE

5.2.1 Gradiente de Temperatura

A utilização de elementos de contato específicos para modelar a interação entre as superfícies foi crucial para alcançar uma simulação precisa do sistema de soldagem por prensagem a quente. O modelo reproduziu de forma satisfatória o aquecimento do alumínio

2024-T3 pela base térmica, com a transferência de calor por condução até o compósito PEI-Fibra de Vidro, enquanto as regiões isoladas mantiveram-se termicamente protegidas conforme o esperado. Na Figura 42, observa-se que o gradiente de temperatura alcançado na base aquecida, a partir da potência aplicada, aproxima-se dos valores médios previamente obtidos na calibração experimental do equipamento.

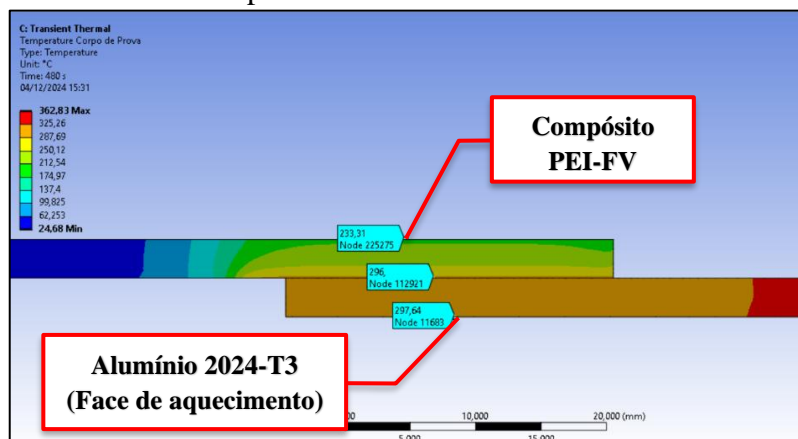
Figura 42 - Distribuição do gradiente de temperatura do sistema de prensagem a quente.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Na Figura 43, os componentes responsáveis pela formação da junta são isolados para permitir uma melhor visualização do gradiente de temperatura na interface de contato. Nota-se que a distribuição térmica ocorre de maneira uniforme na interface, assegurando uma transferência de calor eficaz entre os materiais. Além disso, o restante do corpo de prova do compósito permanece em uma faixa de temperatura abaixo da temperatura de degradação do PEI, garantindo que sua integridade estrutural não seja comprometida durante o processo de soldagem.

Figura 43 - Vista lateral do corpo de prova evidenciando a distribuição do gradiente de temperatura entre os materiais.

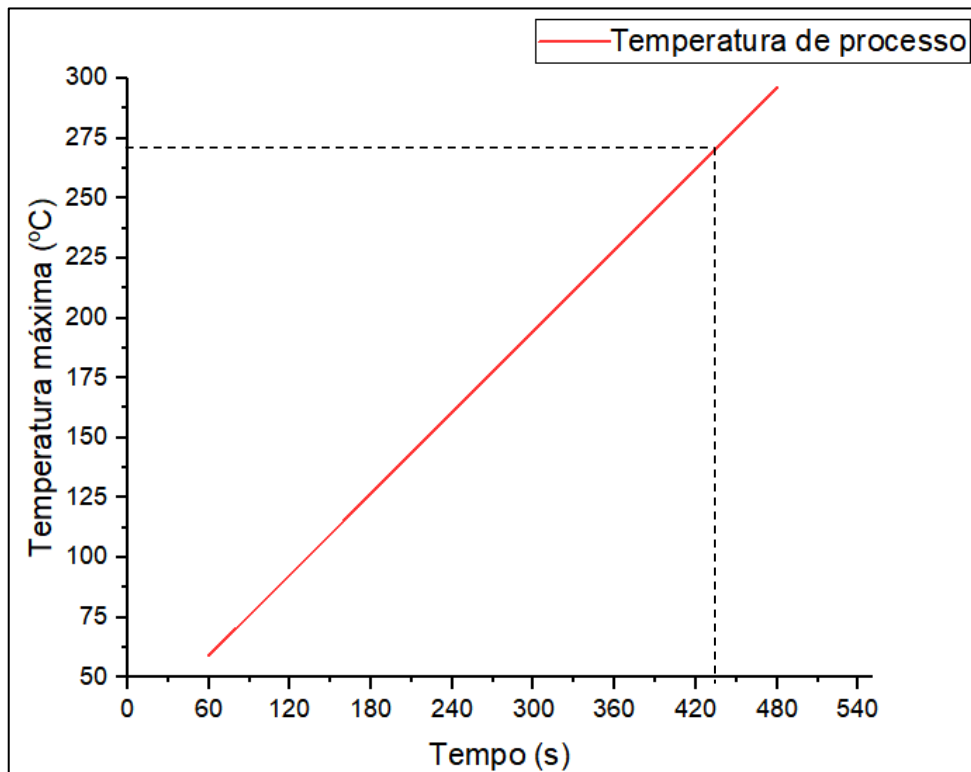


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Assim como no processo de soldagem anterior, este também apresenta uma variação de temperatura entre a face de aquecimento e a extremidade do compósito PEI-FV. A faixa de temperatura alcançada na interface de contato dos materiais, de 296 °C ao final do processo, permanece abaixo da temperatura de transição vítrea do PEI. No entanto, a utilização do filme intermediário de PEI complementa a quantidade de material polimérico necessária para assegurar um intertravamento micromecânico eficiente. Devido à sua pequena espessura, o filme atinge rapidamente o amolecimento, favorecendo sua fluência pelas ranhuras de rugosidade do alumínio e permitindo a adesão química com a matriz base do compósito, também constituída de PEI.

De acordo com Xiong, *et al.* (2021), a simulação demonstra que a temperatura alcançada durante o processo de soldagem está dentro da faixa necessária para a efetivação de uma junta soldada. No gráfico apresentado na Figura 44, ao considerar exclusivamente o componente compósito, observa-se que a temperatura de 270 °C, correspondente à área de contato com o alumínio, é atingida por volta dos 440 segundos. Esse resultado indica que há um tempo residual de mais de 60 segundos para garantir a formação adequada da junta, assegurando condições favoráveis para a soldagem.

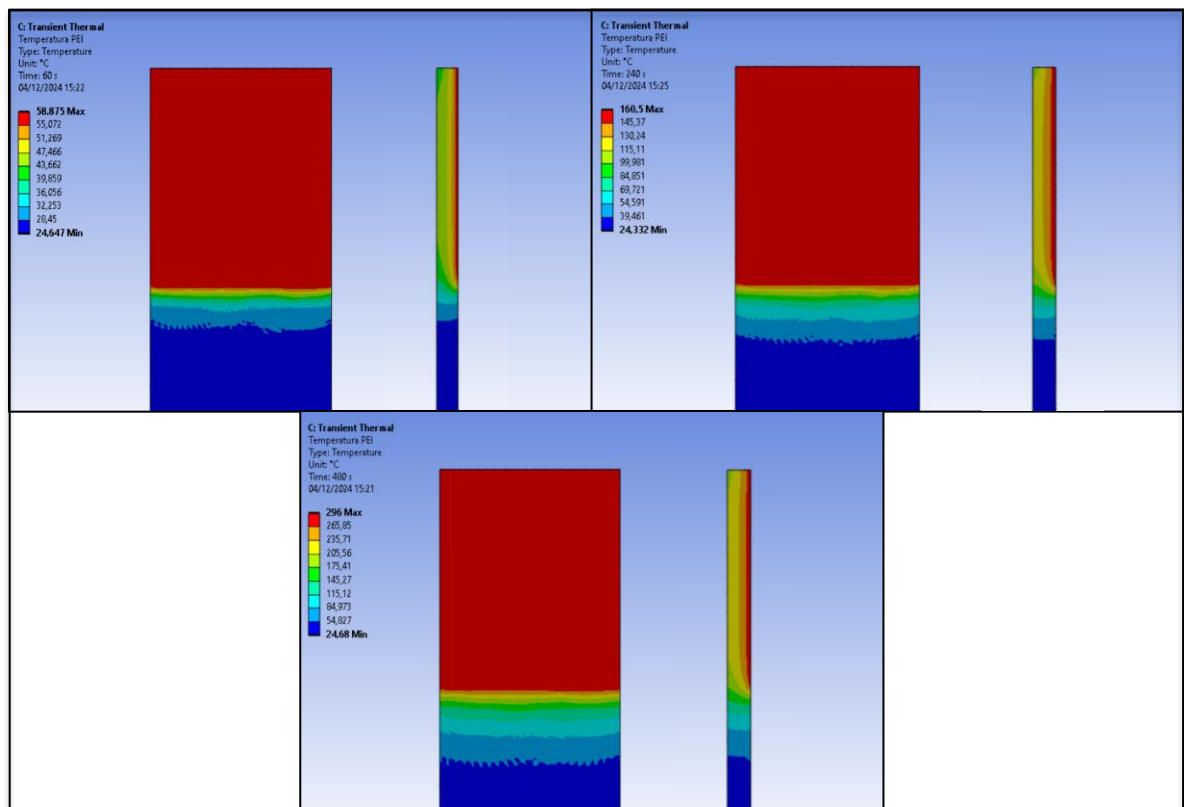
Figura 44 - Progressão de temperatura alcançada ao longo do tempo pela técnica de soldagem prensagem a quente na superfície do compósito PEI-FV.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Ao isolar visualmente o componente compósito do modelo, destacando a face de contato com o alumínio (Figura 45), observa-se que a distribuição de temperatura é homogênea em toda a área da junta, o que favorece a formação de um maior número de pontos de intertravamento micromecânico. Considerando os instantes de 60 s, 240 s e 480 s, é notável que, ao contrário do processo de soldagem anterior, a distribuição de temperatura não se concentra em um ponto específico da face, mas se espalha de maneira uniforme por toda a área de contato. Isso contribui para uma transferência térmica mais eficiente e para uma união mais robusta entre os materiais.

Figura 45 - Distribuição do gradiente de temperatura na superfície do compósito PEI-FV na face de contato da junta no processo de soldagem por prensagem a quente.



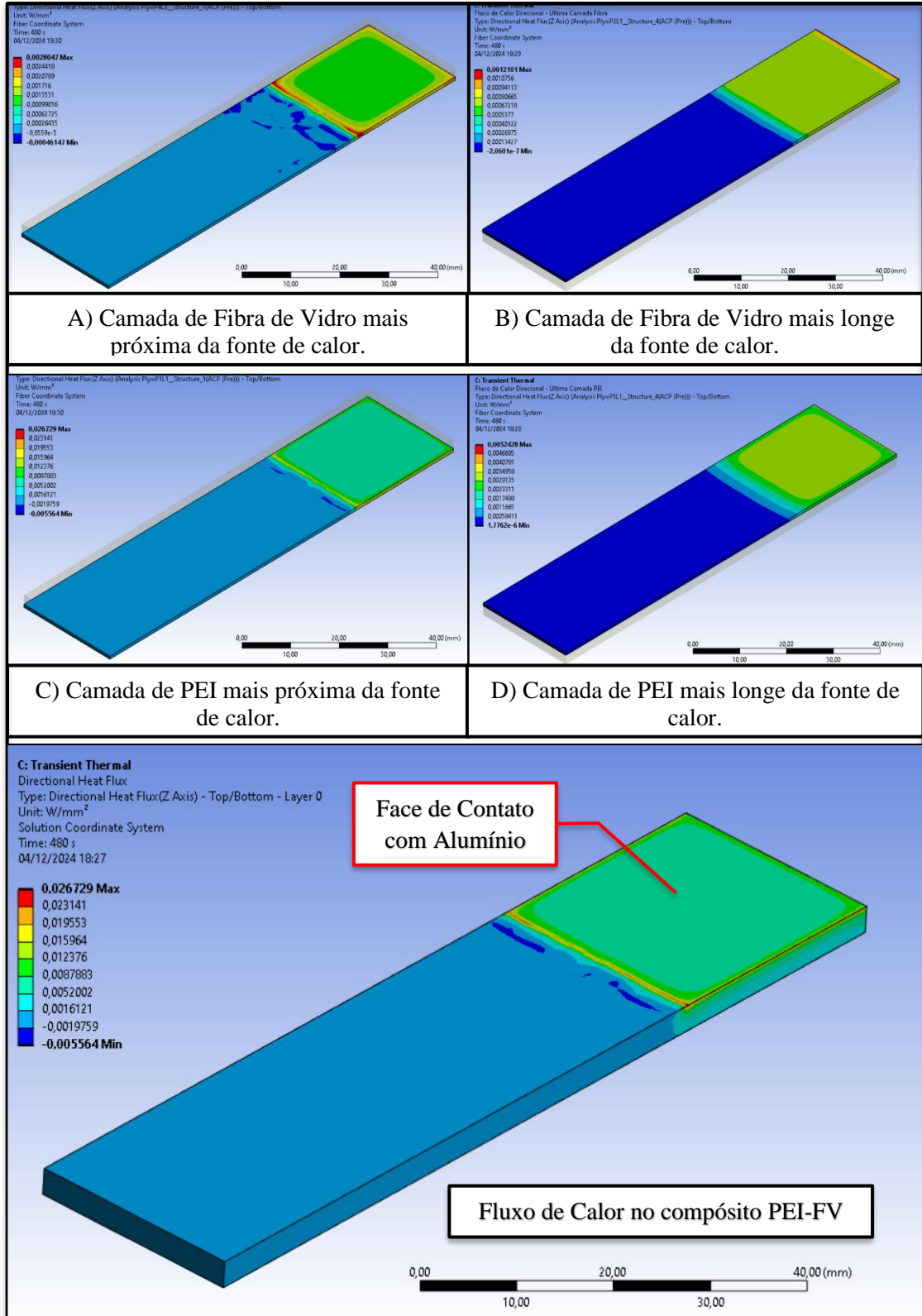
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

5.2.2 Fluxo de Calor

Assim como no processo anterior, as camadas constituintes do compósito PEI-FV foram avaliadas individualmente quanto ao fluxo de calor, analisando-se separadamente as camadas mais próximas e mais distantes da fonte de calor, além do laminado como um todo. Essa abordagem facilita a validação do comportamento térmico específico de cada camada,

forneendo uma compreens3o mais detalhada da transfer4ncia de calor entre os materiais. Os resultados dessa an3lise detalhada est3o ilustrados na Figura 46.

Figura 46 - Fluxo de calor considerando a face de contato da junta do comp3sito PEI-FV no processo de soldagem por prensagem a quente.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Como esperado, a posição das camadas influencia significativamente o fluxo de calor que passa por cada uma delas, sendo maiores nas camadas mais próximas da fonte de calor. Além disso, observa-se que as fibras de vidro apresentam um fluxo de calor menor em comparação às camadas de poli(éter-imida), comportamento já identificado e discutido no processo de soldagem por oxiacetileno. A Tabela 13 apresenta os valores da intensidade do fluxo de calor em cada camada, expressos em watts por milímetro quadrado, detalhando a distribuição térmica ao longo do laminado.

Tabela 13 - Fluxo de calor nas camadas de reforço e matriz do compósito PEI-FV durante processo de soldagem por prensagem a quente.

Camada	Constituinte	Fluxo de Calor (W/mm²)
Próxima a fonte de calor	Reforço de Fibra de Vidro	$02,805 \times 10^{-3}$
	Matriz Polimérica	$26,729 \times 10^{-3}$
Distante da fonte de calor	Reforço de Fibra de Vidro	$01,210 \times 10^{-3}$
	Matriz Polimérica	$05,243 \times 10^{-3}$
<i>Compósito</i>	<i>Laminado reforçado</i>	$26,729 \times 10^{-3}$

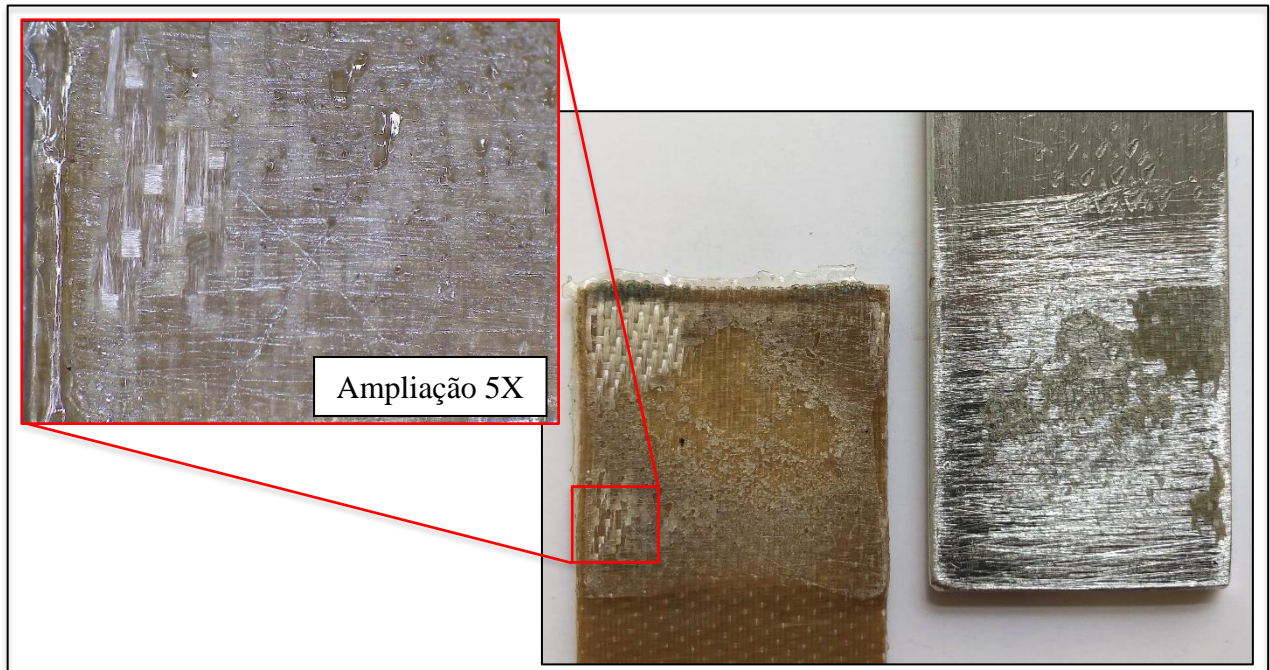
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

5.2.3 Validação do modelo

Durante a calibração, a temperatura média da base foi de 357 °C em 8 minutos, enquanto a simulação apresentou um valor de 366,5 °C, com uma diferença de apenas 9,5 °C. Para a temperatura da junta, os valores médios foram de 276 °C na calibração e 296 °C na simulação, com uma variação um pouco maior de 20 °C, mas ainda dentro de uma faixa aceitável para a validação do modelo.

Além da simulação computacional, foram realizadas soldagens experimentais para avaliação da resistência mecânica das juntas por meio do ensaio de *Lap Shear*. Foram ensaiadas duas amostras, apresentando resistências de 13,184 MPa (amostra 01) e 11,324 MPa (amostra 02). Na Figura 47, é possível observar o detalhe da fratura na amostra 01, onde se nota a presença de poli(éter-imida) e lascas da fase de reforço de fibras de vidro na superfície do alumínio, também nesta amostra é possível identificar a presença de fragmentos de alumínio aderidos na face do compósito após a fratura, evidenciando, segundo a norma ASTM D 5573 – 98 (2012), um mecanismo de falha predominantemente coesivo no alumínio, e em menor escala uma falha mista (coesiva/adesiva) na interface com o PEI-FV.

Figura 47 - Detalhe da fratura da junta da amostra 01 soldada pelo processo de prensagem a quente.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A presença desses fragmentos infere que a interface alumínio-compósito neste processo de soldagem obteve um ancoramento micromecânico mais eficiente, possivelmente por conta da difusão superficial promovida pela temperatura e pressão aplicadas durante a soldagem. Isso indica que ocorreu uma boa interação entre os materiais, reduzindo a incidências de falhas somente no componente compósito, melhorando a resistência global da junta.

Por fim, a simulação numérica do processo de soldagem por prensagem a quente evidenciou uma distribuição térmica mais homogênea pela interface de união, o que favorece a fusão do polímero proporcionando uma melhor interação do polímero amolecido pela rugosidade da superfície do alumínio.

5.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE SOLDAGEM POR OXIACETILENO E PRENSAGEM A QUENTE

A comparação entre os dois processos de soldagem para materiais dissimilares permite identificar as principais vantagens e limitações de cada técnica. A escolha do processo mais adequado para aplicações industriais depende das condições operações e dos requisitos de resistência mecânicas da junta exigidos pelo projeto, bem como a viabilidade econômica. A

Tabela 14 apresenta uma comparação entre os dois processos, destacando os principais critérios de desempenho avaliados neste estudo.

Tabela 14 - Comparação entre os processos de soldagem por oxiacetileno e prensagem a quente.

Critério	Soldagem por Oxiacetileno	Soldagem por Prensagem a Quente
Controle Térmico	Baixo – risco de degradação térmica do polímero	Elevado – controle preciso da temperatura
Qualidade da Interface da Junta	Moderado – variáveis de processo de difícil controle e reprodutibilidade	Alta – boa difusão interfacial
Resistência da Junta	Variável - variáveis de processo de difícil controle e reprodutibilidade	Superior – maior homogeneidade e resistência
Equipamento necessário	Simple e de baixo custo	Específico e de maior custo
Tempo de processamento	Relativamente curto	Maior devido à necessidade de controle térmico e pressão
Aplicabilidade Industrial	Alta – método tradicional e amplamente utilizado	Moderado – mais indicado para aplicações especializadas

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

6 CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi realizar uma análise térmica tridimensional do compósito PEI/Fibra de Vidro utilizando o Método dos Elementos Finitos, com foco na estimativa do comportamento térmico a partir da distribuição de temperatura e do gradiente térmico. Ambos os processos de soldagem foram simulados com sucesso, e a comparação entre eles destacou as vantagens do processo de prensagem a quente em relação ao de oxiacetileno.

No caso da soldagem oxiacetilênica, a dificuldade de controle dos parâmetros, devido ao caráter manual/artesanal do processo, resultou em uma baixa reprodutibilidade. A concentração extremamente pontual de alta temperatura gerou uma má distribuição do gradiente térmico, comprometendo a união da junta pela insuficiência de amolecimento da fase polimérica do compósito.

Em contrapartida, o processo de prensagem a quente se destacou pela precisão no controle de parâmetros críticos, de temperatura, tempo e pressão. Essa maior estabilidade promoveu uma distribuição mais eficiente do gradiente térmico, resultando em juntas significativamente mais resistentes. Enquanto a média do valor de resistência entre os dois melhores resultados do processo oxiacetileno foi de 2,94 MPa, a média do processo de prensagem a quente alcançou 12,25 MPa, representando um aumento de aproximadamente 316%.

Além disso, o processo de prensagem a quente apresenta vantagens em termos de segurança operacional e impacto ambiental. Este método expõe o operador a menos riscos, já que elimina a necessidade de trabalhar com altas temperaturas pontuais e não envolve a queima de gases tóxicos ou inflamáveis, reduzindo significativamente os riscos de explosão. Do ponto de vista ambiental, o processo de prensagem a quente, por ser alimentado eletricamente, dispensa a queima de gases poluentes, tornando-se uma alternativa mais sustentável.

Em suma, este trabalho demonstrou que a análise térmica tridimensional utilizando o Método dos Elementos Finitos é uma ferramenta eficaz para entender e otimizar os processos de soldagem em juntas metal-compósito. A comparação entre os métodos avaliados demonstrou as limitações do processo de soldagem oxiacetilênica e as vantagens significativas do processo de prensagem a quente, tanto em termos de desempenho mecânico das juntas quanto de segurança operacional e sustentabilidade ambiental. Esses resultados reforçam o potencial do processo de prensagem a quente como uma alternativa melhor para soldagem metal-compósito, oferecendo maior eficiência, confiabilidade e menor impacto ambiental, consolidando sua relevância como método de união em sistemas híbridos.

6.1 CONTINUIDADE DO PROJETO

O protótipo construído para soldagem de prensagem a quente demonstrou eficiência na realização da solda, o que motiva a construção de um equipamento operacional. Dentre as melhorias propostas, se destaca o aumento da capacidade de aquecimento da base, com a instalação de uma resistência de maior potência. Essa modificação tem o objetivo de reduzir o tempo necessário para atingir as temperaturas ideais, promovendo um amolecimento mais rápido da fase polimérica do compósito.

Outro item essencial será a elaboração de um planejamento experimental do processo de soldagem, otimizando os parâmetros e consequentemente aumentar a resistência mecânica das juntas soldadas. Complementando, a substituição do sistema atualmente utilizado de aplicação e controle da pressão por atuadores elétricos, proporcionando maior precisão no controle da força aplicada sobre a junta.

Essas propostas de melhorias abrirão caminhos para a aplicação do equipamento para outros tipos de materiais compósitos, expandindo as possibilidades de pesquisas na soldagem de materiais dissimilares e consolidando este processo como uma solução promissora.

REFERÊNCIAS

- ABDULLA, K. A. *et al.* Experimental and harmonic modal analysis of composite spur gear using ANSYS ACP. **International Journal Of Mechanical And Production Engineering Research And Development (Ijimperd)**. Índia, v. 10, p. 15401-15416. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/370490897_EXPERIMENTAL_AND_HARMONIC_MODAL_ANALYSIS_OF_COMPOSITE_SPUR_GEAR_USING_ANSYS_ACP#fullTextFileContent. Acesso em: 17 mar. 2024.
- ABRAHÃO, A. B. R. M. **Otimização do processo de soldagem por resistência elétrica em compósitos PEI/fibras contínuas para aplicações aeronáuticas**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2015.
- AGEORGES, C. *et al.* Resistance welding of metal/thermoplastic composite joints. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**. Austrália, v. 14, n. 6, p. 449–475, 2001. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1106/PN74-QXKH-7XBE-XKF5>. Acesso em: 21 jun. 2023.
- AMANCIO-FILHO, S. T. *et al.* Joining of polymers and polymer–metal hybrid structures: Recent developments and trends. **Polymer Engineering & Science**, Áustria, v. 49, n. 8, p. 1461–1476, 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 3063 – 01**: Standard test method for determining strength of adhesively bonded rigid plastic lap-shear joints in shear by tension loading. Estados Unidos: ASTM, 2001.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5573 – 98**: Standard practice for classifying failure modes in fiber-reinforced-plastic (FRP) joints. Estados Unidos: ASTM, 2012.
- ANDRÉ, N. M. *et al.* Influência da espessura do filme polimérico intermediário na resistência mecânica de juntas híbridas de alumínio 2024-T3 e CF-PPS produzidas por união pontual por fricção. **Soldagem and Inspeção**, São Paulo, v. 21, p. 2–15, 2016.
- ANSYS. **ANSYS Composite PrepPost User's Guide**. Canonsburg: ANSYS INC, 2013.
- ANSYS. **ANSYS Contact Technology Guide**. Canonsburg: ANSYS INC, 2004.
- ANSYS. **ANSYS Meshing User's Guide**. Canonsburg: ANSYS INC, 2010.
- ANSYS. **ANSYS Thermal Analysis Guide**. Canonsburg: ANSYS INC, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 2107**: Alumínio e suas ligas - produtos trabalháveis - designações das têmperas. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Informações propriedades e aplicações do alumínio**, [2024]. Disponível em: <https://abal.org.br/>. Acesso em: 22 abr. 2024.

BALDAN, A. Adhesively-bonded joints in metallic alloys, polymers and composite materials: mechanical and environmental durability performance. **Journal of Materials Science**, Turquia, v. 39, n. 15, p. 4729–4797, 2004.

BECKER, S. *et al.* Process improvement of continuous induction welding of carbon fiber-reinforced polymer composites. **Journal of Materials Engineering and Performance**, Alemanha, v. 31, n. 9, p. 7049–7060, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11665-022-06842-0>. Acesso em: 21 jun. 2023.

BEZERRA, A. C. **Simulação numérica da soldagem com aplicação à caracterização do comportamento dinâmico de estruturas soldadas**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14774/1/ACBezerraTES1PRT.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2024.

BLANCO, L. *et al.* Optimization of direct dissimilar joining metal – thermoplastic composite for automotive and aerospace applications. **Revista de Materiales Compuestos**, Madri, v. 04-Comunicaciones Matcomp19 (2020), n. 2-Procesos de Fabricación y Técnicas de Unión, 2022. Disponível em: https://www.scipedia.com/public/Blanco_et_al_2022b. Acesso em: 19 set. 2024.

CATSMAN, P. Polyetherimide (PEI): substituting metal. **Kunststoffe**, Alemanha, v. 95, n.10, p.143-147, 2005.

DAWEI, Z. *et al.* Review on joining process of carbon fiber-reinforced polymer and metal: methods and joining process. **Rare Metal Materials and Engineering**, China, v. 47, n. 12, p. 3686-3696, 2018.

GALIŃSKA, A. Mechanical joining of fibre reinforced polymer composites to metals—a review. Part I: bolted joining. **Polymers**, Polônia, v. 12, n. 10, p. 2252, 2020.

GOUIN O'SHAUGHNESSEY, P. *et al.* Modeling and experimental investigation of induction welding of thermoplastic composites and comparison with other welding processes. **Journal of Composite Materials**, Canadá, v. 50, n. 21, p. 2895–2910, 2016. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0021998315614991>. Acesso em: 30 jun. 2023.

GUIMARÃES, F. A. **Avaliação das propriedades mecânicas de um compósito híbrido de matriz termoplástica PPS reforçado com fibras de carbono contínuas e descontínuas**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2018.

HASSAN, N. B. **Thermal analysis of carbon fiber composite structure by finite element analysis**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universiti Teknologi Petronas, Tronoh, 2013.

HUSSEIN, S. K.; MHESSAN, A. N.; ALWAN, M. A Hot press joining optimization of polyethylene to aluminium alloy AA6061-T6 lap joint using design of experiments. **Engineering Journal**, Iraque, v. 21, n. 7, p. 157–169, 2017. Disponível em: <http://www.engj.org/index.php/ej/article/view/1468/696>. Acesso em: 27 maio 2024.

JIMÉNEZ, A. P. **Heat transfer optimization of heat exchangers and thermal modelling through ANSYS**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - University Of Castilla-La Mancha Edii-Albacete, Schmalkalden, 2013.

KHOSRAVANI, M. R. *et al.* Influence of strain rate on fracture behavior of sandwich composite T-joints. **European Journal of Mechanics / A Solids**, Alemanha, v. 78, n. 10, p. 38-21, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0997753819302943>. Acesso em: 02 maio 2024.

KUMBHARE, N. *et al.* Analysis of composite structures in curing process for shape deformations and shear stress: basis for advanced optimization. **J. Compos. Sci.** Estados Unidos, v. 5, n. 63, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jcs5020063>. Acesso em: 03 maio 2024.

LAMBIASE, F. *et al.* A state-of-the-art review on advanced joining processes for metal-composite and metal-polymer hybrid structures. **Materials**, L'Aquila, v. 14, n. 8, p. 1890, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/8/1890>. Acesso em: 17 jun. 2024.

LEI, Z. *et al.* Finite-element inverse analysis of residual stress for laser welding based on a contour method. **Optics and Laser Technology**. **Optics and Laser Technology**. China, v. 129, n. 3, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106289>. Acesso em: 23 mar. 2024.

LI, J. *et al.* The technology and current applications of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites. **Polymer Composites**, Pequim, v. 45, n. 15, p. 13480–13498, 2024.

LOBÃO, B. S. P. **Análise numérica-experimental de juntas coladas metal-compósito**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2015.

LUCAS, R. R. **Estudo da oxidação eletrolítica a plasma na liga AA2024-T3 para soldagem com compósito PEI/Fibra de Vidro**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2022.

LUCAS, R. R. *et al.* Experimental design of the adhesion between a pei/glass fiber composite and the AA1100 aluminum alloy with oxide coating produced via plasma electrolytic oxidation (PEO). **Ceramics**, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 596–606, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-6131/7/2/39>. Acesso em: 14 nov. 2024

MACKERLE, J. Finite elements in the analysis of pressure vessels and piping, an addendum: a bibliography (2001-2004). **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Suécia, v. 82, n. 7, p. 571–592, 2005.

MANSUR, H. S. **Técnicas de caracterização de materiais**. Belo Horizonte, [s.d.]. Disponível em: <http://www.biomaterial.com.br/capitulo7part01.pdf>. Acesso em: 15 set. 2023.

MARQUES, L. F. B. **Influência do intemperismo no mecanismo da fratura de compósitos soldados PEI/fibra de vidro**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2020.

MESSLER, R. W. Joining composite materials and structures: some thought-provoking possibilities. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, Estados Unidos, v. 17, n. 1, p. 51–75, 2004. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0892705704033336>. Acesso em: 22 mar 2024.

MIRLISENNA, G. Método dos elementos finitos: o que é?. **ESSS**, 2016. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>. Acesso em: 10 de set. 2022.

MITSCHANG, P. *et al.* Induction spot welding of metal/ CFRPC hybrid joints. **Advanced Engineering Materials**, Alemanha, v. 15, n. 9, p. 804–813, 2013. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adem.201200273>. Acesso em: 22 mar. 2024.

MUI, T. S. M. **Influência de tratamentos a plasma na resistência à corrosão e na propriedade de adesão de uma camada protetiva sobre a superfície de ligas de alumínio**. 2016. Dissertação (Mestrado em engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/136178>. Acesso em: 10 maio 2024.

O'BRIEN, A.; GUZMAN, C. (EDS.). **Welding handbook: welding processes**. Miami, FL: American Welding Society, 2007, v. 3, p. 2.

QU, X.; LI, H. **Welding process of CFRP and metal: a systematic Review**. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.24423/ENGTRANS.1130.20200804>. Acesso em: 10 mar. 2024.

REDDY, J. N. **An introduction to the finite element method**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2005.

REIS, J. F. **Estudo da soldagem entre alumínio 2024-T3 e compósito PEI/fibra de vidro para aplicação aeronáutica**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2021.

REIS, J. F. *et al.* Feasibility study of the oxy fuel gas welding (OFW) process in AA2024-T3 and GF/PEI composite joint. **Welding in the World**, São Paulo, p. 1–10, 2021.

REIS, J. P. *et al.* Thermoplastic composites and their promising applications in joining and repair composites structures: a review. **Materials**, v. 13, n. 24, p. 5832, 2020.

ROGALSKI, M. E. **Composite joining system and method**. Depósito: Mark E. Rogalski. US 9193129 B2. Depósito: 16 nov. 2012. Concessão: 24 nov. 2015.

ROYLANCE, D. **Finite element analysis**. Cambridge, Massachusetts Institute of Technology, 2001. Disponível em: <https://resources.saylor.org/wwwresources/archived/site/wp-content/uploads/2012/09/ME1023.2.3.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2024.

SANTOS, T. S. R. *et al.* Preparo da modelagem de dados em MEF do compósito PEI/FV com ACP. *In: VI WORKSHOP DA PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA*, 4., 2022, Guaratinguetá. **Anais**. Guaratinguetá: UNESP-FEG, 2022. v. 1, p. 282-287. Disponível em: <https://www.feg.unesp.br/Home/Eventos/viiworkshopdeengenhariamecanicaedeproducao/anais-vi-wpg-2022---completo-com-ficha-isbn.pdf>. Acesso em: 08 set. 2023.

SILVA, R. Análise térmica pelo método de elementos finitos. **ESSS**, 2020. Disponível em: <https://www.esss.com/blog/analise-termica-pelo-metodo-de-elementos-finitos/>. Acesso em: 29 maio. 2024.

SIQUEIRA, E. J. *et al.* Implementação passo a passo dos critérios de falhas em flexão em compósitos PPS/Fibras de Carbono através do Programa ANSYS. **Cadernos UniFOA**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 35-45, 2013. Disponível em: <https://revistas.unifoa.edu.br/cadernos/article/view/1162/1039>. Acesso em: 11 jan. 2024.

TOLEPHIH, M. H. *et al.* Hot press bonding of aluminum alloy AA6061-t6 to polyamide and polyamide composites. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Chicago, v. 671, n. 1, p. 012029, 2020.

TRASK, R. S. *et al.* Influence of process induced defects on the failure of composite T-joint specimens. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Reino Unido, v. 43, n. 4, p. 748–757, abr. 2012.

VARGEL, C. **Corrosion of aluminium**. Amsterdã; Boston: Elsevier, 2004.

VELTHUIS, R. **Induction welding of fiber reinforced thermoplastic polymer composites to metals**. Als Ms. gedr ed. Kaiserslautern: Inst. für Verbundwerkstoffe, 2007.

XIONG, X. *et al.* Resistance welding technology of fiber reinforced polymer composites: a review. **Journal of Adhesion Science and Technology**, Shenyang, v. 35, n. 15, p. 1593–1619, 2021. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01694243.2020.1856514>. Acesso em: 13 jul. 2024.

XIONG, X. *et al.* Thermal stress analysis for carbon/carbon material throat lining based on finite element analysis. **Journal Of Physics: Conference Series**, Shenyang, v. 2338, n. 1, p. 012046, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2338/1/012046>. Acesso em: 13 jul 2024.

YOUSEFPOUR, A. Joining: thermoplastic composites fusion bonding/welding. *In: NICOLAIS, L. (Ed.). Wiley Encyclopedia of Composites*. [s.l.]: Wiley, 2012. p. 1–6.

ZHANG, X. *et al.* Effect of laser textured patterns on the interfacial characteristics and mechanical properties of 6061Al/GFRTP joints via hot-pressing. **Thin-Walled Structures**, China, v. 189, p. 110916, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263823123003944>. Acesso em: 23 maio 2024.

ZHOU, W. *et al.* Load distribution in threads of porous metal–ceramic functionally graded composite joints subjected to thermomechanical loading. **Composite Structures**, Pequim, v. 134, p. 680–688, dez. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822315008090>. Acesso em: 23 maio 2024.

ZHOU, W. *et al.* Preparation and thermodynamic analysis of the porous ZrO₂/(ZrO₂ + Ni) functionally graded bolted joint. **Composites Part B: Engineering**, Pequim, v. 82, p. 13–22, dez. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135983681500428X>. Acesso em: 23 maio 2024.

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO	
	TUANE STEFANIA REIS DOS SANTOS 18/06/1995
Nacionalidade	brasileira
Nome em citações bibliográficas:	Santos, Tuane Stefania Santos, T. S.
Currículo Lattes	http://lattes.cnpq.br/0488791939746292
ORCID	https://orcid.org/0000-0001-9735-2915
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
2011/2012	Técnico em Informática – Técnica ETEC João Gomes de Araújo
2012/2013	Técnico em Mecânica – Técnica ETEC João Gomes de Araújo
2013/2017	Tecnologia em Manutenção Industrial – Tecnóloga FATEC Pindamonhangaba
PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	
<p>SANTOS, T. S. R.; MOTA, R. P.; MARQUES, L. F. B.; REIS, J. F.; ABRAHÃO, A. B. R. Modelagem De Dados Inicial Com MEF Do Compósito PEI/FV Utilizando ACP. In: WORKSHOP da PÓS-GRADUAÇÃO em ENGENHARIA, IV., 2022, Guaratinguetá, SP. Anais VI Workshop da Pós-Graduação em Engenharia (VI-WPG). Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2022. p. 282-287.</p> <p>SANTOS, T. S. R.; MOTA, R. P.; MARQUES, L. F. B.; LUCAS, R. R.; REIS, J. F. Tutorial Para Modelagem De Compósitos Laminados Em ANSYS Composite PrePost. In: WORKSHOP da PÓS-GRADUAÇÃO em ENGENHARIA, IIV., 2023, Guaratinguetá, SP. Anais VII Workshop da Pós-Graduação em Engenharia (VII-WPG). Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. p. 325-330.</p>	

PARTICIPAÇÃO EM BANCAS E ORIENTAÇÕES

Bancas de trabalhos de conclusão

FERRANDINI, P. L.; SANTOS, Tuane Stefania Reis; MARQUES, L. F. B.. Participação em banca de João Marcelo Mendes De Carvalho. Mapeamento dos efeitos de uma impressão Vickers em três materiais diferentes. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - UNESP Campus de Guaratinguetá.

HEIN, L. R. O.; BENINI, K. C. C. C.; MARQUES, L. F. B.; SANTOS, T. S. R.. Participação em banca de Lívia Tavares Oliveira. Concepção e desenvolvimento de um processo de impressão 3-D de materiais cerâmicos por deposição de barbotina com resina de cura por luz ultravioleta.. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - UNESP Campus de Guaratinguetá.

Orientações

Tuane Stefania Reis dos Santos. OS DESAFIOS DOS EDUCADORES NO DESENVOLVIMENTO DA APRENDIZAGEM E A INCLUSÃO DOS ALUNOS COM TEA. 2024. Orientação de outra natureza. (Licenciatura em Letras, Matemática e de Pedagogia) - Universidade Virtual do Estado de São Paulo. Orientador: Tuane Stefania Reis dos Santos.

Tuane Stefania Reis dos Santos. Equidade no Ensino e Aprendizagem: Desenvolvimento de Materia 1 Inclusivo para Alunos com Deficiência. 2024. Orientação de outra natureza. (Licenciatura em Letras, Matemática e de Pedagogia) - Universidade Virtual do Estado de São Paulo. Orientador: Tuane Stefania Reis dos Santos.

Tuane Stefania Reis dos Santos. O uso da caixa tátil para o desenvolvimento cognitivo de alunos com deficiência intelectual. 2024. Orientação de outra natureza. (Licenciatura em Letras, Matemática e de Pedagogia) - Universidade Virtual do Estado de São Paulo. Orientador: Tuane Stefania Reis dos Santos.

Tuane Stefania Reis dos Santos. Os materiais didáticos voltados para crianças com necessidades especiais, em especial, as crianças dentro do Espectro Autista. 2024. Orientação de outra natureza. (Licenciatura em Letras, Matemática e de Pedagogia) - Universidade Virtual do Estado de São Paulo. Orientador: Tuane Stefania Reis dos Santos.

Tuane Stefania Reis dos Santos. Inclusão e adaptação de materiais pedagógicos: uma proposta de confecção de jogos para trabalhar a motricidade e a relação de grupo voltado para o transtorno espectro autista. 2024. Orientação de outra natureza. (Licenciatura em Letras, Matemática e de Pedagogia) - Universidade Virtual do Estado de São Paulo. Orientador: Tuane Stefania Reis dos Santos.

PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS

WORKSHOP da PÓS-GRADUAÇÃO em ENGENHARIA, IV., 2022, (Guaratinguetá). Modelagem De Dados Inicial Com MEF Do Compósito PEI/FV Utilizando ACP. 2022. (Workshop)

WORKSHOP da PÓS-GRADUAÇÃO em ENGENHARIA, IIV., 2023, (Guaratinguetá). Tutorial Para Modelagem De Compósitos Laminados Em ANSYS Composite PrePost. 2023. (Workshop)

BRAZILIAN CONGRESS ON VACUUM APPLICATIONS IN INDUSTRY AND SCIENCE, XLIV., 2023, (Campos do Jordão). Computational Analysis Of The Heat Distribution Gradient In The PEI/Fiberglass Structural Laminate Using ANSYS Composite PrepPost (ACP). 2023. (Congresso)

WORKSHOP da PÓS-GRADUAÇÃO em ENGENHARIA, IIIV., 2024, (Guaratinguetá). Simulação Computacional Com Mef Do Processo De União Híbrida Compósito-Metal: Pei/Fibra De Vidro E Alumínio 2024-T3 Por Condução De Temperatura. 2024. (Workshop)

XXII B-MRS Meeting, 2024, (Santos). Analysis of the Use of Intermediate Polymeric Films in Spot Welding of Metal-Polymeric Composite Joints by Thermal Conduction. 2024.(Congresso)