

Sistema FIEB



PELO FUTURO DA INOVAÇÃO

# Análise Comparativa da Simulação Estrutural de Juntas Adesivadas: Métodos de Elementos Finitos, Sem Malha e Experimental

Petrúcio Leal Pereira

---



CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC  
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU  
GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

Petrúcio Leal Pereira

**Análise Comparativa da Simulação Estrutural de Juntas Adesivadas:  
Métodos de Elementos Finitos, Sem Malha e Experimental**

Dissertação de Mestrado

Salvador, 2024



PETRÚCIO LEAL PEREIRA

ANÁLISE COMPARATIVA DA SIMULAÇÃO ESTRUTURAL DE JUNTAS  
ADESIVADAS: MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS, SEM MALHA E  
EXPERIMENTAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu do Centro Universitário SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL.

Orientador: Prof. Dr. Valter Estevão Beal

Coorientador: Prof. Dr. Juan Carlos Romero Albino

Salvador, 2024



Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

P436a Pereira, Petrucio Leal

Análise comparativa da simulação estrutural de juntas adesivadas: métodos de elementos finitos, sem malha e experimental. / Petrucio Leal Pereira. – Salvador, 2024.

138 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Valter Estevão Beal.

Coorientador: Prof. Dr. Juan Carlos Romero Albino.

Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial) – Programa de PósGraduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2024.

Inclui referências.

1. Adesivo estrutural. 2. Simulação numérica. 3. Modelo experimental.  
4. Método de elementos finitos. 5. Método sem malha. 6. Geometria complexa. I.  
Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Beal, Valter Estevão. III. Albino, Juan Carlos  
Romero. IV. Título.

CDD 620.1



**CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC****Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia Industrial**

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada “**ANÁLISE COMPARATIVA DA SIMULAÇÃO ESTRUTURAL DE JUNTAS ADESIVADAS: MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS, SEM MALHA E EXPERIMENTAL**” apresentada no dia 06 de setembro de 2024, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Assinado eletronicamente por:  
Valter Estevão Beal  
CPF: \*\*\*.452.669-\*\*  
Data: 08/09/2024 22:28:09 -03:00

Orientador:

**Prof. Dr. Valter Estevão Beal**  
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:  
Juan Carlos Romero Albino  
CPF: \*\*\*.241.647-\*\*  
Data: 06/09/2024 17:58:33 -03:00

Coorientador:

**Prof. Dr. Juan Carlos Romero Albino**  
FIEB

Assinado eletronicamente por:  
Alex Álisson Bandeira Santos  
CPF: \*\*\*.191.765-\*\*  
Data: 06/09/2024 17:26:41 -03:00

Membro Interno:

**Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos**  
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:  
Armando Sá Ribeiro Júnior  
CPF: \*\*\*.866.135-\*\*  
Data: 09/09/2024 16:25:17 -03:00

Membro Externo:

**Prof. Dr. Armando Sá Ribeiro Júnior**  
UFBA



*Dedico este trabalho à minha família: meu pai e minha mãe, pilares de minha vida, cujo amor e sabedoria são a base de tudo que sou; meu irmão, que sempre esteve ao meu lado, compartilhando os desafios e as conquistas; e à minha esposa, cujo apoio e incentivo foram essenciais para a realização deste sonho. A vocês, meu eterno amor e gratidão.*



## **Agradecimentos**

Inicialmente, expresso minha sincera gratidão a Deus, que me concedeu força e coragem para persistir e superar os desafios ao longo de todo o mestrado.

Expresso profunda gratidão aos meus pais, Solange e Juscelino, pelo apoio e paciência nos momentos de minha ausência. A inspiração que vocês me proporcionam para buscar sempre o melhor foi essencial em minha jornada.

Um agradecimento especial à minha esposa, Jade, por ser minha principal incentivadora. Sua constante motivação e ajuda na organização das ideias foram decisivas para que eu superasse os desafios deste trabalho.

Ao meu orientador, Valter Beal, estendo minha gratidão por sempre me desafiar com temas incríveis e por conduzir meu desenvolvimento acadêmico e profissional com excelência.

Ao meu coorientador, Juan, agradeço pelas valiosas contribuições e orientações que foram fundamentais para o aprimoramento deste trabalho.

Agradeço aos colegas da área de Desenvolvimento de Produtos Industriais (DPI), especialmente a Gabriel Aelo, pela disponibilidade em ajudar e pelo suporte essencial no desenvolvimento de algumas simulações para minha pesquisa

Por fim, expresso minha gratidão a todos os colegas dos Laboratório de Ensaios Mecânicos e Metrologia, cuja assistência e pronta disponibilidade foram fundamentais para a execução dos ensaios práticos. Um agradecimento especial a Marcos Badaró e Ronaldo Borges, que se dedicaram para realizar os testes com notável excelência.

A cada um de vocês, minha eterna gratidão por serem partes indispensáveis desta caminhada.



## Resumo

As juntas mecânicas são usualmente utilizadas em diversos setores industriais tais quais automotivo, aeroespacial, de oleodutos, offshore, usinas de energia e ferrovias, e são classificadas de acordo com o seu tipo, características e aplicações, podendo variar de rebites e parafusos a juntas soldadas e adesivadas. Enquanto rebites e parafusos são econômicos e versáteis, eles podem causar concentrações de tensão que levam a falhas em materiais frágeis. Juntas soldadas, por outro lado, oferecem alta resistência, mas podem apresentar heterogeneidade em sua composição e defeitos de soldagem que podem incluir tensões residuais e desalinhamentos das peças unidas. Nesse cenário, o uso de adesivos estruturais na união de peças ganha destaque por sua durabilidade sob fadiga, distribuição uniforme de tensão, resistência à corrosão e menor peso. No entanto, a validação de juntas adesivadas com geometrias complexas apresenta um grande desafio devido às limitações na execução de simulações estruturais de peças de grandes dimensões que são unidas por um elemento extremamente fino. Portanto, este trabalho tem como objetivo geral avaliar a integridade de estruturas adesivadas de diversas complexidades por meio de simulações utilizando os Métodos Sem Malha (MSM), além de validações experimentais e comparação do custo computacional entre Método de Elementos Finitos (MEF) e MSM, avaliando a precisão entre esses métodos e os aspectos econômicos, temporais e técnicos associados ao uso dos MSM em projetos. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que as simulações executadas no MSM foram significativamente mais rápidas e apresentaram um custo de utilização inferior ao do MEF. No entanto, o MSM enfrenta limitações na análise de tensões nas regiões das bordas dos adesivos e, ao simular estruturas complexas, demonstrou uma perda de resolução dos resultados devido a restrição na discretização da nuvem de pontos, não alcançando a precisão de análises locais como no MEF. Dessa forma, conclui-se que o MSM não é ideal para a validação final em projetos de grande complexidade, podendo ser indicado para a execução de análises preliminares, visto que é uma alternativa mais ágil e econômica com relação ao MEF.

**Palavras-chave:** Adesivo Estrutural; Simulação Numérica; Modelo Experimental; Método de Elementos Finitos; Método Sem Malha; Geometria Complexa.



## **Comparative Analysis Of Structural Simulation of Adhesive Joints: Finite Element Methods, Meshless Methods, and Experimental Techniques**

Mechanical joints are commonly used in various industrial sectors such as automotive, aerospace, pipeline, offshore, power plants, and railways. They are classified according to their type, characteristics, and applications, ranging from rivets and bolts to welded and adhesive joints. While rivets and bolts are economical and versatile, they can cause stress concentrations that lead to failures in brittle materials. Welded joints, on the other hand, offer high strength but may exhibit heterogeneity in their composition and welding defects, including residual stresses and misalignments of the joined parts. In this context, the use of structural adhesives in joining parts stands out for their durability under fatigue, uniform stress distribution, corrosion resistance, and lighter weight. However, validating adhesively bonded joints with complex geometries presents a significant challenge due to the limitations in performing structural simulations of large parts joined by an extremely thin element. Therefore, this work aims to evaluate the integrity of bonded structures of various complexities through simulations using Meshless Methods (MM), as well as experimental validations and a comparison of computational costs between the Finite Element Method (FEM) and MM, assessing the accuracy of these methods and the economic, temporal, and technical aspects associated with the use of MM in projects. From the obtained results, it was found that simulations performed with MM were significantly faster and had a lower usage cost compared to FEM. However, MM faces limitations in stress analysis in the adhesive edge regions, and when simulating complex structures, it showed a loss of resolution in the results due to restrictions in point cloud discretization, not achieving the accuracy of local analyses as in FEM. Thus, it is concluded that MM is not ideal for final validation in highly complex projects but can be recommended for preliminary analyses, as it is a faster and more economical alternative compared to FEM.

**Keywords:** Structural Adhesive; Numerical Simulation; Finite Element Method; Method; Complex Geometry.



## Lista de Tabelas

<i>Tabela 1. Comparação dos modelos analíticos para uniões adesivadas.</i>	16
<i>Tabela 2. Características técnicas do adesivo BETAMATE 2096.</i>	32
<i>Tabela 3. Dimensões dos corpos de prova do ensaio de tração do Betamate 2096.</i>	34
<i>Tabela 4. Dimensional da junta de sobreposição simples.</i>	42
<i>Tabela 5. Dados dos materiais utilizados pelos autores do artigo.</i>	42
<i>Tabela 6. Medidas de deslocamento dos corpos de prova da estrutura adesivada no ponto de controle.</i>	61
<i>Tabela 7. Análise de variância e desvio padrão.</i>	62
<i>Tabela 8. Análise ANOVA.</i>	62
<i>Tabela 9. Análise Tokey.</i>	63
<i>Tabela 10. Dados dos materiais utilizados na torre de telecomunicação.</i>	70
<i>Tabela 11. Posição do deslocamento da estrutura em relação aos eixos de coordenada.</i>	72
<i>Tabela 12. Tempo de implementação das simulações globais no MEF 1 e MEF 2.</i>	77
<i>Tabela 13. Tempo de implementação das simulações local no MEF 1 e MEF 2.</i>	77
<i>Tabela 14. Tempo de implementação das simulações no MSM.</i>	78
<i>Tabela 15. Levantamento dos custos por minuto.</i>	80
<i>Tabela 16. Custos de hora-homem utilizando os softwares MEF 1 e MEF 2 e MSM.</i>	81
<i>Tabela 17. Custos de aluguel dos softwares MEF 1, MEF 2 e MSM.</i>	82
<i>Tabela 18. Custos de utilização da Workstation</i>	82



## Lista de Figuras

Figura 1. Tipos de Juntas mecânicas. _____	2
Figura 2. Esquema do MEF. _____	3
Figura 3. Esquema do MSM. _____	4
Figura 4. Mercado de adesivos e selantes automotivos. _____	10
Figura 5. Distribuição de tensão de cisalhamento proposto por Volkersen (1938). _____	11
Figura 6. Modelo de Goland e Reissner (1944). _____	12
Figura 7. Esquema de tensões de uma junta colada simples. _____	12
Figura 8. Distribuições de tensão normal e de cisalhamento conforme Goland e Reissner. _____	13
Figura 9. A distribuição da tensão de cisalhamento do adesivo. _____	15
Figura 10. Linha do tempo dos principais métodos de análise do tipo sem malha. _____	18
Figura 11. Edifício Antara, construído com o auxílio de um software MSM. _____	20
Figura 12. Esquemático de um dos conjuntos de vigas montados no Edifício Antara II. _____	21
Figura 13 Resultados de uma das simulações do edifício Antara II. _____	21
Figura 14. Plataforma para montagem de equipamentos aeroespaciais. _____	22
Figura 15. Representação das simulações estruturais realizadas pela INESPASA. _____	22
Figura 16. Tensões no osso da mandíbula após ter sua geometria escaneada. _____	23
Figura 17. Tensões no osso da escápula com implante glenoidal oculto. _____	23
Figura 18. Fluxograma para busca e análise dos dados bibliométricos. _____	25
Figura 19. Volume de trabalhos publicado por ano sobre o tema. _____	26
Figura 20. Pesquisadores mais relevantes. _____	27
Figura 21. Mapa dos países que mais publicam. _____	27
Figura 22. Mapa das revistas que mais lançam artigos sobre o tema. _____	28
Figura 23. Metodologia proposta. _____	29
Figura 24. Geometria do corpo de prova. _____	32
Figura 25. Molde para produção dos corpos de prova. _____	33
Figura 26. Corpos de prova com adesivo Betamate 2096. _____	34
Figura 27. Adequação do valor de "estresse de falha" para materiais com curva semelhante. _____	35
Figura 28. Curva de engenharia obtidas nos ensaios de tração Betamate 2096. _____	36
Figura 29. Curva média, de engenharia e ajustada para simulação do Betamate 2096. _____	37
Figura 30. Esquema de confecção dos corpos de prova para o teste de cisalhamento. _____	38
Figura 31. Corpo de prova de cisalhamento. _____	38
Figura 32. Propriedades mecânicas do PA 12. _____	39
Figura 33. Curva média, de engenharia e ajustada para simulação do PA 12. _____	40
Figura 34. Junta de sobreposição simples. _____	41
Figura 35. Tensão normal e de cisalhamento da junta adesivada do artigo de referência. _____	43
Figura 36. Curvas de tensão cisalhante: modelos analítico e de Zhu e Kedward (2005). _____	44
Figura 37. Curvas de tensão normal: modelos analítico e de Zhu e Kedward (2005). _____	45
Figura 38. Demonstração do teste de convergência de malha. _____	46
Figura 39. Convergência de malha do MEF para tensão de cisalhamento. _____	47
Figura 40. Convergência de malha do MEF para tensão normal. _____	47
Figura 41. Comparação de tensões normais: Zhu e Kedward (2005) vs. MEF. _____	48
Figura 42. Comparação de tensões de cisalhamento: Zhu e Kedward (2005) vs. MEF. _____	49
Figura 43. Comparação de tensões normais: Zhu e Kedward (2005) vs. MSM. _____	51
Figura 44. Comparação de tensões normais: MEF vs. MSM. _____	51
Figura 45. Comparação de tensões de cisalhamento: Zhu e Kedward (2005) vs. MSM. _____	52
Figura 46. Comparação de tensões de cisalhamento: MEF vs. MSM. _____	52

<i>Figura 47. Teste de convergência: n° de passes x a tensão de cisalhamento máxima.</i>	53
<i>Figura 48. Torre de telecomunicação.</i>	54
<i>Figura 49. Modelo com geometria com média complexidade.</i>	55
<i>Figura 50. Indicação das regiões adesivadas.</i>	56
<i>Figura 51. Desing das peças: Uniões e Conexões.</i>	56
<i>Figura 52. Diagrama de corpo livre da geometria com média complexidade.</i>	57
<i>Figura 53. Gabarito de montagem para corpos de prova de geometria média.</i>	57
<i>Figura 54. Fixação das peças durante etapa de cura do adesivo</i>	58
<i>Figura 55. Seringa utilizada para injetar o adesivo nas cavidades das peças.</i>	59
<i>Figura 56. Montagem do aparato de teste.</i>	59
<i>Figura 57. Ponto de controle para realizar as medidas de deslocamento vertical.</i>	60
<i>Figura 58. Representação da análise montada no software de Elementos Finitos.</i>	64
<i>Figura 59. Representação da análise montada no MSM.</i>	65
<i>Figura 60. Distribuição de tensão de von-Mises em um dos adesivos de junção usando o MEF.</i>	66
<i>Figura 61. Distribuição de tensão em um dos adesivos de junção usando o MSM.</i>	67
<i>Figura 62. Variações de tensão de von-Misses: extremidades e linha média.</i>	67
<i>Figura 63. Comparativo de deslocamento: métodos numéricos vs. experimental.</i>	68
<i>Figura 64. Modelo do estudo de caso.</i>	69
<i>Figura 65. Metodologia para validação de simulações de geometrias complexas.</i>	70
<i>Figura 66. Deslocamento da torre utilizando uma escala de 1700 vezes - Engenheiro I.</i>	73
<i>Figura 67. Deslocamento da torre utilizando uma escala de 1700 vezes - Engenheiro II.</i>	73
<i>Figura 68. Estresse nas colunas e barras da torre - Engenheiro I.</i>	74
<i>Figura 69. Estresse nas colunas e barras da torre - Engenheiro II.</i>	74
<i>Figura 70. Diagrama da análise local da torre de telecomunicação.</i>	75
<i>Figura 71. Tensão de von-Misses no adesivo mais solicitado na torre – Engenheiro I.</i>	76
<i>Figura 72. Tensão de von-Misses no adesivo mais solicitado na torre – Engenheiro II.</i>	76
<i>Figura 73. Tensão de cisalhamento: Comportamento do recurso Adapt for Stiffness.</i>	103
<i>Figura 74. Tensão de cisalhamento: Comportamento do recurso Adapt to Stress.</i>	104
<i>Figura 75. Tensão de cisalhamento: Alto nível de refinamento.</i>	104
<i>Figura 76. Tensão de cisalhamento: Alto nível de refinamento e adaptação aos features da peça.</i>	105
<i>Figura 77. Tensão normal: Comportamento do recurso Adapt to Stiffness.</i>	106
<i>Figura 78. Tensão normal: Comportamento do recurso Adapt to Stress.</i>	106
<i>Figura 79. Tensão normal: Alto nível de refinamento.</i>	107
<i>Figura 80. Tensão normal: Alto nível de refinamento e adaptação aos features da peça.</i>	107
<i>Figura 81. Tabela para teste de Tukey</i>	108
<i>Figura 82. Estratégia adotada para o MSM - Engenheiros I e II.</i>	109
<i>Figura 83. A estratégia adotada para as análises globais em MEF 1 e MEF 2 - Engenheiro I, e abordagem utilizada para o MEF 1 - Engenheiro II.</i>	110
<i>Figura 84. A estratégia adotada para o MEF 2 - Engenheiro II.</i>	111
<i>Figura 85. Estratégia para as análises locais em MEF 1 e MEF 2 - Engenheiros I e II.</i>	112

## Lista de Siglas e Abreviaturas

- ASTM** - American Society for Testing and Materials
- CAD** - *Computer Aided-Design* - Desenho Assistido por Computador
- CAE** – *Computer Aided Engineering* - Engenharia Assistida por Computador
- CAGR** - *Compound Annual Growth Rate* - Taxa de Crescimento Anual Composta
- CP** – Corpo de Prova
- DAC** - Desenho Assistido Por Computador
- DFC** - Dinâmica Dos Fluidos Computacionais
- FEM** - *Finite Element Method* - Método de Elementos Finitos
- LE** - Limite Elástico
- MA** - Manufatura Aditiva
- MEC** - Método Dos Elementos De Contorno
- MEF** – Método de Elementos Finitos
- MM** - *Meshless Methods* - Método Sem Malha
- MSM** – Método Sem Malha
- MT** – Modelo de Teste
- PPGGETEC** - Pós-graduação em Gestão e Tecnologia Industrial
- PRFC** - Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono
- PTFE** – Politetrafluoretileno

## Lista de Símbolos

$\Omega_i$  – Domínio

$\epsilon_{eng}$  – Deformação de engenharia

$\epsilon_{real}$  – Deformação Real

$\bar{P} = \frac{P}{b}$  - Carga aplicada por unidade de largura

$G_a$  - Módulo de cisalhamento do adesivo

$U_s$  – Vetor das variáveis de campo

$c_j$  - Coeficientes não associados aos nós

$t_a$  - Espessura do adesivo

$t_b$  - Espessura do substrato inferior

$t_t$  - Espessura do substrato superior

$u_i$  - Valores nodais na partícula  $i$

$u_j$  - Valores de  $u_h$  nos nós dos elementos

$\Psi_j$  - Funções de interpolação

$\sigma_{eng}$  - Tensão de engenharia

$\sigma_{real}$  – Tensão real

$\Phi_j$  - Funções de aproximação

$\sigma_{(y)}$  - Tensão normal

$\tau_{(xy)}$  - Tensão de cisalhamento

$b$  - Largura da área colada

$c$  - Metade do comprimento da área adesivada

**DMS** - Diferença mínima significativa

$E$  - Módulo de elasticidade do adesivo

**F** – Análise de variância

**F crítico** - Valor da distribuição F que é usado como um limiar para determinar se o teste ANOVA é significativo

**gl** – graus de liberdade

**I** – Número de tratamentos

igual ao encontrado

**k'** - Fator da força cortante

- k** - Fator do momento fletor
- l** - Comprimento da zona colada
- M** - Momento fletor
- MQ** – Quadrado médio
- n'** – Número de graus de liberdade residual
- P** – Probabilidade de se observar um valor da estatística de teste maior ou
- q** - Valor da amplitude total de estudentizada
- SQ** – Variância total
- t** - Espessura do substrato (quando possuem a mesma espessura)
- V** - Força cortante
- x** - Variação da posição da tensão de cisalhamento em relação ao comprimento da zona colada
- P** - Força aplicada
- u** - Variável de campo
- v** - Coeficiente de Poisson do adesivo
- $\omega$**  - Distância característica de cisalhamento



# Sumário

Resumo	xi
Comparative Analysis Of Structural Simulation of Adhesive Joints: Finite Element Methods, Meshless Methods, and Experimental Techniques	xiii
Lista de Tabelas	xv
Lista de Figuras	xvii
Lista de Siglas e Abreviaturas	xix
Lista de Símbolos	xx
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICATIVA	4
1.2 OBJETIVO	5
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.4 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	5
<b>2 Revisão de Literatura</b>	<b>7</b>
2.1 ADESIVOS ESTRUTURAIS	7
2.1.1 MÉTODOS ANALÍTICOS PARA JUNTAS ADESIVADAS	10
2.1.2 MODELO ANALÍTICO DE VOLKERSEN	10
2.1.3 MODELO ANALÍTICO DE GOLAND E REISSNER	12
2.1.4 EVOLUÇÃO DOS MODELOS ANALÍTICOS PARA ADESIVOS	15
2.2 MODELOS NUMÉRICOS	17
2.2.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)	17
2.2.2 MÉTODO SEM MALHA (MSM)	18
2.3 ANÁLISES ESTRUTURAS DE GEOMETRIAS COMPLEXAS	19
2.4 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	24
<b>3 Materiais e Métodos</b>	<b>29</b>
3.1 METODOLOGIA	29
3.2 MATERIAIS	30
3.2.1 SOFTWARES	30
3.2.2 COMPUTADOR	31
3.2.3 MÁQUINA DE ENSAIO DE TRAÇÃO	31
3.2.4 CARACTERIZAÇÃO DO ADESIVO	31
3.2.4.1 Fabricação dos corpos de prova	32
3.2.4.2 Ensaio de tração do adesivo Batamate 2096	34
3.2.4.3 Tratamento da curva tensão-deformação do Betamate 2096	34
3.2.4.4 Resultado da caracterização do Betamate 2096	36
3.2.4.5 Avaliação do tipo de falha do adesivo	37
3.2.5 CARACTERIZAÇÃO DO PA12	39
<b>4 Estudo de Caso 1: Junta adesivada simples</b>	<b>41</b>
4.1 DEFINIÇÃO DO CASO BASE	41
4.2 VALIDAÇÃO ANALÍTICA PARA UMA JUNTA ADESIVADA SIMPLES	43
4.2.1 EXECUÇÃO DO MODELO ANALÍTICO	44

4.2.2	RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DO MÉTODO ANALÍTICO PARA GEOMETRIA SIMPLES	44
4.3	APLICAÇÃO DO MEF PARA UMA JUNTA ADESIVADA SIMPLES	45
4.3.1	PARÂMETROS E EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO EM MEF	45
4.3.2	RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO EM ELEMENTOS FINITOS	46
4.4	APLICAÇÃO DO MSM PARA UMA JUNTA ADESIVADA SIMPLES	49
4.4.1	PARÂMETROS E EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO EM MSM	49
4.4.2	RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO EM MSM	50
5	Estudo de Caso 2: Geometria com média complexidade	54
5.1	DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DE MÉDIA COMPLEXIDADE	55
5.2	ESTUDO EXPERIMENTAL - TESTE DE TRAÇÃO	57
5.2.1	MONTAGEM E TESTE DOS CORPOS DE PROVA DA ESTRUTURA ADESIVADA	58
5.2.2	TRATAMENTO DOS DADOS DE DESLOCAMENTO DA ESTRUTURA	60
5.3	SIMULAÇÃO ESTRUTURAL	63
5.3.1	SIMULAÇÃO ESTRUTURAL DA GEOMETRIA COMPLEXA USANDO O MSM	64
5.3.2	SIMULAÇÃO ESTRUTURAL DA GEOMETRIA COM MÉDIA COMPLEXIDADE USANDO O MEF	64
5.3.3	SIMULAÇÃO ESTRUTURAL DA GEOMETRIA COM MÉDIA COMPLEXIDADE USANDO O MSM	65
5.4	VALIDAÇÃO DE MÉTODOS NUMÉRICOS PARA GEOMETRIA DE MÉDIA COMPLEXIDADE	66
5.4.1	ANÁLISE DAS TENSÕES DE VON-MISSES NA LINHA MÉDIA DO ADESIVO POR DIFERENTES MÉTODOS	66
5.5	COMPARAÇÃO DE DESLOCAMENTO: MEF, MSM E EXPERIMENTAL	68
6	Estudo de Caso 3: Geometria complexa	69
6.1	DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA DE ALTA COMPLEXIDADE	69
6.2	SIMULAÇÃO ESTRUTURAL DE ALTA COMPLEXIDADE	70
6.2.1	SIMULAÇÃO ESTRUTURAL DA GEOMETRIA COMPLEXA USANDO O MEF	71
6.3	RESULTADO DAS ANÁLISES DA GEOMETRIA COMPLEXA	72
6.3.1	COMPARAÇÃO DO DESLOCAMENTO GLOBAL DA ESTRUTURA	72
6.3.2	COMPARAÇÃO ENTRE AS RESPOSTAS DAS REGIÕES MAIS SOLICITADAS E O COMPORTAMENTO DO ADESIVO	74
6.3.3	TEMPO DE SIMULAÇÃO PARA GEOMETRIA COMPLEXA	77
6.4	ANÁLISE ECONÔMICA	79
6.4.1	LEVANTAMENTO DOS DADOS DE CUSTO	79
6.5	RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÔMICA	81
7	Discussão sobre os Resultados	85
8	Considerações Finais	87
8.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
	Referências	89
	Apêndice A	99
	Apêndice B	103
	Anexos A	108
	Anexo B	109
	Produção Técnica e Científica	113

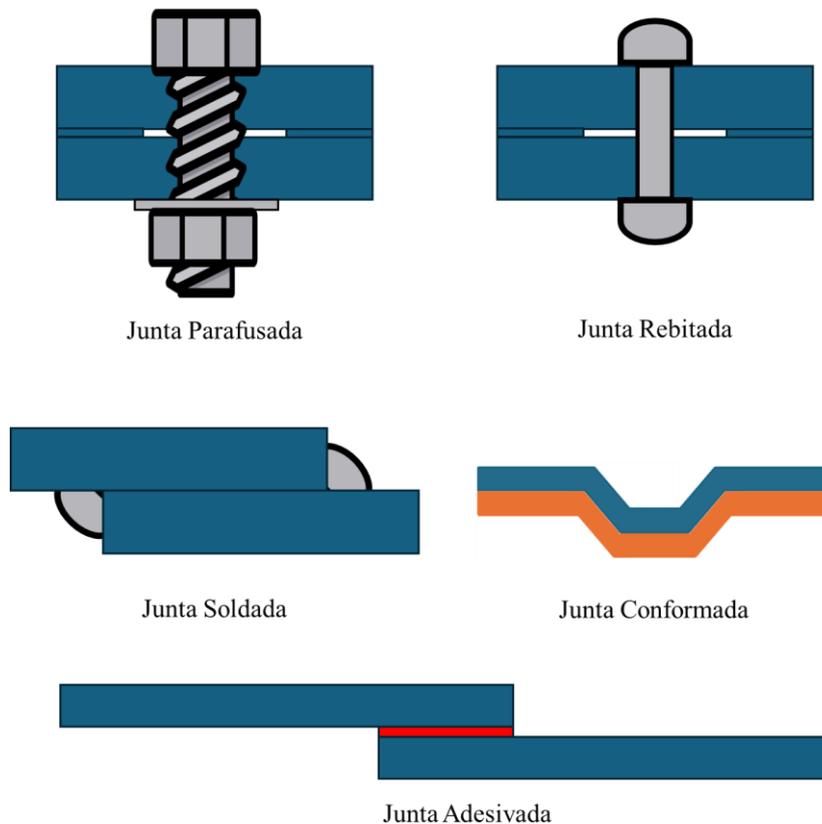
## 1 Introdução

As juntas mecânicas são usualmente utilizadas em diversos setores industriais, tais quais automotivo, aeroespacial, de oleodutos, offshore, usinas de energia e ferrovias (KHAN *et al.*, 2021) e são classificadas de acordo com o tipo, características e aplicações (BARBOSA, 2011). Rebites, parafusos e pinos são junções mecânicas básicas que têm sido amplamente utilizadas em diversas indústrias por serem econômicas, versáteis, altamente resilientes e duráveis (LI *et al.*, 2017), no entanto geram concentrações de tensão ao redor dos pontos de fixação, o que pode resultar em falhas prematuras em alguns materiais, particularmente aqueles mais frágeis (SCHOLLMAYER, 2009). As juntas soldadas também são amplamente utilizadas nas indústrias e proporcionam alta resistência e durabilidade, sendo eficazes em aplicações que requerem alta resistência estrutural imediata (KILIC; OZTURK; DEMIRDOGEN, 2023), porém apresentam uma parte heterogênea em sua estrutura, devido às diferentes propriedades microestruturais e mecânicas dos seus constituintes tais como: metal de base, metal de solda e zona afetada pelo calor. Essas características são agravadas pela presença inevitável de defeitos de soldagem, como as tensões residuais ou os problemas associados ao processo de execução da solda, como a penetração de raiz incompleta e o desalinhamento de placas, além da ocorrência de reentrâncias, excesso de metal de solda e falta de fusão, entre outros (ARANDJELOVIC *et al.*, 2024).

Um tipo de junta que tem se destacado em aplicações de engenharia é obtida pela colagem de substratos com adesivos estruturais, por apresentar algumas vantagens como alta durabilidade sob condições de fadiga, resistência à corrosão e um peso estrutural menor em comparação com juntas metálicas tradicionais, como as aparafusadas, rebitadas, soldadas e conformadas, como apresentada na Figura 1 (BEARDMORE; JOHNSON, 1986; SOUTIS, 2005), além de fornecer uma distribuição mais uniforme das tensões na região colada (NETO; SAMPAIO; ASSIS, 2019).

Os adesivos estruturais vêm substituindo as juntas mecânicas tradicionais em diversos segmentos industriais, como aeronáutica, naval e automotiva. Na indústria aeronáutica, laminados feitos de adesivo epóxi reforçado com fibra de vidro e folhas finas de liga de alumínio são aplicados como material de revestimento da fuselagem do avião comercial jumbo Airbus A380 (WANG *et al.*, 2015; WANG; RANS; BENEDICTUS, 2017). Tiras de titânio também podem ser coladas adesivamente às bordas das pás de um motor de aeronave, feitas de polímeros reforçados com fibra de carbono, promovendo a integridade das pás, sem comprometer o peso da estrutura (FEITO, 2012; KRISHNAN, BERTRAM; SEIBEL, 2017; WANG *et al.*, 2020).

Figura 1. Tipos de Juntas mecânicas.



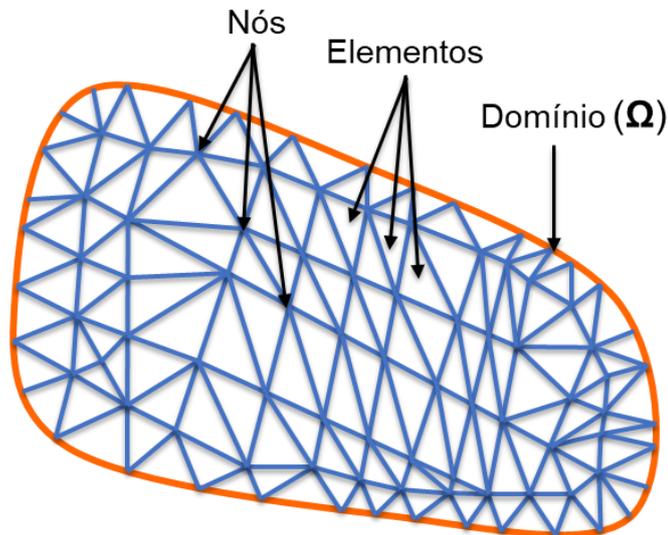
Fonte: Autoria própria.

O comportamento mecânico de juntas adesivadas de diferentes complexidades pode ser determinado por meio de equações matemáticas, modelos numéricos ou experimentais (BUDHE *et.al.*, 2017). A complexidade de uma junta adesivada é representada pela forma do conjunto analisado, tais como características internas (furos e/ou cavidades), externas (relevos e/ou nervuras), variação na espessura da parede, condições de simetria e variação de escala (detalhes que variam do macro ao micro), resultando em maior complexidade da geometria (JOSHI *et al.*, 2010). Nesse contexto, a geometria complexa de uma junta e sua natureza tridimensional dificultam a obtenção de um sistema completo de equações para prever as suas propriedades mecânicas, já as validações experimentais costumam ser demoradas e caras (HE, 2011). No que diz respeito aos modelos numéricos, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é o mais amplamente utilizado na análise de mecânica dos sólidos, o que inclui validações de juntas adesivadas, desenvolvido por Clough no início da década de 1960 (PRADHAN *et al.*, 2019). Já o Método Sem Malha, é definido por um conjunto de equações algébricas que se estende por todo o domínio de um problema físico específico, sem recorrer a uma malha pré-estabelecida (GUI-RONG, 2009), que foi desenvolvido por Gingold e Monaghan em 1977.

No MEF, a região da solução é subdividida em pequenas sub-regiões interconectadas, como demonstrada na Figura 2. Esses elementos são interconectados por nós que quando agrupados formam uma malha que representa a geometria da estrutura em estudo (GOYAL;

GOYAL, 2022). Cada elemento é definido a partir de funções de forma que aproximam a solução do problema. A partir da soma dessas aproximações em todos os elementos é possível formular um sistema de equações algébricas, o qual sua solução aproximada representa as condições de equilíbrio global da estrutura permitindo a obtenção de uma solução aproximada para o comportamento do sistema (SHRIVASTAVA, 2018).

Figura 2. Esquema do MEF.



Método de Elementos Finitos (MEF)

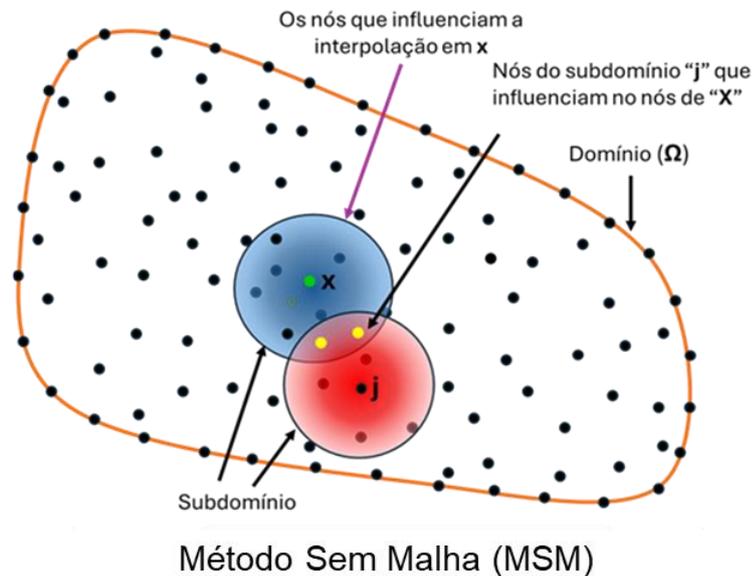
Fonte: Autoria própria.

Apesar de sua alta popularidade e confiabilidade, o Método dos Elementos Finitos apresenta algumas desvantagens, visto que os resultados da simulação estrutural por MEF podem variar significativamente pela qualidade da discretização da malha, podendo gerar resultados incorretos a depender da estruturação da malha (CHEN *et al.*, 2017). Na implementação do MEF para a validação de junta adesivada é importante que a malha seja estruturada respeitando as dimensões das peças e da camada adesiva (HE, 2011). As falhas em juntas adesivadas frequentemente ocorrem dentro da própria camada adesiva, o que exige que a malha de elementos finitos seja mais refinada nessa área em comparação com o resto da junta, resultando em um alto número de graus de liberdade, além disso, é essencial garantir uma transição suave entre os aderentes e o adesivo para a eficácia da junta (HE, 2011). No entanto, em geometrias complexas, o número de graus de liberdade é limitado pelas restrições de capacidade de memória do computador e pela necessidade de manter o tempo de solução dentro de limites aceitáveis. Devido a esses fatores, os engenheiros são desestimulados a adotar os adesivos estruturais no projeto de uniões de peças.

Conforme definido por Liu e Gu (2005), o Método Sem Malha é um método utilizado para estabelecer diferenciais parciais, que se assemelha ao Método dos Elementos Finitos, mas o MSM elimina a necessidade construção de uma malha. Ao invés de usar uma malha tradicional composta por pequenos elementos, o método sem malha utiliza apenas um conjunto de pontos de interpolação, chamados de nós, que por sua vez são distribuídos dentro

do domínio, em que cada nó possui sua zona de influência que intercepta outros pontos (BELAASILIA *et al.*, 2017), como demonstrado na Figura 3.

Figura 3. Esquema do MSM.



Fonte: Autoria própria.

Essas características fazem dos Métodos Sem Malha uma opção interessante para problemas de aplicabilidade e precisão em análises numéricas complexas (UPADHYAY; SONIGRA; DAXINI, 2021), ao passo que existem poucos estudos desenvolvidos para avaliar o desempenho dos Métodos Sem Malha quando aplicados a projetos de juntas adesivadas em grandes estruturas ou geometrias complexas. Portanto, para utilização do MSM em projetos de juntas adesivadas é necessário desenvolver um trabalho de pesquisa que possa avaliar a qualidade dos resultados e custos computacionais e de implementação.

### 1.1 Justificativa

Os adesivos estruturais não são usualmente incorporados no desenvolvimento de projetos devido à complexidade das análises do comportamento dos mesmos, visto que para geometrias complexas há a necessidade de se recorrer a simulações numéricas, muitas vezes usando o MEF, que por sua vez necessitam da habilidade do engenheiro de simulação para construir a análise adotando parâmetros adequados. Adicionado a isso, tem-se que a construção da malha deve ser cuidadosamente refinada na região do adesivo e deve respeitar a suavidade da transição entre substrato-adesivo, dessa forma, requisitando muito poder computacional, que está relacionado com o tempo de análise e a memória utilizada. Portanto, é proposta a investigação do uso de um software comercial que utiliza o Método Sem Malha para avaliar a integridade de estruturas adesivadas de baixa, média e alta complexidades.

Deste modo, este trabalho poderá contribuir para a promoção da substituição de juntas tradicionais por juntas adesivadas, bem como para a propagação do MSM como uma

alternativa ao método de simulação tradicionais (MEF), visto que a adoção do software do Método Sem Malha pode contribuir para a exploração de múltiplas configurações geométricas na etapa conceitual de projetos, de forma mais rápida aumentando a produtividade dos engenheiros.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo desse trabalho é investigar o uso de simulações numéricas por MSM no projeto de estruturas adesivadas de baixa, média e alta complexidade.

## **1.3 Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo geral do trabalho, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Comparar o custo computacional entre MEF e MSM;
- Comparar a qualidade dos resultados obtidos pelos métodos;
- Avaliar os aspectos econômicos, temporais e técnicos associados a uso dos MSM em projetos.

## **1.4 Organização do Documento**

Capítulo 1, Introdução: Neste capítulo é realizada uma breve contextualização do problema, seguida da apresentação da justificativa para realização da pesquisa, além dos objetivos geral e específicos.

Capítulo 2, Revisão da Literatura: Neste capítulo são discutidos os principais temas relacionados à execução do trabalho, sendo estes os conceitos e utilização dos adesivos estruturais; Métodos Analíticos e Numéricos; Aplicação do Método Sem Malha para juntas adesivadas; Análises estruturais de geometrias complexas. Além da apresentação dos resultados obtidos pela Análise Bibliométrica executada.

Capítulo 3, Métodos e Materiais: Este capítulo discute o método adotado para realizar o estudo, incluindo a sequência metodológica para a execução de testes e simulações de validação, além de detalhar os parâmetros usados para obter os resultados. Também é apresentada a caracterização do adesivo utilizado nas etapas subsequentes.

Capítulo 4, Estudo de Caso 1: Este capítulo detalha o caso base de uma junta adesivada simples, abordando tanto a definição quanto a resolução dos métodos analíticos empregados, juntamente com as simulações realizadas usando os métodos de Elementos Finitos e Métodos sem Malha.

Capítulo 5, Estudo de Caso 2: Neste capítulo, o foco é a realização de testes experimentais e simulações para uma peça adesiva de complexidade média, detalhando a condução dos experimentos e das simulações.

Capítulo 6, Estudo de Caso 3: Este capítulo descreve a análise dos resultados obtidos por diferentes engenheiros ao simular uma estrutura adesivada complexa utilizando o MEF e o MSM.

Capítulo 7, Discussões Sobre os Resultados: Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos nos estudos de caso 1, 2 e 3.

Capítulo 8, Conclusões: Neste capítulo são discutidos os resultados obtidos no Capítulo 4, destacando-se os pontos mais relevantes, além de sugestões para trabalhos futuros ou complementares.

## 2 Revisão de Literatura

Neste capítulo, será apresentada uma breve revisão da literatura sobre o conceito e uso dos adesivos estruturais, abordando métodos de verificação analítica e numérica, suas aplicações e limitações, além de como o Método Sem Malha é empregado na simulação do comportamento de geometrias complexas.

### 2.1 Adesivos estruturais

Os adesivos são substâncias capazes de unir pelo menos duas superfícies de maneira resistente e duradoura (PETRIE, 2020), através de interações interfaciais (PIZZI; MITTAL, 2017), sendo classificados pelos seguintes parâmetros:

- forma física: adesivo líquido, adesivo de fita;
- tipo químico: adesivo de silicato, adesivo de resina;
- propósitos: adesivo para papel, adesivo para metais, adesivo para plásticos e adesivo para borrachas;
- mecanismo de cura: adesivos de cura com calor/aquecimento e adesivos de cura da temperatura ambiente.

Os primeiros adesivos foram produzidos a partir de polímeros naturais baseados em proteínas e carboidratos, utilizando borrachas naturais para unir materiais desde o século XIX (WAKE, 1978), sendo classificados como adesivos naturais.

As indústrias aeronáutica, naval e automobilística foram as principais responsáveis pela evolução das juntas adesivadas (COGNARD, 2005; DILLARD, 2023). Atualmente os adesivos mais utilizados em aplicações industriais são os sintéticos, dos tipos acrílicos, epóxis, silicones, uretanos e elastoméricos, que podem ser classificados como estrutural e não estrutural (POCIUS, 2021). Além das indústrias citadas anteriormente, tais adesivos são frequentemente utilizados em outros setores industriais (SILVA; ADAMS; OCHSNER, 2018), como ferroviária, construção civil, calçados, eletrônicos, computadores, telecomunicações e campos emergentes como a biologia e medicina (SILVA; ADAMS; OCHSNER, 2018), pois o adesivo é um recurso de montagem particularmente atraente para aplicações onde a redução de peso é importante. Por exemplo, na indústria aeroespacial, o aumento da eficiência energética, a redução das emissões de CO<sub>2</sub> e outros gases do efeito estufa e o alcance das aeronaves, estão diretamente correlacionados com o peso transportado (ABRANTES *et al.*, 2024; AHMAD; AL AWADH; NOOR, 2023), assim uma alternativa é a substituição de parafusos e rebites por adesivos.

De acordo com Gajewski, Golewski e Sadowski (2021), conforme as técnicas de montagem de juntas adesivadas evoluem, há uma expansão da aplicação desse tipo de uniões como alternativa às juntas soldadas, rebitadas e aparafusadas. A ligação adesiva

é um processo de união permanente entre as peças de uma estrutura que utiliza um adesivo como elemento de fixação após a sua cura (PEREIRA *et al.*, 2022). Segundo Ebnesajjad e Lanck (2014), existem dois tipos principais de ligação adesiva, a estrutural que está relacionada a aplicações em que os aderentes (os objetos que estão sendo ligados) podem sofrer grandes tensões e a não estrutural, caracterizada por apresentar menor resistência a deformação.

Os adesivos não-estruturais apresentam uma resistência muito inferior quando comparado aos adesivos estruturais (FARIA *et al.*, 2022), sendo caracterizado por uma resistência ao cisalhamento normalmente inferior a 7 MPa e fraca resistência à fluência quando submetido a temperaturas ligeiramente elevadas (HARPER, 2002). Estes tipos de adesivo são normalmente monocomponente, seu processo de cura ocorre a temperatura ambiente, e são baseados em resinas termoplásticas ou materiais elastoméricos dispersos em solventes (EBNESAJJAD; LANCK, 2014). São comumente utilizados em aplicações que não demandam suportar cargas pesadas e/ou contínuas e que não atingem temperaturas superiores a 82 °C, como por exemplo, silicones, cimentos, fitas adesivas sensíveis à pressão e os adesivos de embalagem (EBNESAJJAD; LANCK, 2014). No setor industrial, os adesivos não-estruturais são empregados na fixação de estruturas com baixa carga, como colagem de papel e outras aplicações de escritório (EBNESAJJAD; LANCK, 2014), no preenchimento de espaços vazios como o preenchimento de uma parede de *drywall* (YAZDI; HASHEMI; GAD, 2022), na união de materiais diferentes como vidro e cerâmica, que são difíceis de montar por outros meios (FAYAZBAKHSH; ABEDIAN, 2010).

Já os adesivos estruturais são capazes de transmitir tensão sem perda de integridade dentro dos limites de projeto, possuindo resistência ao cisalhamento superior a 7 MPa (EBNESAJJAD; LANCK, 2014). São materiais resistentes à fratura por deformação elástico-plástica e podem absorver alto nível de energia após o impacto, mesmo em altas frequências e baixas temperaturas (FALSAFI, 2023), além de serem capazes de criar uma ligação forte entre vários materiais, incluindo metais, compósitos, plásticos e dissimilares (JANG *et al.*, 2023).

A união de peças por adesivos estruturais deve ser longa, a ponto de durar o mesmo tempo do substrato, visto que são uniões do tipo permanentes (EBNESAJJAD; LANCK, 2014). Este tipo de união permite a conservação da integridade dos materiais de base ou substrato, possibilitando a união de materiais distintos e uma distribuição de tensão mais uniforme do que a rebiteagem, aparafusamento ou soldagem (ADAMS; WAKE, 1984; EBNESAJJAD; LANCK, 2014). As ligações adesivadas apresentam um bom desempenho associado a resistência, peso e custo-benefício, além de apresentarem um bom comportamento à fadiga e resistência à corrosão (PEREIRA *et al.*, 2022). Nesse contexto, os adesivos estruturais são usados para montagem de aeronaves, levando à redução de peso e aumento da eficiência de combustível; já no setor automotivo esses adesivos são utilizados para unir materiais diferentes, aumentando a resistência à

colisão, reduzindo o ruído e a vibração e facilitando uma produção rápida (JANG *et al.*, 2023; RESENDE *et al.*, 2021; VALENTE *et al.*, 2019).

Atualmente, há uma expansão do mercado global de adesivos estruturais, no qual dados da Globe Newswire (2023) apontam que esse mercado foi avaliado em 2021 em 12,2 bilhões de dólares e deve continuar expandindo com uma Taxa de Crescimento Anual Composta (CAGR) de 6,28% para o período entre 2022 e 2031, atingindo um valor de 22,1 bilhões de dólares. Dessa forma, observa-se que a utilização dos adesivos estruturais vem cada vez mais sendo uma alternativa viável para diversas indústrias, visto a possibilidade de combinação de propriedades mecânicas somada a baixa densidade e flexibilidade de aplicação desses materiais.

Segundo 3M (2024a), a utilização dos adesivos estruturais epóxi para unir compostos de fibra de carbono em plataformas de perfuração contribui para o aumento da rentabilidade dos fabricantes. Já Mordor Intelligence (2024), destaca que as montadoras automotivas são importantes consumidores desses produtos, pois atualmente há a necessidade de produzir veículos que combinem fibra de carbono com plásticos ou ligas de alumínio, com objetivo de melhorar a qualidade da estrutura utilizada na construção de veículos. Nesse contexto, observa-se que é essencial o uso de adesivos de alta performance capazes de resistir a condições adversas, sendo comprovado pelo crescimento na demanda por adesivos automotivos, o que representa um dos principais fatores impulsionadores do mercado neste segmento, como mostra na Figura 4.

Contudo, os adesivos possuem algumas desvantagens que podem impedir ou dificultar sua aplicação, como a necessidade de preparação superficial do substrato de forma criteriosa para obter ligações duradouras, ter um tempo vida útil que depende do ambiente exposto (EBNESAJJAD; LANCK, 2014), em alguns casos a cura precisa ser realizada em temperaturas acima ambiente (23°C) até 90°C, possui irreversibilidade típica da ligação (RESENDE *et al.*, 2021), são sensíveis à umidade e as tensões de descascamento (*peel*) e à falta de métodos eficientes para a inspeção das juntas (TAIB *et al.*, 2006).

Vale ressaltar que o projeto de peças unidas por adesivo estrutural deve possuir requisitos como os tipos de carregamento, tipos de adesivo e condições ambientais, além da necessidade de ser validado e analisado quanto a distribuição de tensão, previsão da resistência e confiabilidade da junta (SILVA; ADAMS, 2009a). Desta forma, são propostas duas rotas para analisar a resistência e falha de uma união adesivada, os métodos analíticos e numéricos (PEREIRA *et al.*, 2022).

Figura 4. Mercado de adesivos e selantes automotivos.



Fonte: Adaptada de MORDOR INTELLIGENCE, (2024).

### 2.1.1 Métodos Analíticos para Juntas Adesivadas

Segundo Wei *et al.* (2024), os métodos analíticos são importantes para o projeto de uma junta adesiva. Ao definir a geometria, as propriedades do material e as condições de contorno/carga, torna-se viável fazer uma estimativa ágil tanto da deformação quanto do estado de tensão.

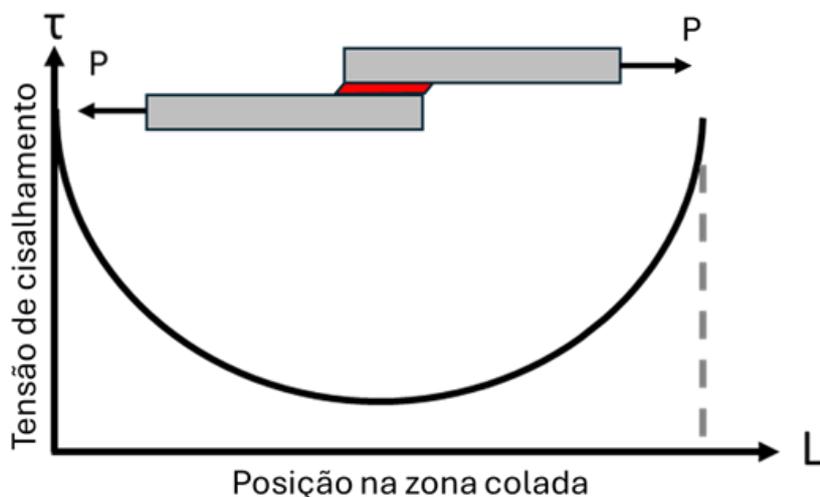
No entanto, os engenheiros devem escolher o método mais adequado para determinado projeto visto que existe uma longa lista de modelos analíticos. As primeiras análises clássicas foram propostas por Volkersen (1938) e Goland e Reissner, (1944), os quais discutiram as limitações e o desenvolvimentos das análises para juntas sobrepostas com aderências planas.

### 2.1.2 Modelo Analítico de Volkersen

Volkersen (1938) introduziu o conceito de diferencial de cisalhamento, que também é conhecida como “*shear-lag model*”, no qual considera que os aderentes estão submetidos apenas a carga uniaxial de tração (tensões normais devido à flexão são desprezadas) e que o adesivo se deforma apenas em cisalhamento.

Nesse estudo é considerado que as tensões de cisalhamento máximas no adesivo ocorrem nas extremidades em contato com os aderentes e as menores ocorrem no centro do adesivo, como pode ser observado na Figura 5. Este fato acontece devido a redução da deformação dos aderentes ao longo da sobreposição e a continuidade da interface adesivo/aderente, no qual causam uma distribuição não uniforme da deformação na camada adesiva.

Figura 5. Distribuição de tensão de cisalhamento proposto por Volkersen (1938).



Fonte: Adaptada de Volkersen (1938).

A distribuição de tensões de cisalhamento é dada por, Eq. 1, no qual  $\omega$  é a distância característica de cisalhamento, expressa em unidades de comprimento, que indica a rapidez com que a carga aplicada é transferida de um aderente para outro. As variáveis  $t_t$ ,  $t_b$  e  $t_a$  referem-se, respectivamente, às espessuras do aderente superior, do aderente inferior e do adesivo. Além disso,  $b$  define a largura da área de colagem,  $l$  é o comprimento da zona colada,  $E$  representa o módulo de elasticidade do aderente,  $G_a$  o módulo de cisalhamento do adesivo, e  $P$  a força aplicada. A origem  $x$  corresponde à metade do comprimento da zona colada.

$$\tau(xy) = \frac{P \cdot \omega}{2 \cdot b \cdot l} \cdot \frac{\cosh(\omega \cdot x/l)}{\sinh(\omega/2)} + \frac{(t_t - t_b)}{(t_t + t_b)} \cdot \left(\frac{\omega}{2}\right) \cdot \frac{\sinh(\omega \cdot x/l)}{\cosh(\omega/2)} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde  $\omega$  é calculado através da, Eq. 2.

$$\omega = \sqrt{\frac{G_a \cdot l^2}{E \cdot t_t \cdot t_a} \cdot \left(1 + \frac{t_t}{t_b}\right)} \quad \text{Eq. 2}$$

Quando as espessuras dos substratos são iguais e a junta é suficientemente longa é possível considerar  $\cosh(\omega \cdot l/2) = \sinh(\omega \cdot l/2)$ , portanto, Eq. 3:

$$\tau = \frac{P \cdot \omega}{2} = \sqrt{\frac{G_a \cdot l^2}{E \cdot t_t \cdot t_a} \cdot \left(1 + \frac{t_t}{t_b}\right)} \cdot \frac{P}{2} \quad \text{Eq. 3}$$

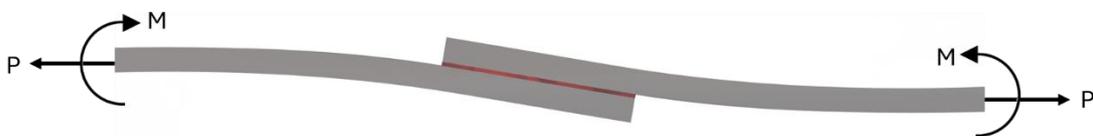
Devido a condição de cisalhamento constante ao longo do comprimento da região adesivada, o valor da tensão de cisalhamento pode ser interpretado como a

tensão média atuando sobre a camada adesiva. Esta análise não é muito realista devido as diversas simplificações consideradas, mas ainda é a base para citar a resistência ao cisalhamento do adesivo em muitas situações de teste, como sugerido pelas normas ASTM e ISO (SILVA *et al.*, 2009).

### 2.1.3 Modelo Analítico de Goland e Reissner

A análise desenvolvida por Volkersen (1938) não considera o efeito de flexão provocado pelo momento fletor ( $M$ ) e uma força cortante ( $V$ ) ao aplicar a carga de tração ( $P$ ), esses efeitos ocorrem nas extremidades da região adesivada, como demonstrado na Figura 6.

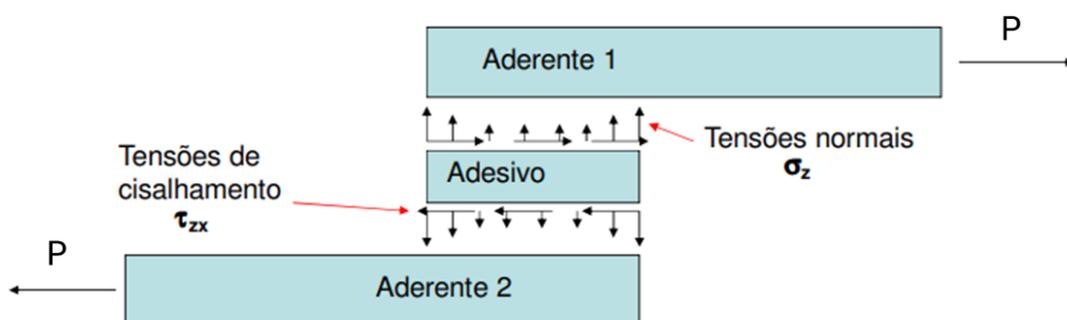
Figura 6. Modelo de Goland e Reissner (1944).



Fonte: Adaptada de Tsai, Oplinger e Morton (1998).

O modelo desenvolvido por Goland e Reissner (1944) considera tanto o efeito de tensões normais quanto de cisalhamento, como demonstrado na Figura 7, no qual é possível notar essas tensões devido a aplicação da força normal  $P$ . Deste modo, é possível notar que as tensões de cisalhamento em juntas adesivadas correspondem às forças internas que atuam paralelamente à interface dos materiais conectados por meio do adesivo (3M, 2024b), fazendo com que as duas partes unidas tendem a "deslizar" uma sobre a outra. Já as tensões normais ocorrem quando uma força é aplicada perpendicularmente à superfície adesivada, ou seja, diretamente na direção de separação ou compressão das duas partes unidas (3M, 2024b), portanto representa as tensões de descolamento do adesivo.

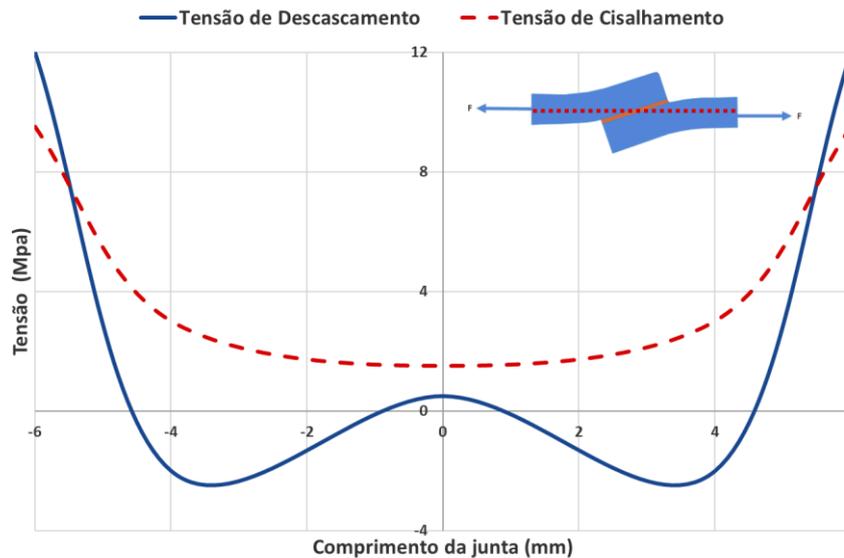
Figura 7. Esquema de tensões de uma junta colada simples.



Fonte: Adaptada de Ribeiro (2019).

Devido ao momento fletor, a junta gira, alterando a direção da linha de carga com as forças de tração aplicadas tendendo a ficarem alinhadas (SILVA *et al.*, 2009). À medida que a articulação gira, o momento fletor diminuirá, dando origem a um problema geométrico não linear onde os efeitos das grandes deflexões das aderências devem ser contabilizados, como visto na Figura 8.

Figura 8. Distribuições de tensão normal e de cisalhamento conforme Goland e Reissner.



Fonte: Adaptada de (SILVA *et al.*, 2009).

Os primeiros autores a considerarem esses efeitos foram Goland e Reissner (1944) em que discutiram o efeito de grandes deflexões dos aderentes, mas indicaram que os aderentes eram integrais, com uma camada adesiva infinitamente fina.

O efeito da rotação foi representado por um fator de momento fletor,  $k$ , e fator de força cortante,  $k'$ . Esses fatores relacionam a carga aplicada por unidade de largura,  $\bar{P}$ , ao momento fletor,  $M$  (Eq. 4), e à força cortante,  $V$  (Eq. 5), respectivamente. Em decorrência disso, temos:

$$M = k \cdot \frac{\bar{P} \cdot \omega}{2} \quad \text{Eq. 4}$$

$$V = k' \cdot \frac{P \cdot t}{c} \quad \text{Eq. 5}$$

Quando a carga aplicada é baixa, não ocorrem rotações na junta, fazendo com que os coeficientes  $k$  e  $k'$  mantenham-se igual a um. À medida que a carga aumenta, os valores de  $k$  e  $k'$  diminuem, levando a uma redução correspondente tanto na força transversal quanto no momento fletor.

De acordo com Goland E Reissner (1944), a equação para a tensão de cisalhamento  $\tau(x)$  é expressa da seguinte maneira, Eq. 6:

$$\tau(xy) = -\frac{\bar{P}}{8.c} \cdot \left\{ \frac{\beta.c}{t} \cdot (1 + 3.k) \cdot \frac{\cosh\left(\frac{\beta.c}{t} \cdot \frac{x}{c}\right)}{\sinh\left(\frac{\beta.c}{t}\right)} + 3 \cdot (1 - k) \right\} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde  $k$ ,  $u_2$  e  $\beta$  são caracterizados pelas Equações 7, 8 e 9, respectivamente.

$$k = \frac{\cosh(u_2.c)}{\cosh(u_2.c) + 2.\sqrt{2}.\sinh(u_2.c)} \quad \text{Eq. 7}$$

$$u_2 = \frac{1}{t} \cdot \sqrt{\frac{3.(1-v^2)}{2} \cdot \frac{P}{t.E}} \quad \text{Eq. 8}$$

$$\beta = \sqrt{8 \cdot \frac{G_a}{E} \cdot \frac{t}{t_a}} \quad \text{Eq. 9}$$

A equação para a tensão normal  $\sigma(x)$  é dada por, Eq. 10:

$$\begin{aligned} \sigma(y) = \frac{1}{\Delta} \cdot \frac{\bar{P}.t}{8.c} \cdot \left[ \left( \frac{R_2.\lambda^2.k}{2} \right. \right. \\ \left. \left. + \lambda.k'.\cosh(\lambda).\cos(\lambda) \right) \cdot \cosh\left(\frac{\lambda.x}{c}\right) \cdot \cos\left(\frac{\lambda.x}{c}\right) \right. \\ \left. + \left( \frac{R_1.\lambda^2.k}{2} \right. \right. \\ \left. \left. + \lambda.k'.\sinh(\lambda).\sin(\lambda) \right) \cdot \sinh\left(\frac{\lambda.x}{c}\right) \cdot \sin\left(\frac{\lambda.x}{c}\right) \right] \quad \text{Eq. 10} \end{aligned}$$

Em que  $k'$ ,  $\lambda$ ,  $\gamma$ ,  $\Delta$ ,  $R_1$ , e  $R_2$  são caracterizados pelas Equações 11 a 16, respectivamente.

$$k' = \frac{k.c}{t} \cdot \sqrt{3.(1-v^2) \cdot \frac{\bar{P}}{t.E}} \quad \text{Eq. 11}$$

$$\lambda = \gamma \cdot \frac{c}{t} \quad \text{Eq. 12}$$

$$\gamma = \sqrt[4]{6 \cdot \frac{G_a}{E} \cdot \frac{t}{t_a}} \quad \text{Eq. 13}$$

$$\Delta = \frac{1}{2} \cdot (\sinh(2 \cdot \lambda) + \sin(2 \cdot \lambda)) \quad \text{Eq. 14}$$

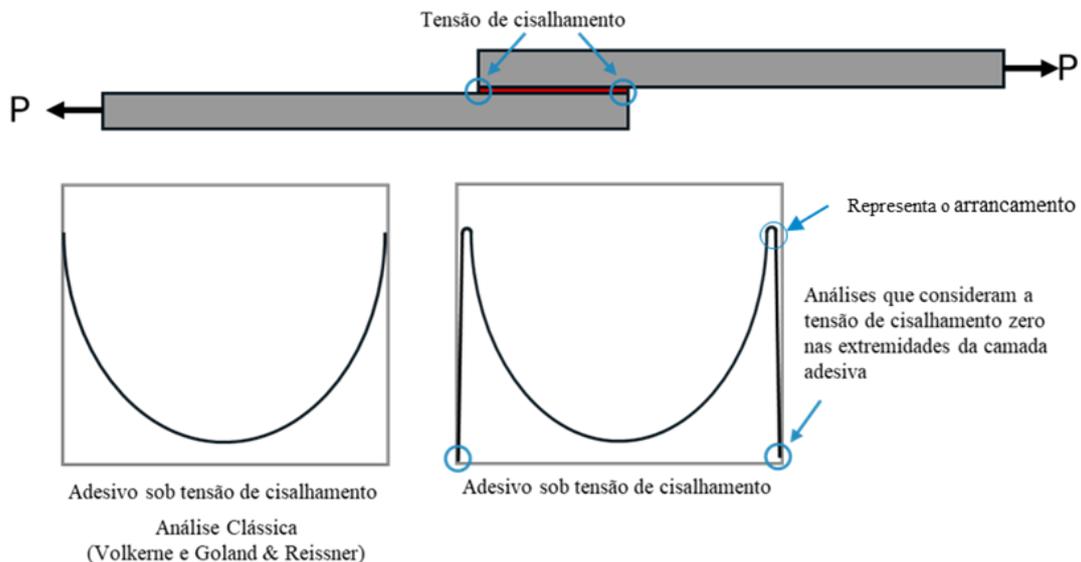
$$R_1 = \cosh(\lambda) \cdot \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cdot \cos(\lambda) \quad \text{Eq. 15}$$

$$R_2 = -\cosh(\lambda) \cdot \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cdot \cos(\lambda) \quad \text{Eq. 16}$$

### 2.1.4 Evolução dos Modelos Analíticos para Adesivos

Os trabalhos desenvolvidos por Volkersen (1938) e Goland e Reissner (1944), representaram um marco significativo na análise de tensões em juntas adesivadas. Contudo, esses estudos apresentavam limitações. Segundo Silva *et al.* (2017), os autores clássicos não abordaram as variações das tensões adesivas através da espessura, especialmente as tensões na interface, cruciais em situações de falha próxima a esta região. Além disso, não conseguiram reconhecer o pico de tensão nas extremidades da área de sobreposição, conforme ilustrado Figura 9. Os modelos propostos tratavam os aderentes como se fossem vigas finas, desconsiderando o cisalhamento transversal e as deformações normais, aspectos particularmente relevantes para aderentes flexíveis em cisalhamento, como os materiais compósitos.

Figura 9. A distribuição da tensão de cisalhamento do adesivo.



Fonte: Adaptado de Silva e Campilho (2012).

O modelo proposto por Ojalvo e Eidinoff (1987) avaliou o impacto das variações de tensão em função da espessura do adesivo. Já a pesquisa realizada por Tsai *et al.* (1998), foi capaz de elucidar as variações nas deformações normais e de cisalhamento nos materiais aderentes. O efeito do pico de tensões próximo das extremidades foi

elucidado por Allman (1977) e Chen e Cheng (1983), já Hart-Smith (1973) levou em conta o efeito de grandes deflexões, mas considerou a deformação individual dos aderidos superior e inferior na sobreposição, não negligenciando assim a camada adesiva.

Os pesquisadores Ojalvo e Eidinoff. (1987) conduziram um trabalho para avaliar o efeito das variações de tensão de cisalhamento através da espessura do adesivo. Seguindo essa linha, o estudo de Tsai *et al.* (1998), conseguiu elucidar o efeito das variações nas deformações normais e de cisalhamento nos elementos aderentes. As tensões de picos perto das bordas foram esclarecidas por Allman (1977) e por Chen e Cheng (1983). Por sua vez, Hart-Smith (1973), considerou o impacto de grandes deflexões, focando na deformação distinta dos aderentes na área de sobreposição sem ignorar a presença da camada adesiva.

Além dos modelos citados acima é possível notar que ao longo do tempo houve a necessidade de se desenvolver novos modelos analíticos de forma a se adequar a outros tipos de aplicações, de geometrias para as juntas e prever outros fenômenos que não tinham sido considerados, conforme apresentado no trabalho desenvolvido por (SILVA; CAMPILHO, 2012) e apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Comparação dos modelos analíticos para uniões adesivadas.

Método Analítico	Linearidade do material			Aderente dissimilar		Tensões do adesivo	
	Adesivo	Aderente	Adesivo	Espessura	Material	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$
	Linear	Não Linear	Linear				
Volkersen (1938)	X		X	X			X
Goland e Reissner (1944)	X		X			X	X
Hart-Smith (1973)	X	X	X			X	X
Allman (1977)	X		X			X	X
Grimes e Greimann, (1975)	X	X	X	X	X	X	
Ojalvo e Eidinoff (1978)	X		X		X	X	X
Chen e Cheng, (1983)	X		X	X	X	X	X
Tahmasebi, (2001)	X		X	X	X	X	X

Fonte: Adaptado de Silva e Campilho (2012).

Portanto, os métodos analíticos oferecem uma solução mais ágil para o desenvolvimento de projetos de menor complexidade. Contudo, muitos problemas de engenharia não podem ser totalmente solucionados de maneira analítica ou experimental. Isso ocorre porque projetos complexos nem sempre podem ser validados analiticamente ou através de medições experimentais (WANG; QIN, 2019). E embora os modelos analíticos ofereçam uma perspectiva matemática e preditiva sobre o

comportamento de uma junta adesiva, as ferramentas numéricas são mais exatas e capazes de simular desde juntas simples até estruturas adesivadas complexas (EBNESAJJAD; LANCK, 2014), permitindo também prever comportamentos distintos dos materiais (ANTELO *et al.*, 2022).

Dessa forma, propõe-se utilizar os métodos numéricos para uma avaliação aproximada do comportamento da geometria simples analisada neste estudo.

## **2.2 Modelos Numéricos**

Os métodos numéricos são técnicas matemáticas utilizadas para encontrar soluções aproximadas de problemas físicos através de um procedimento iterativo, incluindo a aplicação de equações de equilíbrio e relações constitutivas para as variáveis de estado dentro do domínio do problema (PORTELA; CHARAFI, 2022).

Segundo Oliveira (2016) Com o avanço dos computadores modernos, os métodos numéricos passaram a ser aplicados de forma mais abrangente na resolução de questões complexas da mecânica dos sólidos. Entre os vários métodos numéricos disponíveis para simular o comportamento de estruturas mecânicas, o Método dos Elementos Finitos destaca-se e é amplamente utilizado por engenheiros especializados em simulação. Este método consiste na aplicação de uma malha de elementos finitos sobre a área específica do problema em estudo.

Contudo, o MEF requer a utilização de uma malha, isto é, um conjunto de pequenos elementos interconectados de maneira pré-estabelecida. Como alternativa, existem os Métodos sem Malha, que dispensam a necessidade de gerar essa malha.

Nos Capítulos 2.2.1 e 2.2.2 seguintes serão abordados trabalhos que tratam da validação de juntas adesivadas através de MEF e de MSM.

### **2.2.1 Método dos Elementos Finitos (MEF)**

Adams e Peppiatt (1974) apresentaram uma das primeiras aplicações do MEF para prever a resistência de juntas de sobreposição simples coladas com bordas triangulares, diferentes para os padrões da época (quadrado) representando um aumento da complexidade da geometria analisada pelo MEF.

Fors (2010), desenvolveu uma análise usando o MEF para prever o comportamento de um adesivo ao ser utilizado em um projeto de duto de exaustão de uma turbina de foguete com uma geometria complexa, no qual um dos objetivos do projeto foi a investigação do design de uma interface dos componentes colados.

O estudo conduzido por Liu *et al.* (2024) propôs uma metodologia de análise de fadiga baseada em submodelagem por elementos finitos, com o objetivo de investigar o comportamento de fadiga das pás de turbinas eólicas compostas, com um foco nas juntas adesivas. O autor relata que, devido às estruturas complexas das pás das turbinas eólicas, há desafios significativos nas análises de simulação de fadiga, uma vez que nas

simulações as juntas adesivas podem ser desconsideradas ou simplificadas, impactando na precisão dos resultados das simulações.

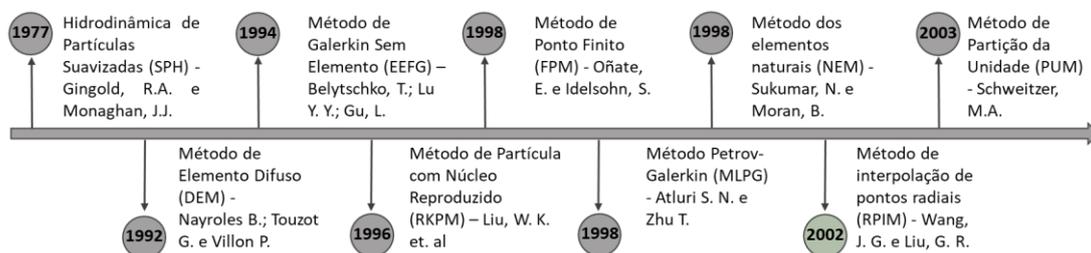
Os softwares de Método de Elementos Finitos são ferramentas muito empregadas em projetos de engenharia de uniões adesivadas, mas necessitam de cuidados, visto que em muitos projetos os adesivos são aplicados para união de peças grandes e complexas, em que a preparação da malha deve ser cuidadosamente estruturada para garantir uma conexão entre os nós sem gerar distorções na malha, o que pode gerar resultados imprecisos (BELINHA, 2014).

A preparação da malha de um modelo usando o MEF pode demandar muito tempo de pré-processamento devido aos nós serem conectados por elementos que devem garantir a formação dos polígonos moldados (CASTRO; MAGALHAES; CAMPOS, 2022). Da mesma forma, os casos que apresentam grandes deformações podem distorcer os elementos resultando em problemas de convergência (CHEN; HILLMAN; CHI, 2017; LIU, 2016). Associado a isso, o uso de uma malha refinada requisita um maior poder computacional, que por sua vez, pode limitar o seu uso devido ao elevado tempo de processamento (RESENDE *et al.*, 2021). Nesse contexto, a aplicação do Método Sem Malha (MSM) é considerada uma alternativa para as empresas de projetos de engenharia incorporarem a suas ferramentas de validação de estruturas, mas para isso é necessário investigar o seu nível de precisão e o tempo necessário para gerar uma análise estrutural.

### 2.2.2 Método Sem Malha (MSM)

O MSM surgiu em 1977 para resolver problemas astrofísicos utilizando o princípio da Hidrodinâmica de Partículas Macias (GINGOLD; MONAGHAN, 1977a). e vem sendo aprimorado ao longo dos anos por diversos pesquisadores, como apresentado na Figura 10.

Figura 10. Linha do tempo dos principais métodos de análise do tipo sem malha.



Fonte: Autoria própria.

Há trabalhos pioneiros que utilizam os Métodos sem Malha para analisar juntas adesivadas, como o trabalho desenvolvido por Tsai *et al.* (2014), que utilizou o Método Sem Malhas para verificar a falha coesa de uma articulação colada, o estudo proposto por Sánchez-Arce *et al.* (2020) no qual é analisado o comportamento de um adesivo

rígido, e a análise apresentada por (RESENDE *et al.*, 2021) sobre o comportamento plástico de uma junta adesiva. A maioria dos trabalhos apresentados nesse capítulo fazem uma análise comparativa entre o MSM e MEF, visto que o Método de Elementos Finitos apresentar resultados comprovados e os Métodos Sem Malha ainda são ferramentas pouco discutida para simular estruturas adesivadas.

Para a análise estrutural de componentes mecânicos usando MSM um dos softwares comerciais mais usados é o SimSolid. Este é baseado na teoria de aproximações externas proposta por Apanovitch (2021). As aproximações externas são uma generalização do MEF em termos de que formas geométricas absolutamente arbitrárias podem ser usadas como “elementos finitos”. As funções básicas que aproximam o campo de interesse no “elemento” podem ser de classe arbitrária e são independentes da forma do “elemento”. Os graus de liberdade são integrais sobre entidades geométricas correspondentes e uma análise adaptativa multipasse é usada para controlar a precisão da solução (APANOVITCH, 2019).

Atualmente o SimSolid vem sendo adotado com uma ferramenta importante para o desenvolvimento de projetos mecânicos em diversas empresas, como GM, Renault, Ford, MWM, Siemens, GE, Thyssenkrupp, Tigre e Airbus (R7, 2023), visto que apresenta vantagens como a capacidade de trabalhar com montagem de peças de pequeno e grande porte, o pré-processamento de simulação requer menos tempo e a redução das etapas do processo de simulação implica em uma menor probabilidade de erros por parte do usuário (APANOVITCH, 2019).

### **2.3 Análises Estruturais de Geometrias Complexas**

Uma estrutura complexa é caracterizada pela diversidade de seus aspectos técnicos, essenciais para garantir a sua segurança, estabilidade e desempenho funcional. Geralmente, o desenvolvimento dessas estruturas exige uma análise minuciosa para confirmar sua capacidade de resistir às cargas de projeto, incluindo o peso próprio, bem como a influência de variáveis ambientais, com o objetivo de preservar sua integridade e segurança.

Assim, um dos requisitos cruciais para o uso de estruturas de geometria complexa é que seu desempenho e, mais importante, sua resistência sejam avaliados de maneira confiável (YAKUPOV *et al.*, 2023), principalmente em aplicações que possam comprometer a segurança das pessoas ou ativos. Nesse contexto, métodos e técnicas são desenvolvidos para calcular e analisar o estado tensão e deformação dos elementos estruturais, sendo necessário o uso de ferramentas modernas como softwares de *Computer Aided Engineering* (CAE). Dessa forma, o Método Sem Malha vem sendo utilizado como uma ferramenta importante para prever o comportamento de peças e montagens complexas, visto que permite eliminar a necessidade de simplificação da geometria e da elaboração da malha da geometria.

A partir da pesquisa de anterioridade sobre simulação de geometrias complexas adesivadas através do Método Sem Malhas, adotando a *string* de busca – ("adhesive joints" OR "adhesive bonded" OR "bonded joints" OR "structural adhesive" OR "structural adhesives") AND ("meshless method" OR "meshless") AND "complex geometry", nas bases de dados da Web of Science e Science Direct, não foi possível identificar até o momento trabalhos publicados empregando o MSM para investigar juntas adesivadas com geometrias complexas, mas foram identificados trabalhos de investigação do comportamento de estruturas complexas nas áreas da construção civil, nos setores aeroespacial e automotivo e na área da saúde. Nesse contexto, Altair (2019a) apresenta um estudo de caso sobre o projeto do edifício Antara Fase II, o prédio mais alto da Cidade do México, visto na Figura 11.

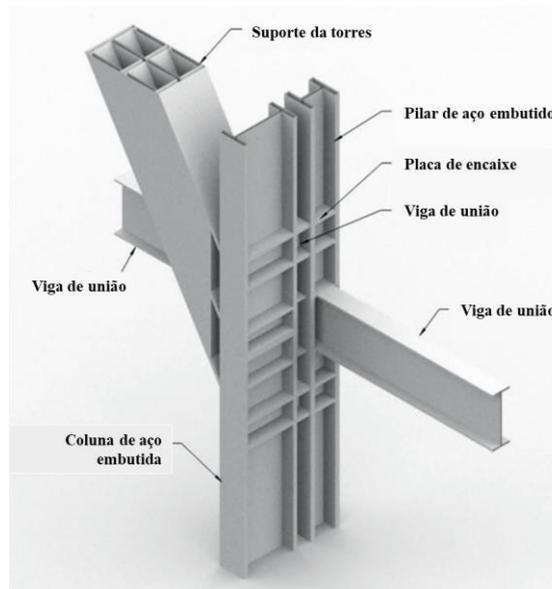
*Figura 11. Edifício Antara, construído com o auxílio de um software MSM.*



*Fonte: Archello (2024).*

O projeto apresentava um elevado grau de risco devido ao projeto arquitetônico com o sistema de encaixe de vigas de aço, como mostrado na Figura 12, condições ambientais, podendo ser submetido a terremotos, inundações e fortes rajadas de ventos.

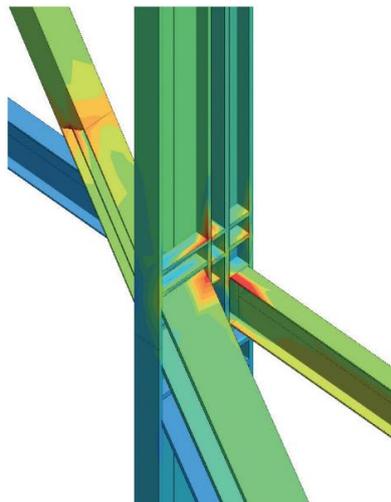
Figura 12. Esquemático de um dos conjuntos de vigas montados no Edifício Antara II.



Fonte: Altair (2019a).

Portanto, os engenheiros necessitavam desenvolver um sistema de resistência sísmica, incluindo a avaliação detalhada das conexões da estrutura de aço, que sofreu várias alterações durante a fase preliminar do projeto. O maior desafio do time de engenharia foram as restrições de tempo impostas ao projeto para atendimento dos prazos. A fase de avaliação da estrutura utilizando o Método Sem Malha foi executada 5 vezes mais rápida do que seria necessário utilizando o Método de Elementos Finitos tradicional, a Figura 13 demonstra uma simulação estrutural realizada em um conjunto de vigas do edifício Antara II utilizando um software de MSM.

Figura 13 Resultados de uma das simulações do edifício Antara II.



Fonte: Altair (2019a).

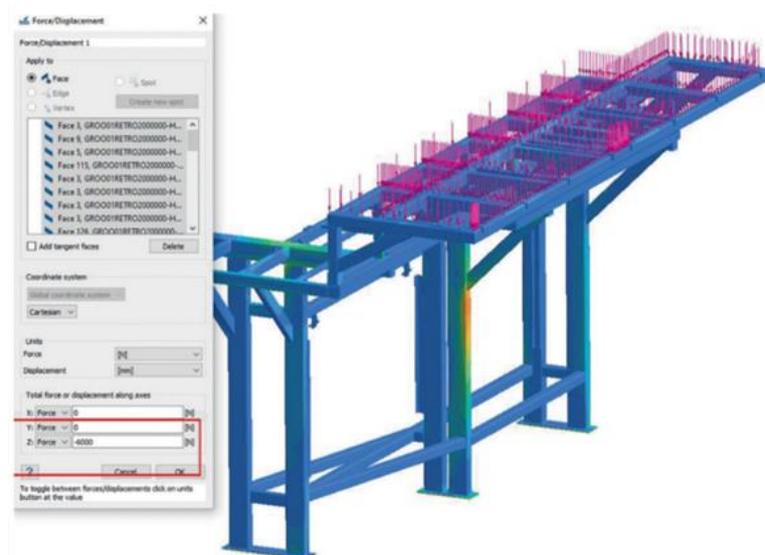
Já a empresa espanhola de engenharia INESPASA, atua no fornecimento de soluções para projetos *turnkey* nos setores aeroespacial e automotivo. Com o objetivo de desenvolver e testar os conceitos dos protótipos de componentes de aeronaves de maneira rápida, a empresa optou por realizar simulação multifísica para avaliar seus projetos de aeroestrutura e identificar possíveis problemas antes que eles ocorram e garantir a viabilidade das soluções implementadas. Na Figura 14. é apresentada uma plataforma utilizada para montagem de equipamentos aeroespaciais, nas Figuras 14 e 15 tem-se os resultados das simulações estruturais realizadas pela INESPASA. Pode-se perceber que o uso de uma ferramenta comercial *meshless* permitiu-lhes avaliar diferentes soluções de forma rápida e eficiente a fim de alcançar o design mais adequado.

Figura 14. Plataforma para montagem de equipamentos aeroespaciais.



Fonte: Altair (2019c).

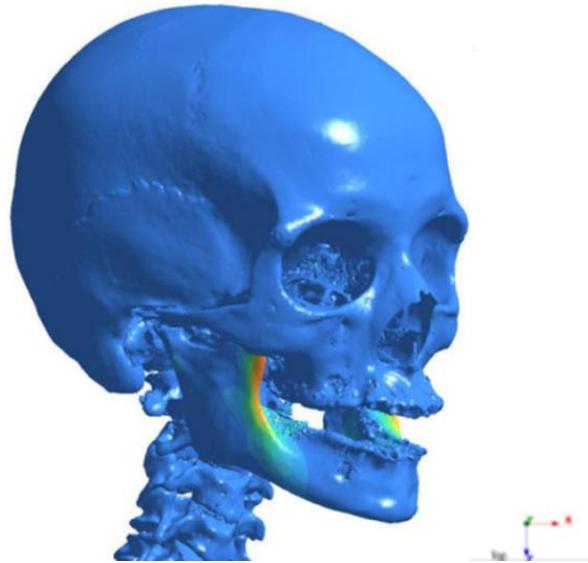
Figura 15. Representação das simulações estruturais realizadas pela INESPASA.



Fonte: Altair (2019c).

A McFarlane Hand e Upper Limb Centre (HULC) – Londres, utiliza os softwares *meshless* para avaliar a biomecânica das tensões ósseas em que os médicos fazem o escaneamento da articulação óssea de um humano, no qual consegue registrar a microestrutura do osso trabecular interno, então a imagem é importada para o SimSolid e dessa forma é possível simular o comportamento mecânico e comparar com o modelo físico, como ilustrado na Figura 16.

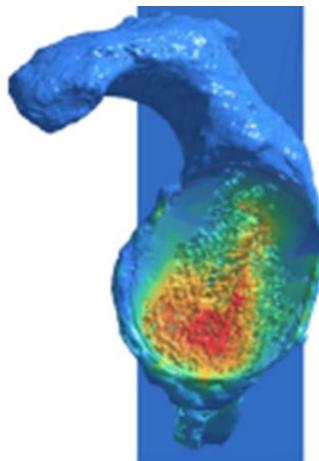
*Figura 16. Tensões no osso da mandíbula após ter sua geometria escaneada.*



*Fonte: Altair (2019b)*

A HULC também avaliou as condições experimentais de carregamento de componentes para implantes, Figura 17. O software permite simular diferentes tipos de implantes obtendo respostas das tensões ósseas, o que pode influenciar na longevidade do procedimento cirúrgico.

*Figura 17. Tensões no osso da escápula com implante glenoidal oculto.*



*Fonte: Altair (2019b).*

Diante do que foi exposto, verifica-se que o Método Sem Malha pode ser uma importante ferramenta para simular o comportamento de geometrias complexas e grandes montagens. O uso desse método pode reduzir o tempo do processo de simulação, e desse modo, promover a tomada de decisão durante as fases iniciais de um projeto, minimizando custos e riscos associados. No entanto, não foi identificado nenhum estudo de caso ou trabalho científico no qual aborta a utilização desse tipo de tecnologia para validar estruturas complexas adesivadas.

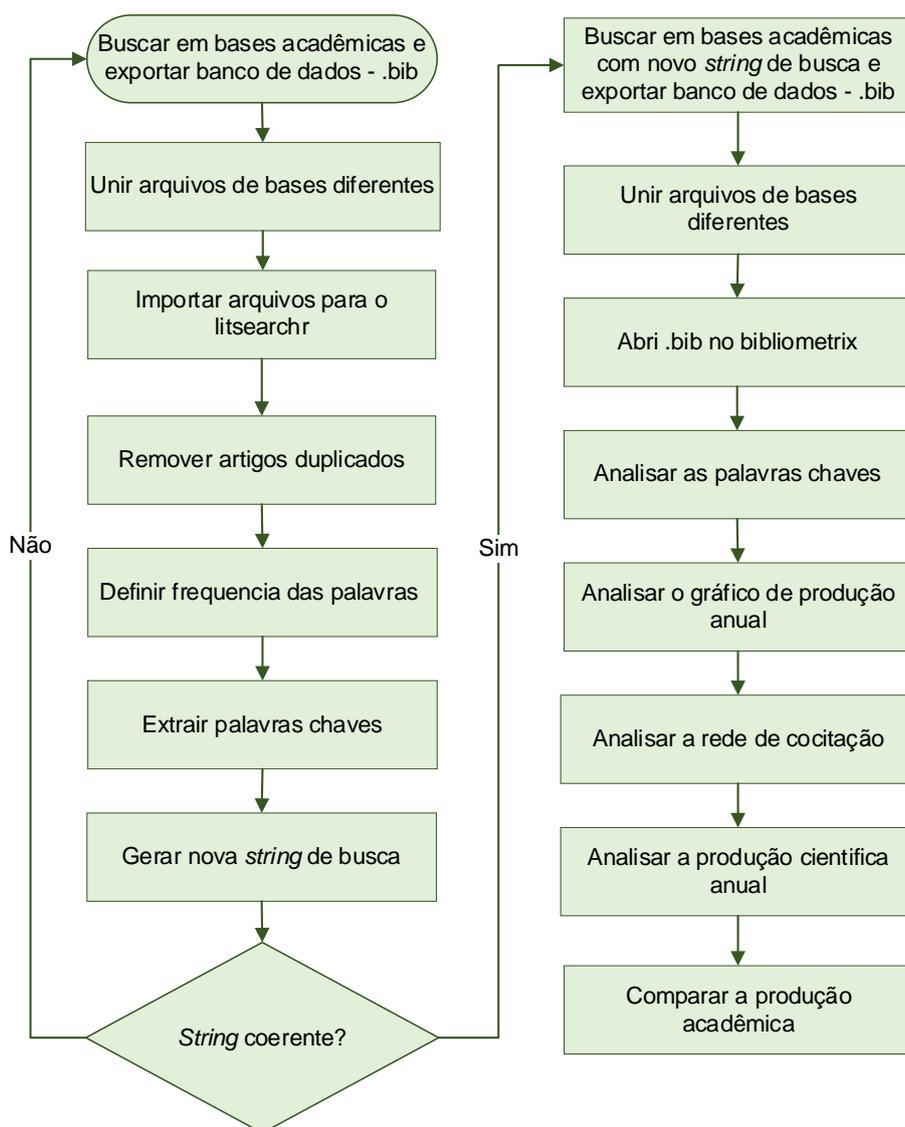
## 2.4 Análise bibliométrica

A bibliometria refere-se ao complexo mapeamento científico pois envolve múltiplas etapas e o uso de várias ferramentas. A análise bibliométrica tem a capacidade de avaliar a relevância das publicações por meio de tendências de desempenho de artigos e revistas, bem como padrões de colaboração (DONTHU; KUMAR; PANDEY, 2021; DONTHU *et al.*, 2021; VERMA; GUSTAFSSON, 2020). Assim, os estudos bibliométricos podem fornecer uma base sólida ao oferecer uma perspectiva global, identificar lacunas de pesquisa, sugerir novas ideias para investigação e posicionar as contribuições dentro dessa linha de pesquisa (DONTHU; KUMAR; PANDEY, 2021).

Diante disso, propôs-se avaliar e comparar a produção acadêmica de trabalhos desenvolvidos a partir das análises de uniões de peças por adesivos estruturais através de simulação numérica usando o Método Sem Malha, destacando e promovendo uma nova tecnologia que estimula o desenvolvimento de projetos mecânicos com o uso de adesivos estruturais em componentes mecânicos. A análise bibliométrica deste estudo baseou-se na metodologia descrita e utilizada por Pereira *et al.* (2022), tendo como principal referência Reis (2021). Ele sugeriu o uso da ferramenta *Litsearchr*, desenvolvida por Grames *et al.* (2019), para desenvolver uma *string* de busca mais assertiva, criando uma rede de correlação de palavras-chave, o que permitiu identificar os termos mais relevantes para o tema pesquisado. Outra ferramenta utilizada foi o Bibliometrix, proposto por Aria e Cuccurullo, (2017) que realiza uma análise bibliométrica a partir de dados extraídos de bancos de dados acadêmicos, e BibTeX Tidy desenvolvido por West (2021). Dessa forma, foi possível construir uma matriz de dados incluindo citações, análise de produção científica, as principais revistas sobre o tema, bem como os autores e países envolvidos.

A metodologia desenvolvida no artigo de Pereira *et al.* (2022) visou ampliar e otimizar o processo de pesquisa e a análise dos resultados obtidos. Reis (2021) inicialmente propôs usar a metodologia para delimitar a *string* de busca; no entanto, devido ao baixo número de trabalhos publicados sobre o assunto, foi necessário modificar a metodologia para ampliar as buscas. A Figura 18 apresenta um fluxograma da metodologia desenvolvida, indicando que as bases para coleta de artigos foram a Scopus e a Web of Science.

Figura 18. Fluxograma para busca e análise dos dados bibliométricos.



Fonte: Autoria própria.

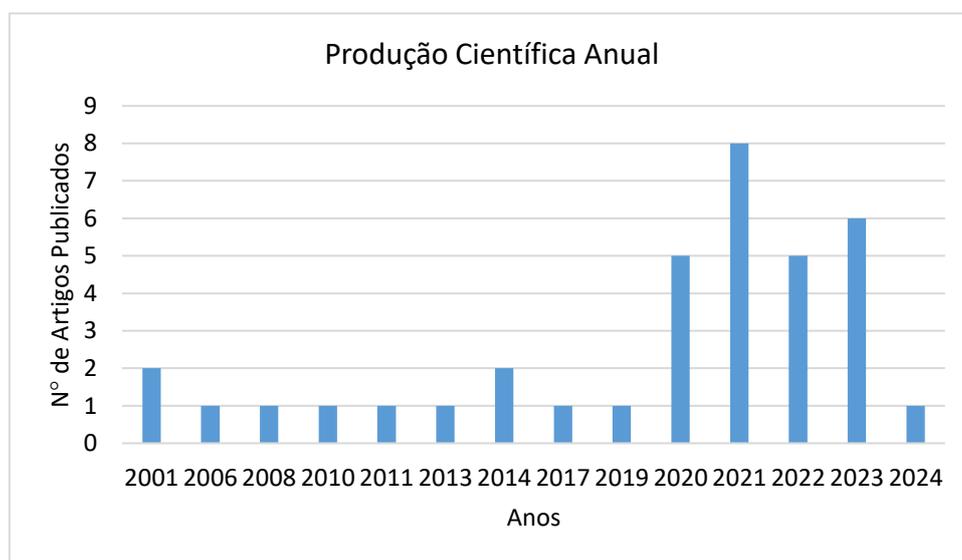
A primeira busca realizada utilizando a *string* ("*structural adhesives*" AND "*meshless*") resultou em um total de 11 documentos. A ferramenta Litsearchr, desenvolvida por Grames *et al.* (2019b), possibilitou a medição da força de interação entre as palavras, permitindo a criação de grupos com os termos extraídos e fornecidos pela ferramenta. Seguindo essa etapa, foi desenvolvido um novo script para a busca: ("*adhesive joints*" OR "*adhesive bonded*" OR "*bonded joints*" OR "*structural adhesive*" OR "*structural adhesives*") AND ("*meshless method*" OR "*meshless*"). Essa abordagem resultou em uma nova pesquisa nos bancos de dados, alcançando um total de 34 documentos na base de pesquisa Scopus e 26 na Web of Science, sendo que foram identificados 24 artigos duplicados, portanto totalizando 36 publicações.

Esta abordagem metodológica não só ajudou a quantificar a produção científica relacionada ao uso de softwares de simulação de Método Sem Malha (MM) para

resolver problemas em peças adesivadas, mas também forneceu dados relevantes para orientar a pesquisa, destacando tendências, impactos e dinâmicas da área estudada. Um aspecto identificado foi o volume de produção científica sobre o tema ao longo dos anos, permitindo o reconhecimento de períodos de intensa atividade científica e de estagnação, o que oferece uma perspectiva histórica sobre o desenvolvimento do campo.

Observou-se, especialmente a partir do ano de 2020, conforme ilustrado na Figura 19, uma tendência crescente na realização de estudos aplicando o Método Sem Malha para resolver problemas de validação ou predição do comportamento de juntas e peças adesivadas, marcando um período de constância no interesse pelo tema.

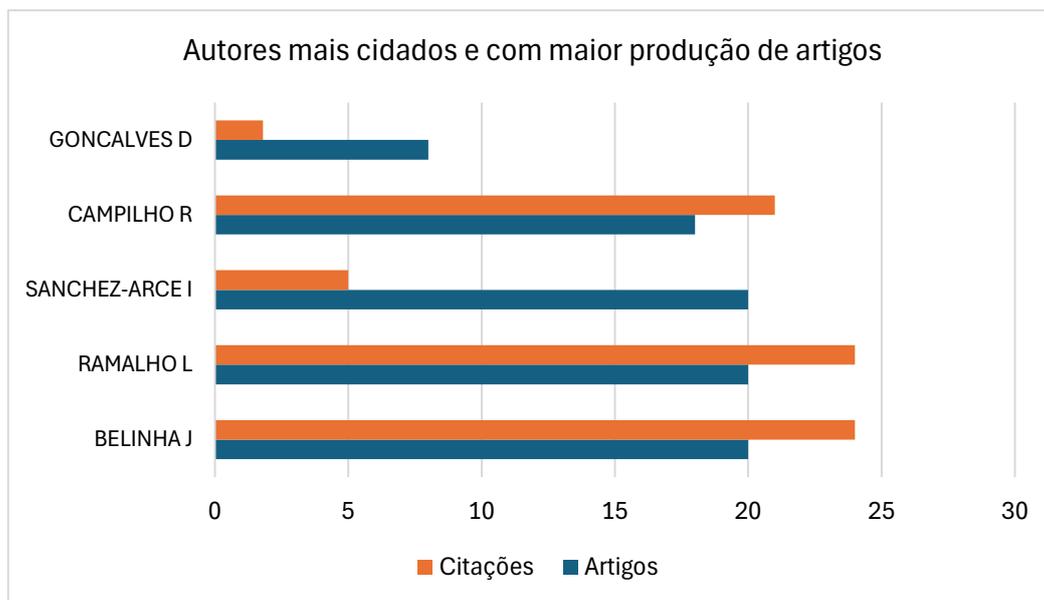
Figura 19. Volume de trabalhos publicado por ano sobre o tema.



Fonte: Autoria própria.

A análise bibliométrica contribui significativamente para identificar os autores que mais contribuem para esse campo de pesquisa. Da mesma forma, identificaram-se os autores mais citados, conforme ilustrado na Figura 20, o que auxilia na identificação de trabalhos fundamentais e influentes, demonstrando como as descobertas científicas são integradas e utilizadas por outros pesquisadores na área. Essas análises também revelaram padrões de colaboração, identificando que os autores mais influentes estão associados ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) e ao Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI).

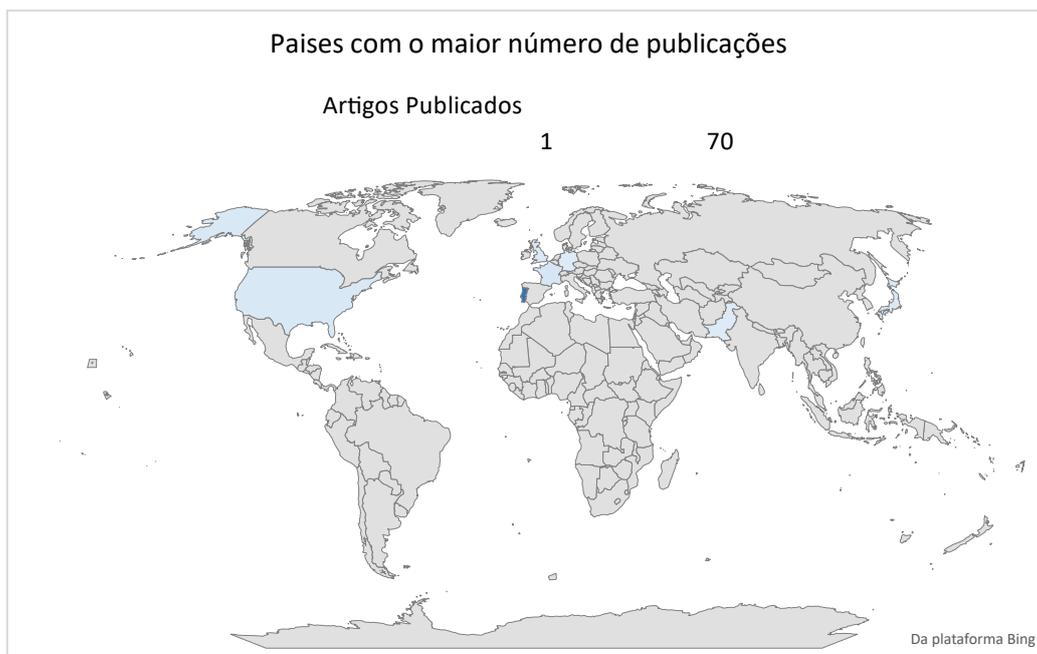
Figura 20. Pesquisadores mais relevantes.



Fonte: Autoria própria.

Como indicado anteriormente, observa-se um maior volume de publicações desenvolvidas nessas duas universidades. Assim, constatou-se que o principal volume de publicações sobre o tema é produzido em Portugal, conforme demonstrado na Figura 21.

Figura 21. Mapa dos países que mais publicam.



Fonte: Autoria própria.

A análise bibliométrica realizada também foi fundamental para mapear as revistas que mais publicam sobre o tema, conforme ilustrado na Figura 22, incluindo seus fatores de impacto. Isso auxiliou na avaliação e na condução de pesquisas dentro das revistas mais influentes.

Figura 22. Mapa das revistas que mais lançam artigos sobre o tema.

COMPOSITE STRUCTURES - Fator de Impacto 6.3	INTERNATIONAL JOURNAL OF ADHESION AND ADHESIVES - Fator de Impacto 3.4	COMPOSITES PART C: OPEN ACCESS - Fator de Impacto 4.2	JOURNAL OF THE BRAZILIAN SOCIETY OF MECHANICAL SCIENCES AND ENGINEERING... - Fator de...
ENGINEERING ANALYSIS WITH BOUNDARY ELEMENTS - Fator de Impacto 3.3	JOURNAL OF ADHESION - Fator de Impacto 2.2	PROCEDIA STRUCTURAL INTEGRITY - Fator de Impacto 2.1	FINITE ELEMEN... IN ANALY... AND DESIG...

Fonte: Autoria própria.

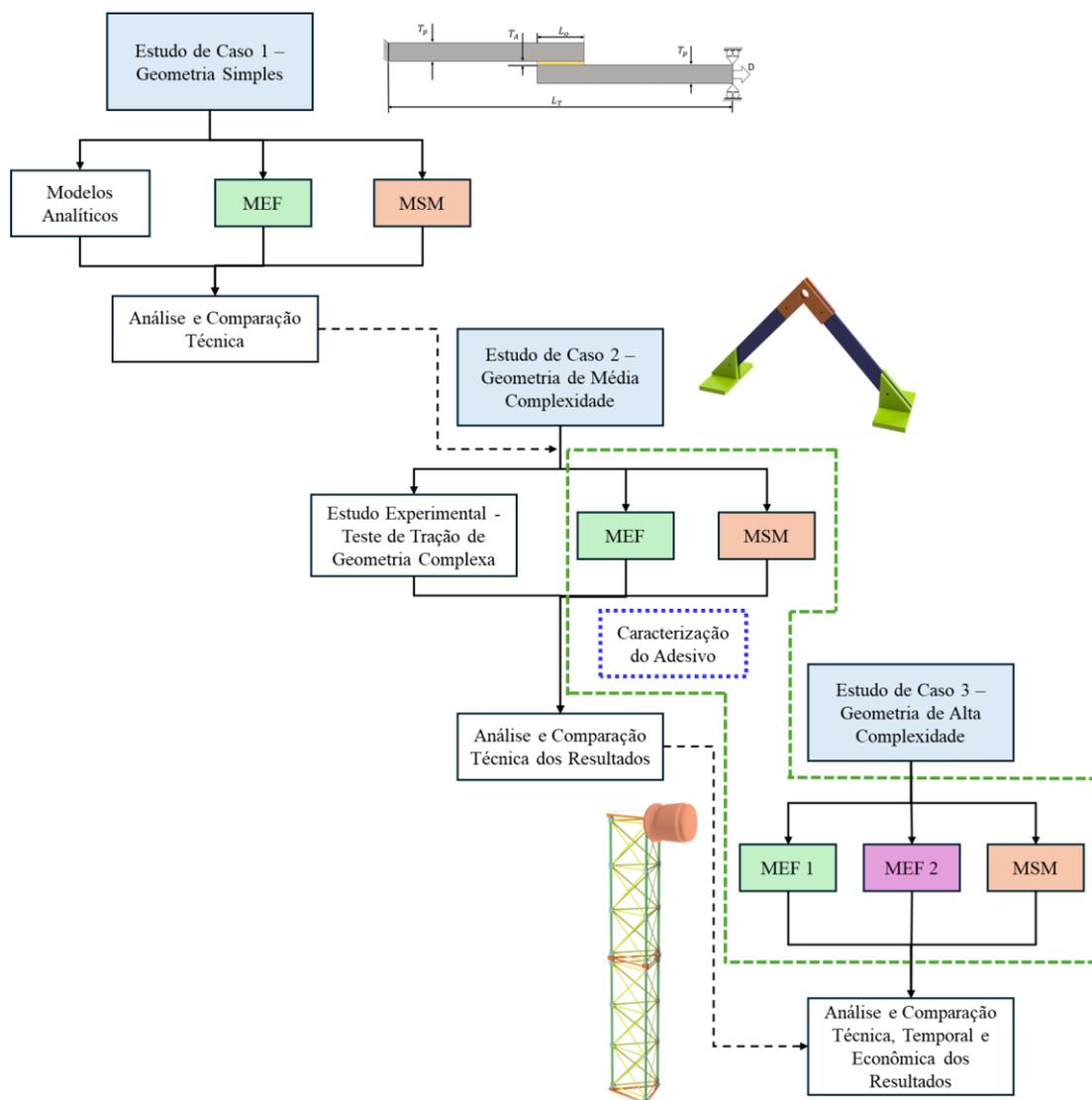
Portanto, a análise bibliométrica contribuiu para a compreensão do tema pesquisado, indicando trabalhos mais aderentes à pesquisa e contribuindo para identificar autores e revistas mais influentes sobre o tema.

### 3 Materiais e Métodos

#### 3.1 Metodologia

A sequência metodológica utilizada neste trabalho é ilustrada na Figura 23, onde estão expostas as principais etapas de modelagem e simulação, tanto numérica quanto experimental.

Figura 23. Metodologia proposta.



Fonte: Autoria própria.

Este trabalho compreende a análise e validação de juntas adesivadas de geometrias simples, média e de alta complexidade através de simulação MEF e MSM. No primeiro estudo de caso foram consideradas simulações e o desenvolvimento de modelos analíticos para a geometria de uma junta de sobreposição simples, por ser uma geometria amplamente estudada na literatura. Os parâmetros de teste utilizados nos

softwares de simulação serviram como base para o desenvolvimento do segundo estudo de caso.

No segundo estudo de caso foi considerada uma geometria de média complexidade no qual foi proposto a implementação de um estudo experimental e simulações numéricas através dos métodos MEF e MSM a fim de avaliar as respostas de cada método. Esse estudo contribuiu na compreensão dos resultados ao passo que é aumentado o nível de complexidade das geometrias. Além disso, os dados da caracterização do adesivo também serviram como parâmetros para a implementação do modelo de geometria de alta complexidade.

Em seguida, no terceiro estudo de caso foi considerada uma geometria de alta complexidade no qual foram avaliados os resultados técnicos e os custos computacionais e econômicos da aplicação dos métodos MEF e MSM.

Os estudos de caso serão detalhados nos Capítulos 0, 5 e 6 juntamente com os principais resultados obtidos para cada fase.

## **3.2 Materiais**

### **3.2.1 Softwares**

Para a realização de cálculos analíticos, utilizou-se o software SMath Solve, versão 1.0, build 8348. Este software gratuito é utilizado como uma calculadora matemática capaz de solucionar diversos problemas de engenharia, como sistemas de equações para juntas de cisalhamento adesivadas.

Para comparação das simulações numéricas estruturais, foram analisadas diferentes geometrias de juntas adesivadas com variadas complexidades, utilizando o MEF e o MSM por meio de softwares comerciais. No caso do MEF, foi utilizado o Ansys Mechanical, versão 2023 R1 (build 23.1.0.0) na simulação de todos os estudos de caso. No terceiro estudo de caso, adicionalmente, foi empregado o SolidWorks Premium Simulation, versão 2023 SP3, que também possui um módulo de simulação por elementos finitos. Ambos os softwares de Elementos Finitos permitiram a criação das malhas, a definição das condições de contorno, a aplicação dos carregamentos e o processamento dos modelos. Para distinguir os dois softwares no terceiro estudo de caso, o Ansys Mechanical foi referido como MEF e MEF 1 e o SolidWorks Premium Simulation como MEF 2.

Já para as simulações utilizando o MSM, foi adotado o software SimSolid, versão 2024 (build 2024.0.0.223). Este software permite a realização de simulações estruturais sem a necessidade de simplificações na geometria e criação de malha, o que agiliza significativamente o processo de simulação.

Para o projeto e desenvolvimento das geometrias empregadas em cada estudo de caso e a simulação estrutural do estudo de caso três foi utilizado o software

SolidWorks, versão 2023 SP3. O SolidWorks Premium é uma das ferramentas de *Computer Aided Design* (CAD) muito utilizada por engenheiros mecânicos para desenvolver projetos de máquinas e equipamentos, além de possuir um módulo integrado para o desenvolvimento de simulações estáticas lineares a partir do Método de Elementos Finitos. Por fim, para as análises estatísticas dos dados obtidos, utilizou-se o Microsoft Excel 365.

### **3.2.2 Computador**

Para a construção dos modelos CAD, o desenvolvimento dos modelos analíticos e a realização das simulações em MEF e MSM, foi utilizado um computador equipado com um processador Intel Xeon W-2225, 128 GB de RAM e placa de vídeo NVIDIA Quadro P4000.

### **3.2.3 Máquina de ensaio de tração**

Para a execução dos ensaios de caracterização do adesivo estrutural, foi utilizada uma máquina universal de ensaios disponível no laboratório de ensaios mecânicos do SENAI CIMATEC, modelo EMIC DL 2000, equipada com o software de processamento de dados Tesc 2000. Nesse caso, foi utilizada uma célula de carga de 9 kN. Para o desenvolvimento do estudo de caso da geometria de média complexidade, utilizou-se a mesma máquina, porém com uma célula de carga de 500 N.

### **3.2.4 Caracterização do adesivo**

O adesivo Betamate 2096 foi caracterizado a partir de um conjunto de técnicas e métodos para obtenção das propriedades físicas e mecânicas do material, como o módulo de elasticidade, a resistência à tração, a densidade, o coeficiente de Poisson e o comportamento elástico e plástico do material. Tais informações são dados necessários para o desenvolvimento das simulações, que por sua vez podem prever o comportamento dos componentes e estruturas sob condições reais de operação. Dessa forma, ao assegurar que os dados sobre o material são precisos e representativos, os engenheiros podem melhorar significativamente a confiabilidade das simulações.

O adesivo estrutural epóxi bicomponente Betamate 2096, fabricado e distribuído no Brasil pela Dow Automotive, possui ampla aplicação na indústria automobilística, tanto para fins estruturais quanto para reparos. Este material apresenta boa durabilidade da ligação adesiva e capacidade de vedação, protegendo a superfície de interface contra a corrosão. Além disso, é utilizado na adesão de aços automotivos, incluindo aços revestidos (eletronicamente ou com matérias orgânicas) e alumínio pré-tratado (DOW AUTOMOTIVE, 2021).

O volume disponível para a caracterização e adesivagem das peças utilizado foi de 215 ml (230 g), e as especificações técnicas fornecidas pela Dow Automotive estão detalhadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características técnicas do adesivo BETAMATE 2096.

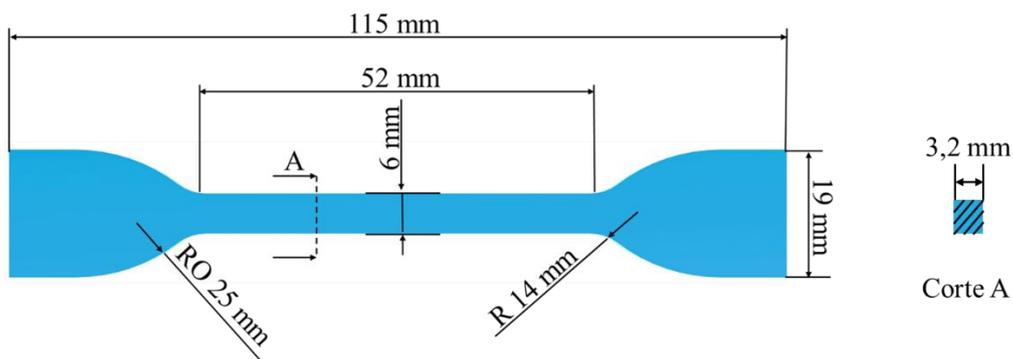
	Componente A (Resina)	Componente B (Endurecedor)
Base química	Resinas Epóxis	Aminas poliméricas
Cor	Azul	Branco
Relação de mistura	A:B = 2:1	
Densidade (25 °C)	1,12 g/ml	
Viscosidade/Ponto de Rendimento	140 Pas / 2 Pa	2 Pas / 270 Pa
Condição de cura	Temperatura ambiente: após 2 dias 90% das temperaturas de tenacidade final até 180 °C viável	
Temperatura de processamento	60 °C / 2 horas, de 2 a 7 dias à temperatura ambiente	
Tempo de manuseamento (20 °C)	Aproximadamente 1 hora	

Fonte: DOW Automotive (2021).

### 3.2.4.1 Fabricação dos corpos de prova

A caracterização do Betamate 2096 para determinação das propriedades mecânicas a partir do ensaio de tração envolveu a fabricação de peças de teste seguindo as recomendações da norma ASTM D638-10. A geometria dos corpos de prova foi baseada nas dimensões do modelo IV da norma ASTM D638-10, como visto na Figura 24.

Figura 24. Geometria do corpo de prova.

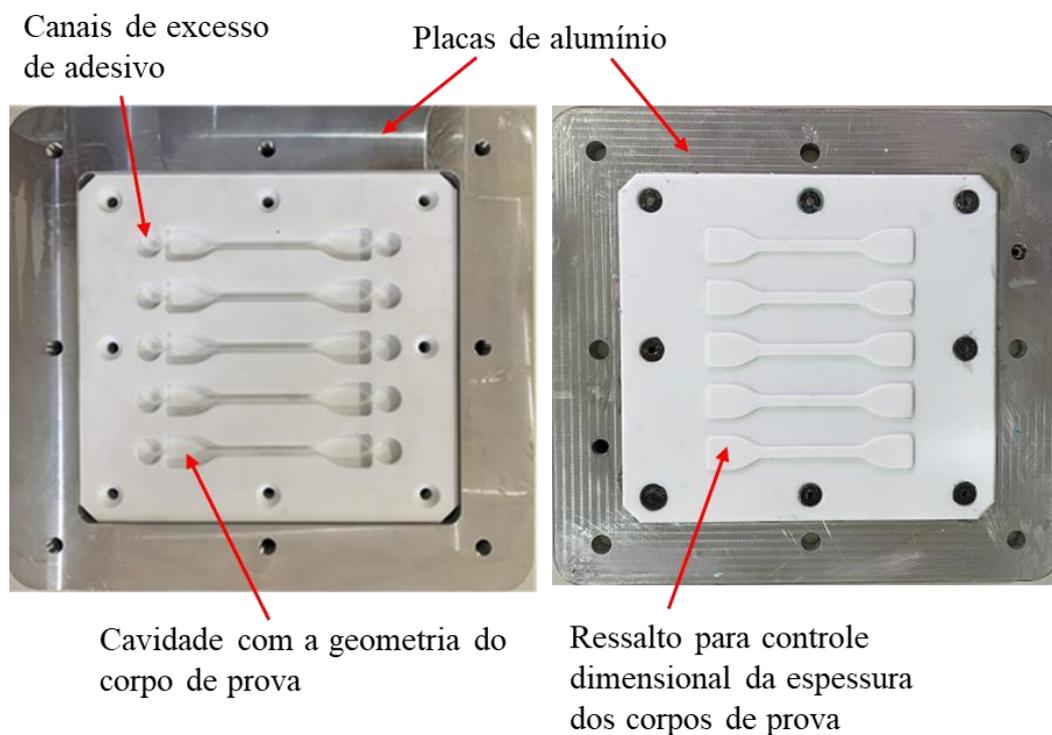


Fonte: Adaptada de ASTM D638-10.

O processo de confecção das amostras consistiu na utilização de um molde composto por duas placas de alumínio, responsáveis pelo fechamento e controle dimensional; duas placas de tetrafluoroetileno (teflon), projetadas para delimitar cinco geometrias dos corpos de prova, conforme ilustrado na Figura 25. As placas de teflon foram utilizadas nesse processo porque possuem uma superfície quimicamente não

reativa, o que dificulta o mecanismo de adesão à sua superfície, facilitando a extração dos corpos de prova.

Figura 25. Molde para produção dos corpos de prova.

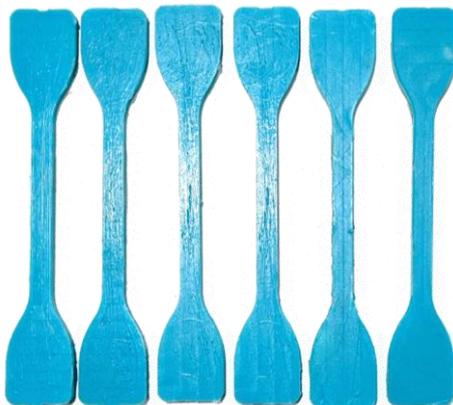


Fonte: Autoria própria.

Inicialmente, utilizou-se o uso de papel embebido em acetona como método de limpeza química para garantir a completa remoção de possíveis gorduras presentes nas superfícies que entrariam em contato com o adesivo. O objetivo dessa etapa não é apenas eliminar possíveis resíduos de gordura oriundos do manuseio das placas, mas também remover outras impurezas, como poeira ou líquidos indesejados. Após essa etapa as placas de teflon foram colocadas em uma estufa a cerca de 60°C durante 10 min para remoção da umidade.

A preparação da mistura foi executada manualmente, utilizando uma espátula em um recipiente de vidro apropriado, seguindo a proporção exata de 1 g do catalizador para cada 2 g de resina. Foi crucial misturar adequadamente até que o adesivo apresente uma consistência uniforme e observada uma mistura homogênea. Os componentes misturados foram depositados no molde. Para minimizar a formação de bolhas durante a deposição do adesivo, utilizou-se um sistema de vibração com um agitador de peneiras ajustado para uma amplitude de vibração de 3,5 mm. O adesivo Betamate 2096, uma vez depositado no molde, foi curado à temperatura de 25°C por um período mínimo de 7 dias, seguindo a recomendação do fabricante DOW, sendo obtido os corpos de prova demonstrado na Figura 26.

Figura 26. Corpos de prova com adesivo Betamate 2096.



Fonte: Autoria própria.

### 3.2.4.2 Ensaio de tração do adesivo Batamate 2096

Para o controle dimensional dos corpos de prova, foi utilizado um paquímetro para realizar a medição da largura e espessura dos corpos de prova, com três medições feitas em cada posição, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Dimensões dos corpos de prova do ensaio de tração do Betamate 2096.

Corpo de Prova	Largura média (mm)	Desvio Padrão	Espessura média (mm)	Desvio Padrão
1	6,14	0,01	3,34	0,08
2	6,12	0,01	3,04	0,06
3	6,10	0,03	3,24	0,01
4	5,90	0,09	3,00	0,05
5	6,16	0,02	3,34	0,01
Média	6,08	0,02	3,19	0,03

Fonte: Autoria própria.

Em seguida os corpos de prova foram testados em uma máquina universal de ensaios existente no laboratório de ensaios mecânicos do SENAI CIMATEC, o modelo EMIC DL 2000, equipada com o software de processamento de dados Tesc 2000, uma célula de carga de 9 kN e um sistema de garras pneumáticas. A velocidade utilizada no ensaio foi de 5 mm/min, conforme recomendado pela norma D638-14. Dessa forma, foi possível determinar o módulo de elasticidade e a curva tensão *versus* deformação de engenharia.

### 3.2.4.3 Tratamento da curva tensão-deformação do Betamate 2096

Utilizando o Excel 365, um polinômio de sexta ordem foi estabelecido para representar as curvas de cada corpo de prova. Uma tabela foi elaborada, mostrando a

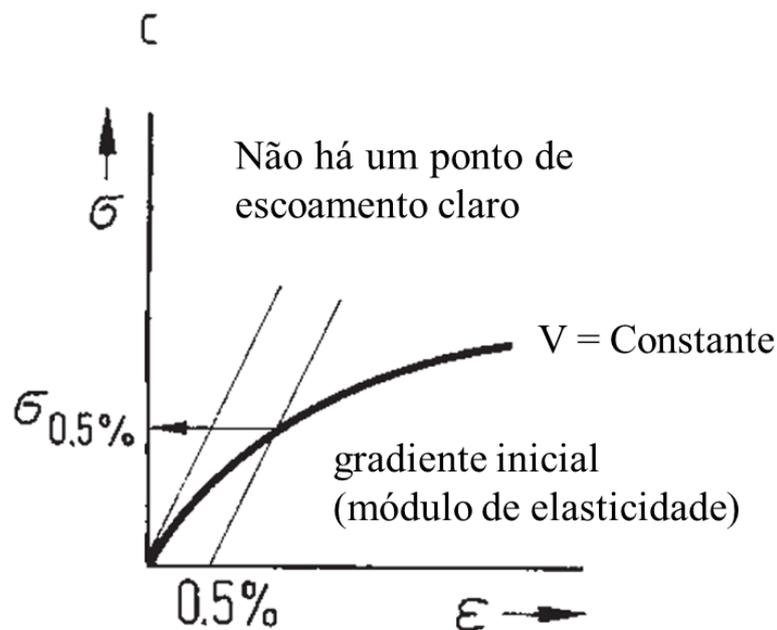
variação da deformação de 0 a 0,064 mm/mm, com incrementos de 0,0001 mm/mm. A partir desses dados, foi calculado a média de deformação para todos os corpos de prova em cada intervalo, permitindo a criação de uma curva média de engenharia que descreve a relação entre tensão e deformação para o Betamate 2096. Posteriormente foi implementado o cálculo para definir a curva tensão versus deformação real, com base nas equações 17 e 18. Enquanto o coeficiente de Poisson de 0,33 foi obtido a partir do boletim técnico do fabricante.

$$\epsilon_{real} = \ln(1 + \epsilon_{eng}) \quad \text{Eq. 17}$$

$$\sigma_{real} = \sigma_{eng} \cdot (1 + \epsilon_{eng}) \quad \text{Eq. 18}$$

Foi também realizado um ajuste para definir o limite elástico (LE) do material, conforme recomendado por Erhard, (2006). Ele indica que, para deformações de até 4% as curvas tensão-deformação de peças plásticas podem ser eficientemente modeladas por um polinômio de quinta ordem, iniciando-se no ponto zero. A inclinação da reta tangente a esse polinômio passando pela origem determina o módulo de elasticidade do material. Então Erhard (2006), propõe que esta reta tangente seja deslocada em 0,5%, conforme mostrado na Figura 27 para ajustar o modelo ao comportamento real do material. A interseção da reta deslocada com a curva de tensão-deformação real do Betamate 2096 indicou a tensão de escoamento.

Figura 27. Adequação do valor de "estresse de falha" para materiais com curva semelhante.

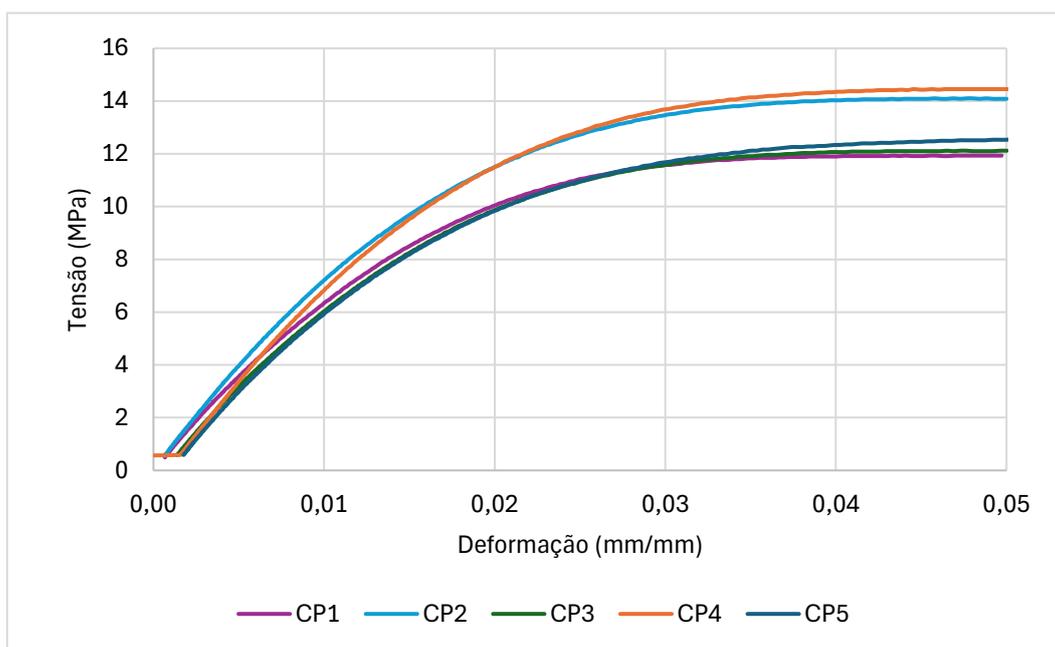


Fonte: Adaptado de Erhard (2006).

### 3.2.4.4 Resultado da caracterização do Betamate 2096

A partir do ensaio de tração realizado com os corpos de provas do adesivo Betamate 2096 foi possível obter as curvas de engenharia de cinco corpos de prova, conforme demonstrado na Figura 28. O valor médio de limite elástico obtido para o adesivo estudado foi de 10,42 MPa, com um desvio padrão de 0,76 a uma deformação de 0,02 mm/mm foi possível obter um desvio padrão relativamente baixo, indicando uma baixa dispersão dos resultados e pouca variação no comportamento das curvas.

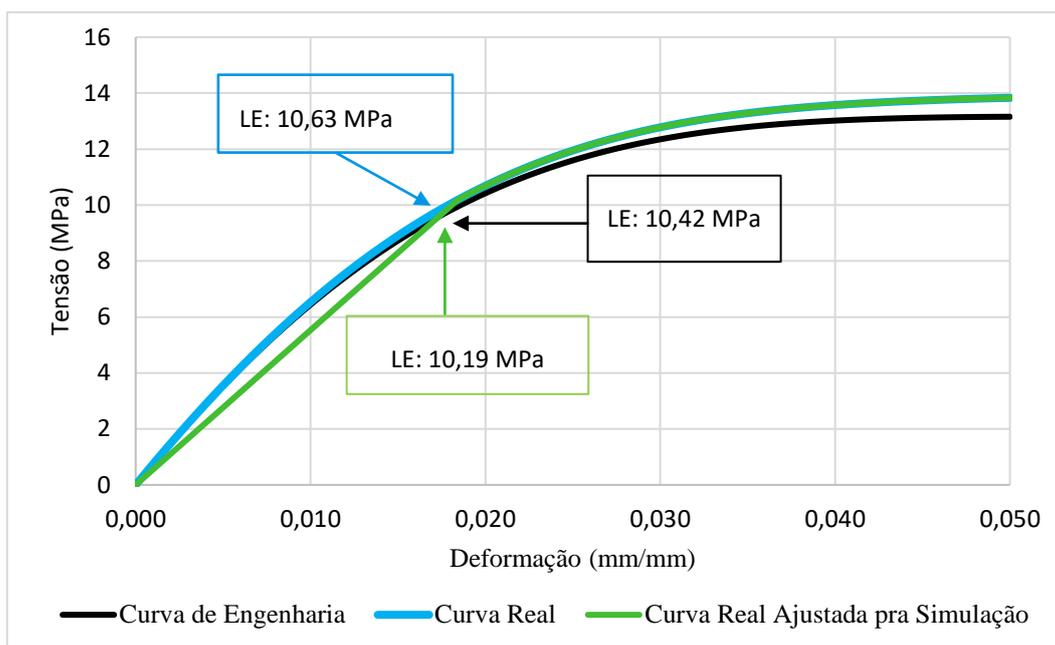
Figura 28. Curva de engenharia obtidas nos ensaios de tração Betamate 2096.



Fonte: Autoria própria.

A partir do método de cálculo descrito, foi elaborada a curva média de engenharia, apresentando um limite elástico de 10,42 MPa. Essa curva, posteriormente, foi ajustada para refletir as propriedades reais do material, resultando em um limite elástico de 10,63 MPa. Seguindo as orientações de ERHARD (2006), a curva foi novamente modificada para adequação à simulação, ajustando o limite elástico para 10,19 MPa, como mostrado na Figura 29.

Figura 29. Curva média, de engenharia e ajustada para simulação do Betamate 2096.



Fonte: Autoria própria.

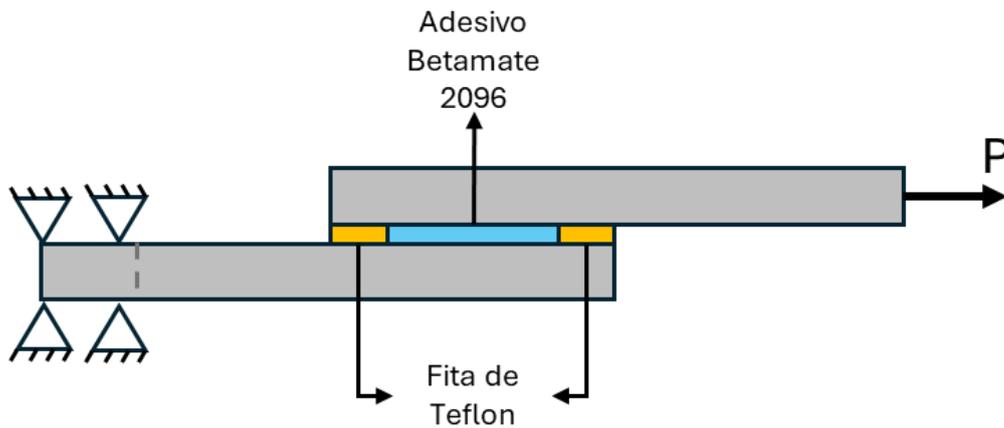
### 3.2.4.5 Avaliação do tipo de falha do adesivo

As juntas adesivadas podem falhar em três perfis distintos: i) falha adesiva que ocorre na interface entre o aderente e o adesivo, ii) a falha coesiva quando há ruptura dentro do adesivo ou de um dos aderentes e iii) falha mista caracterizada pela combinação da falha adesiva e coesiva (PETRIE, 2020).

Nesse contexto, foi realizada uma avaliação do tipo de falha do adesivo Batamate 2096 no qual foi implementado um teste de cisalhamento conforme a norma ASTM D1002-99, utilizando três corpos de prova. O material utilizado para confecção dos corpos de prova, substrato, foi uma chapa laminada de aço SAE 1010 com dimensões de 100 mm X 25 mm X 1,2 mm (comprimento x largura x espessura). Inicialmente, o material de aço foi imerso em uma solução de ácido clorídrico. Em seguida, os corpos de prova foram lixados para eliminar pontos de oxidação, utilizando uma série de lixas com diferentes granulometrias: 220, 360, 400 e 800. Posteriormente, os corpos de prova foram limpos com acetona e álcool isopropílico para remover quaisquer resíduos de sujeira e gordura antes da aplicação dos adesivos.

Para a confecção dos corpos de prova foram utilizadas fitas de politetrafluoretileno (PTFE), comumente conhecidas como Teflon, de 0,25 mm de espessura para delimitar a espessura do adesivo, as quais foram posicionadas nas extremidades das bordas de junção das chapas, conforme demonstrado na Figura 30.

Figura 30. Esquema de confecção dos corpos de prova para o teste de cisalhamento.

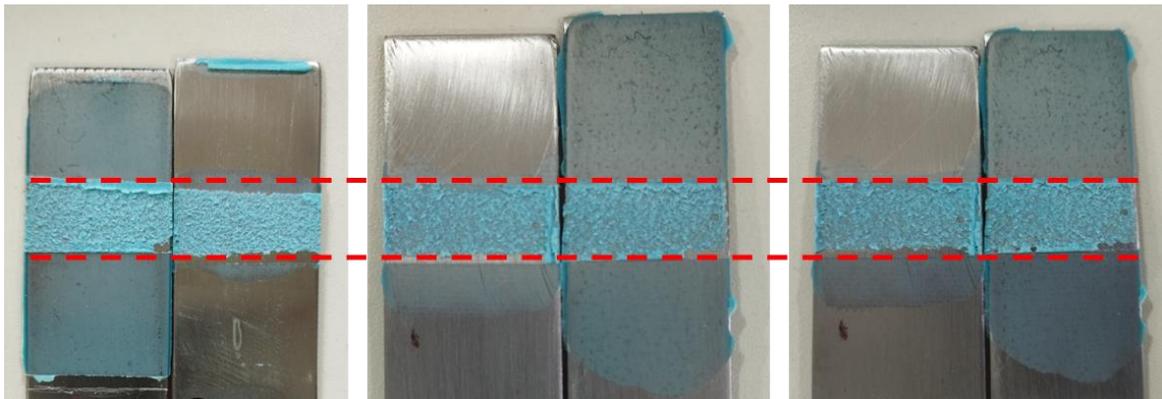


Fonte: Autoria própria.

Em seguida, após o processo de mistura manual do adesivo, o mesmo foi depositado em uma área de 25 x 12,5 mm (comprimento x largura). Foi utilizado um prendedor de papel com 5 mm de comprimento para unir o material, em seguida o material foi armazenado durante 7 dias para a cura total do adesivo a temperatura ambiente. Para a realização do teste de cisalhamento foi utilizada uma máquina de ensaio universal EMIC, modelo DL 2000 com o software para processamento de dados Tesc 2000, além de uma célula de carga de 20 kN com velocidade de 1,3 mm/min.

Os resultados dos testes demonstraram que o adesivo Betamate 2096 rompeu de forma coesiva, conforme mostrado na Figura 31, sendo este perfil de falha o mais aceitável para uma junta adesivada (PIZZI e MITTAL, 2017; SHRIVASTAVA, 2018).

Figura 31. Corpo de prova de cisalhamento.



Fonte: Autoria própria.

Este perfil de falha indica que o material teve uma boa ancoragem e que os processos de preparação do substrato conseguiram remover bem as impurezas que poderiam provocar uma falha adesiva ou mista. Reforçando que a adesão do adesivo ao substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo, este mecanismo

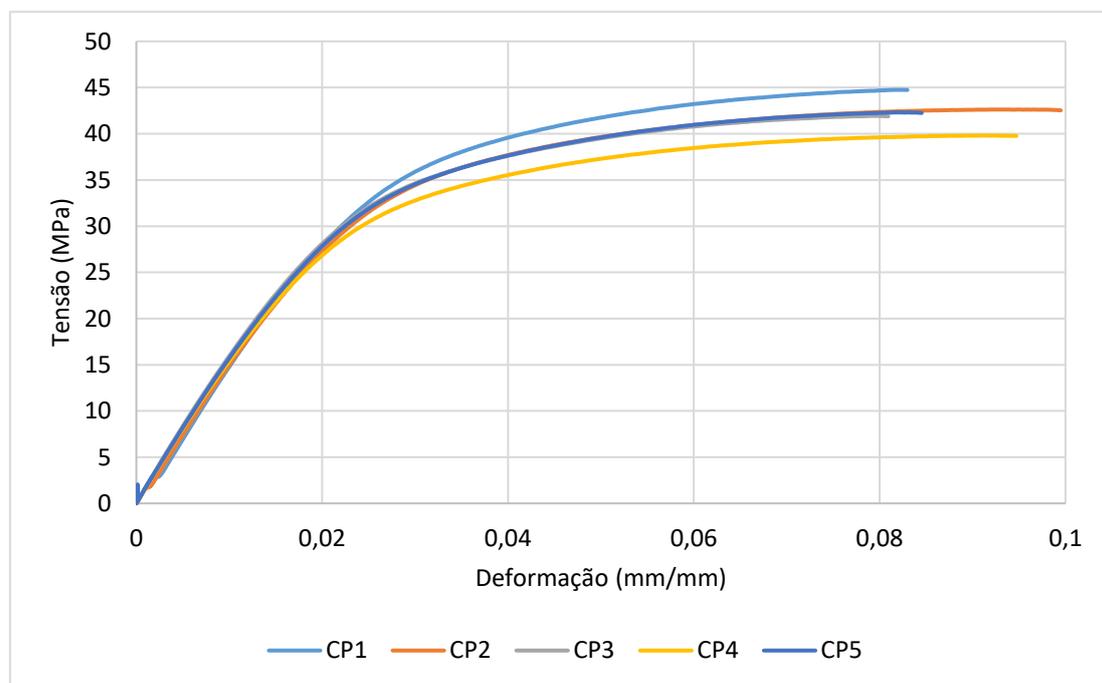
ocorre quando há uma fratura por tensão dentro do material adesivo, permitindo que uma camada de adesivo permaneça em ambos os substratos (PETRIE, 2020).

### 3.2.5 Caracterização do PA12

Os corpos de prova da geometria de média complexidade foram fabricados em HP 3D HR PA 12 W. O material selecionado para a fabricação dos elementos da estrutura em poliamida - PA12, com o código do fabricante o HP 3D HR PA 12 W. Esse polímero é um dos mais utilizados nesse tipo de tecnologia de impressão 3D (YUAN *et al*, 2019). A PA12 é um polímero semicristalino de engenharia que oferece boa processabilidade, possui um ponto de fusão relativamente alto (aproximadamente 180 °C), uma ampla janela de processamento, baixa densidade, alto alongamento na ruptura e boa resistência (ALI *et al.*, 2021; TAN; ZHU; ZHOU, 2020).

As características do material foram disponibilizadas pelo Birô de Manufatura Aditiva do SENAI CIMATEC, sendo apresentadas na Figura 32.

Figura 32. Propriedades mecânicas do PA 12.



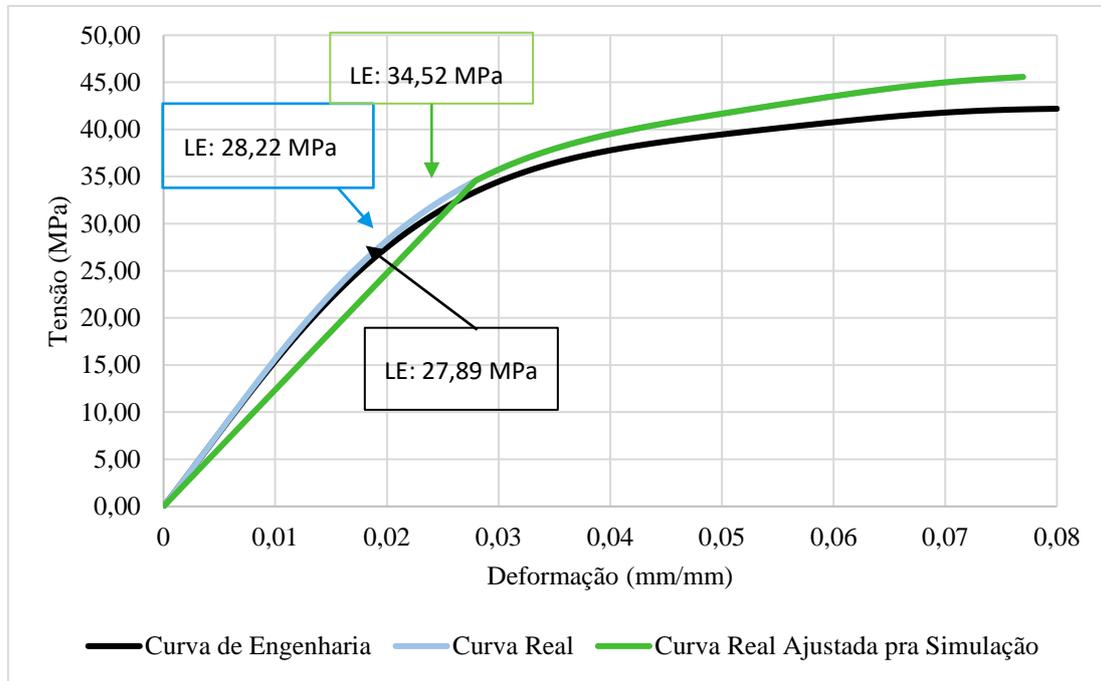
Fonte: Birô de Manufatura Aditiva do SENAI CIMATEC.

Os dados compartilhados do PA12 apresentam um limite elástico do material de 27,89 MPa, com um desvio padrão de 1,08 a uma deformação de 0,02 mm/mm, apresentando, assim, um desvio padrão considerado baixo. Após a transformação da curva de engenharia para curva real foi identificado um limite elástico para esse material de 28,22 MPa.

Em seguida foi realizado a correção da curva real para a curva de materiais plásticos, conforme proposto por Erhard (2006). Deste modo, o material apresentou um

limite elástico de 34,52 MPa, representando um incremento de aproximadamente 23% em relação à curva de engenharia conforme ilustrado na Figura 33.

Figura 33. Curva média, de engenharia e ajustada para simulação do PA 12.



Fonte: Autoria própria.

## 4 Estudo de Caso 1: Junta adesivada simples

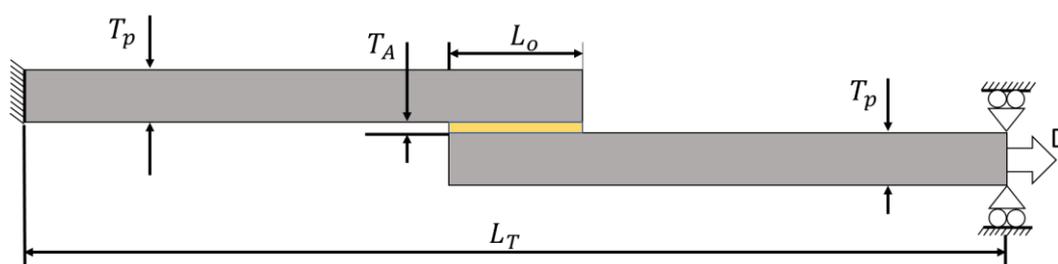
Para a implementação de simulações no software de Método Sem Malha é necessário avaliar a confiabilidade do mesmo utilizando dados disponibilizados na literatura que requer uma abordagem cuidadosa e sistemática. Primeiramente, foi verificado a qualidade e procedência dos dados, assegurando-se de que sejam representativos do caso base que se deseja simular. Em seguida, é essencial estabelecer critérios claros de validação, definindo quais métricas e resultados são considerados aceitáveis para demonstrar a precisão do software. Além disso, realizar testes de sensibilidade e robustez, explorando diferentes casos e condições de operação, podem contribuir na avaliação da capacidade do software de lidar com uma variedade de casos de aplicação. Adotando essas práticas, é possível elevar significativamente a confiabilidade e a maturidade do software de simulação, fornecendo uma base sólida para sua utilização em aplicações complexas.

### 4.1 Definição do caso base

Inicialmente, realizou-se uma pesquisa para mapear um estudo de caso do comportamento de adesivos sob carga de cisalhamento pré-existente na literatura. Nesse contexto, foi tomado como base, para uma análise comparativa entre os métodos analíticos dos Elementos Finitos e o Sem Malha, o modelo desenvolvido por Zhu e Kedward (2005), para o Departamento de Transportes dos EUA. Este estudo foca na análise de falhas em junções adesivadas, destacando-se o estudo de carregamento por cisalhamento mediante a configuração de uma junta de sobreposição simples.

Baseada em Zhu e Kedward (2005), a representação da configuração de junta considerada neste estudo caso é apresentada na Figura 34 e os parâmetros utilizados para a implementação das análises são apresentados nas Tabelas 4 e 5. O projeto da junta adesivada considera o modelo proposto na norma ASTM D1002 – “Método de ensaio normalizado para a determinação da resistência ao corte aparente de provetes metálicos ligados adesivamente por uma junta simples através de uma carga de tração (metal-metal)”.

Figura 34. Junta de sobreposição simples.



Fonte: Adaptada de Zhu e Kedward (2005)

Tabela 4. Dimensional da junta de sobreposição simples.

Cotas	Dimensional
$T_p$	1,63 mm
$T_A$	0,25 mm
$L_o$	12,70 mm
$L_T$	190,50 mm

Fonte: Adaptada de Zhu e Kedward (2005).

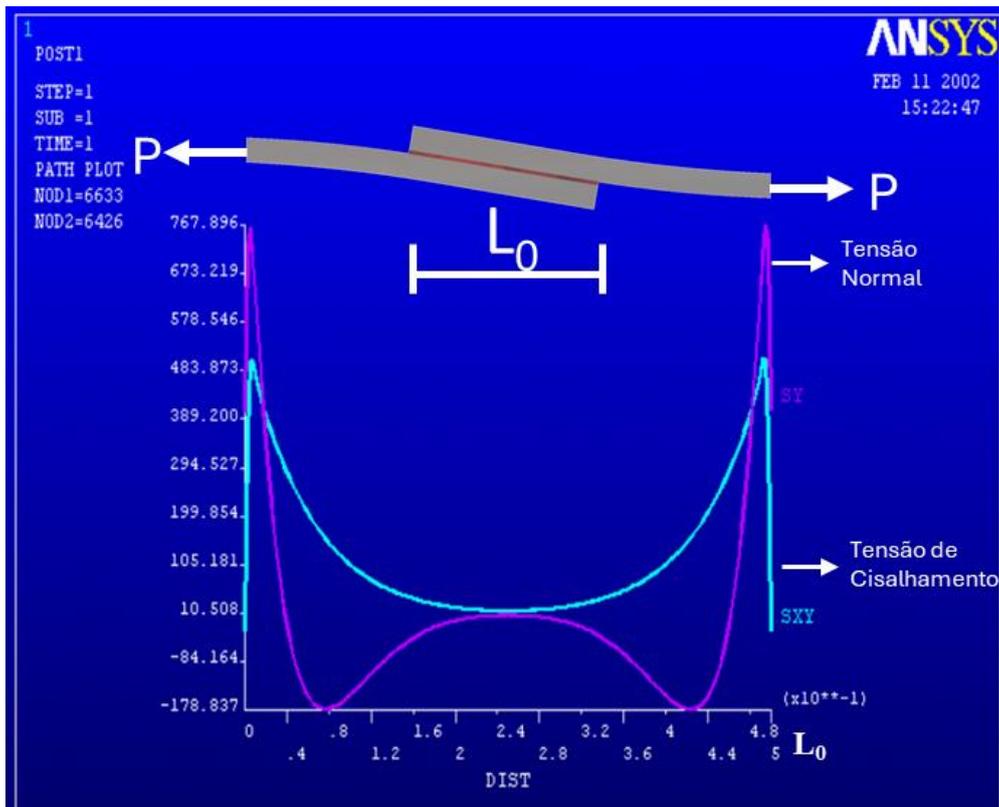
Tabela 5. Dados dos materiais utilizados pelos autores do artigo.

	Propriedades	Valor
Substrato	Modulo de elasticidade (E)	71,70 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,33
	Densidade	7.800 kg/m <sup>3</sup>
Adesivo	Modulo de elasticidade (E)	4,14 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,40
	Densidade	1.100 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Zhu e Kedward (2005).

O gráfico apresentado na Figura 35 foi desenvolvido por Zhu e Kedward (2005) utilizando o Ansys Mechanical em que foi possível verificar, na linha média do adesivo, a resposta de tensão normal (Y), indicada em azul, e a tensão de cisalhamento (XY), indicada em roxo.

Figura 35. Tensão normal e de cisalhamento da junta adesivada do artigo de referência.



Fonte: Zhu e Kedward (2005).

A partir da definição do caso base e levantamento dos dados, é executada a validação da implementação dos modelos analíticos e numéricos comparando os dados obtidos neste trabalho com os resultados por Zhu e Kedward (2005). Deste modo, para coletar com precisão os dados das curvas apresentadas pela Figura 35, utilizou-se a ferramenta WebPlotDigitizer. Este recurso possibilitou a conversão das informações contidas nas curvas em dados numéricos, além da calibragem dos eixos e a seleção cuidadosa dos pontos de dados, transformando assim as estimativas visuais em valores quantitativos precisos para análise.

#### 4.2 Validação analítica para uma junta adesivada simples

Os dados obtidos analiticamente oferecem uma base teórica sólida, que enriquece a validação do modelo, oferecendo uma visão aproximada do comportamento do adesivo. Além disso, podem ser aplicados para investigar juntas adesivadas com geometrias regulares e modelos de materiais relativamente simples, proporcionando estimativas preliminares e referências para o projeto de mais refinados como uma análise CAE (WEI *et al.*, 2024).

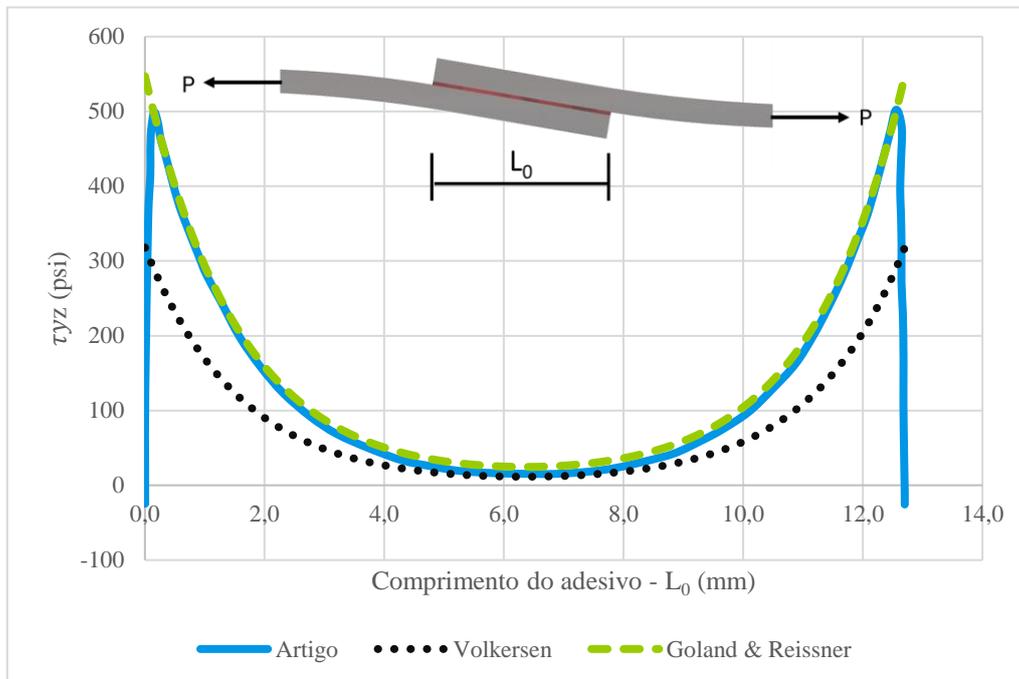
#### 4.2.1 Execução do modelo analítico

Com o auxílio do software SMath Solve foram desenvolvidos os modelos analíticos propostos por Volkersen (1938) e Goland e Reissner (1944), no qual toda a base de cálculo foi apresentada nos Capítulos 2.1.2 e 2.1.3, respectivamente. Ambos os modelos, apesar de possuírem limitações, trazem uma visão geral sobre o comportamento do adesivo. Todas as etapas do cálculo estão descritas no Apêndice A.

#### 4.2.2 Resultados da validação do método analítico para geometria simples

A Figura 36 apresenta a comparação entre as curvas de tensão cisalhante apresentada por Zhu e Kedward (2005) e obtidas pela aplicação dos modelos propostos por Volkersen (1938) e Goland e Reissner (1944).

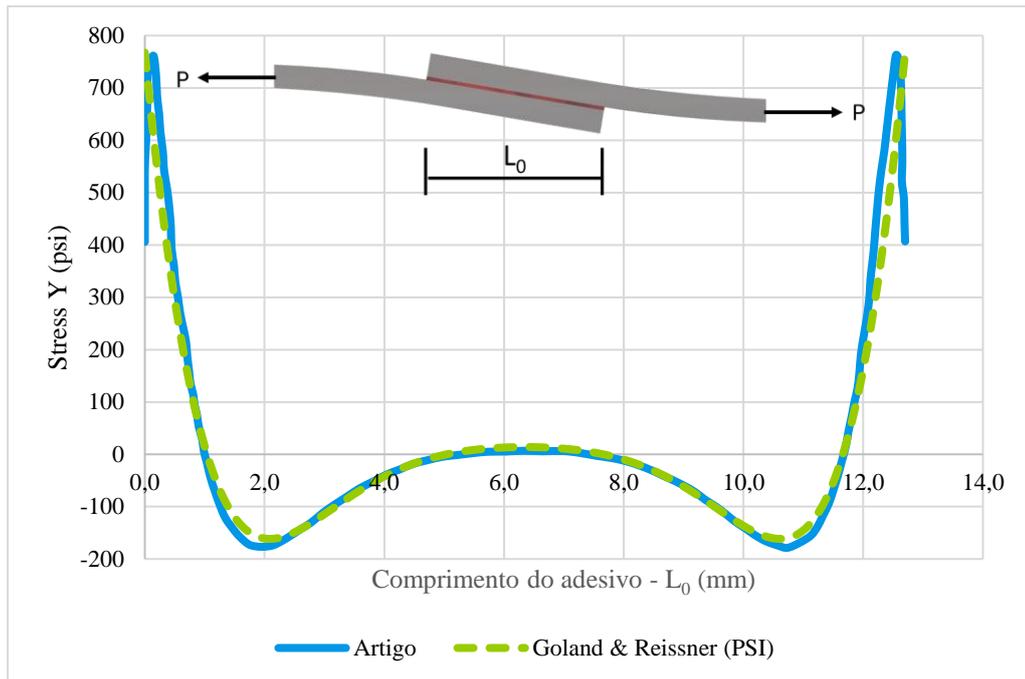
Figura 36. Curvas de tensão cisalhante: modelos analítico e de Zhu e Kedward (2005).



Fonte: Autoria própria.

A Figura 37, apresenta a comparação entre as curvas de tensão normal apresentada por Zhu e Kedward (2005) e obtidas pela aplicação do modelo proposto por Goland e Reissner (1944).

Figura 37. Curvas de tensão normal: modelos analítico e de Zhu e Kedward (2005).



Fonte: Autoria própria.

De acordo com a análise do gráfico de tensão normal, notou-se que o comportamento geral do adesivo apresentado por Zhu e Kedward (2005) e o modelo analítico proposto por Goland e Reissner (1944) se assemelham. No entanto, é possível notar que mesmo que o modelo de Goland e Reissner (1944) tenha uma proximidade elevada com a curva azul, ainda há efeitos de variações de tensão que não são capturados na região das bordas do adesivo.

### 4.3 Aplicação do MEF para uma junta adesivada simples

Para aplicação do Método dos Elementos Finitos (MEF), uma geometria tridimensional foi modelada em um software de CAD, seguindo as dimensões especificadas no Capítulo 4.1, importada para o software de Elementos Finitos e desenvolvida uma análise linear estática.

#### 4.3.1 Parâmetros e execução da simulação em MEF

Após a importação da geometria tridimensional, com simetria correspondente a metade da largura, foi feita a atribuição das propriedades dos materiais do substrato e do adesivo. Em seguida, foram definidas as condições de contato entre as geometrias e as condições de contorno, incluindo restrições de deslocamento e aplicação de forças, além da criação de uma linha na posição média do adesivo para avaliar as tensões de cisalhamento ( $\tau$ ) e tensão normal ( $\alpha$ ). A malha estruturada utilizada foi do tipo hexaédrica, caracterizada por elementos com geometria cúbica, implementada através do recurso de malha *multizone*. Esse recurso se mostrou ideal devido à análise envolver

diferentes materiais e regiões com detalhes finos, onde uma malha uniforme poderia não ser a mais adequada. Adicionalmente, para graduar o tamanho dos elementos conforme sua proximidade com a linha média do adesivo, o recurso "*Bias Type*" foi configurado com fator de cinco vezes, permitindo obter valores mais precisos na região de interesse.

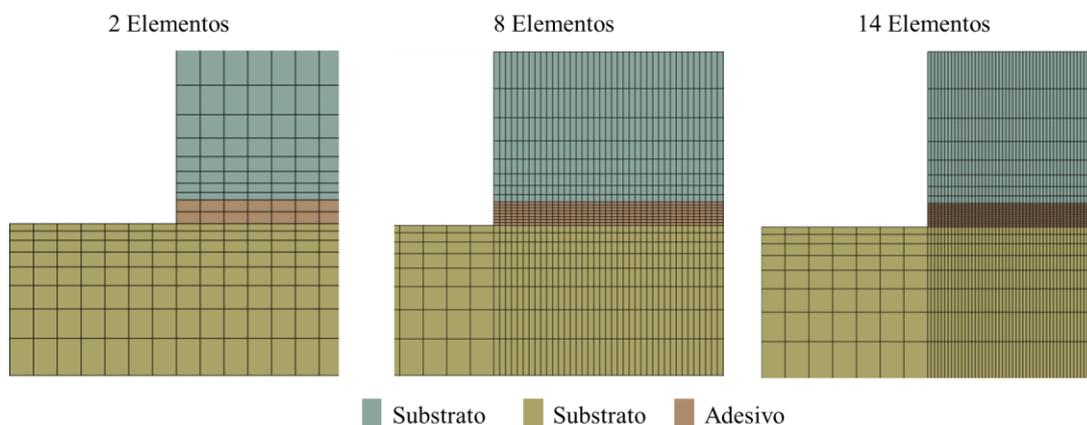
Após a definição desses parâmetros, realizou-se uma análise para determinar a quantidade ideal de elementos na região de interesse. Foram conduzidas análises subsequentes, variando a quantidade de elementos na altura do adesivo de 2 em 2, até o valor máximo de 14 elementos, o que possibilitou a avaliação da convergência dos valores máximos e mínimos detectados na linha média do adesivo.

Por fim, foram comparados os comportamentos do modelo desenvolvido por Zhu e Kedward (2005) e do modelo construído utilizando o MEF para verificar a convergência dos dados.

#### 4.3.2 Resultados da validação da simulação em Elementos Finitos

A avaliação de convergência da malha empregando o Método de Elementos Finitos foi desenvolvida nas regiões de linha média do adesivo considerando os valores de tensão máxima de cisalhamento e normal, como mostrado na Figura 38. A análise em questão foi conduzida de forma a garantir que o refinamento da malha em Elementos Finitos atenda à condição de uma razão de aspecto de até 5.

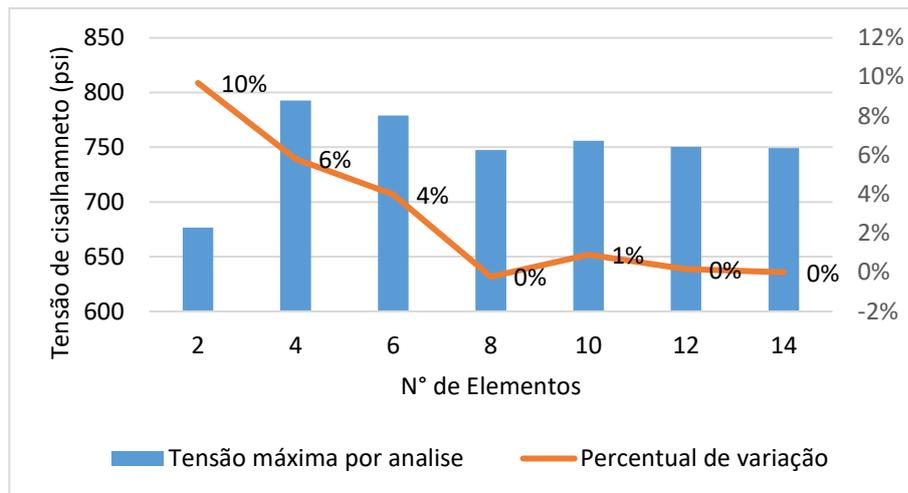
Figura 38. Demonstração do teste de convergência de malha.



Fonte: Autoria própria.

Foi constatado que há uma convergência satisfatória ao utilizar uma malha composta por 8 elementos na espessura do adesivo, conforme ilustrado nas Figuras 39 e 40. A malha com dois elementos apresentou uma tensão normal máxima (Figura 39) inferior à observada nas malhas com um maior número de elementos, o que resultou em uma maior divergência em relação ao valor de tensão normal obtido na análise com quatorze elementos na espessura do adesivo.

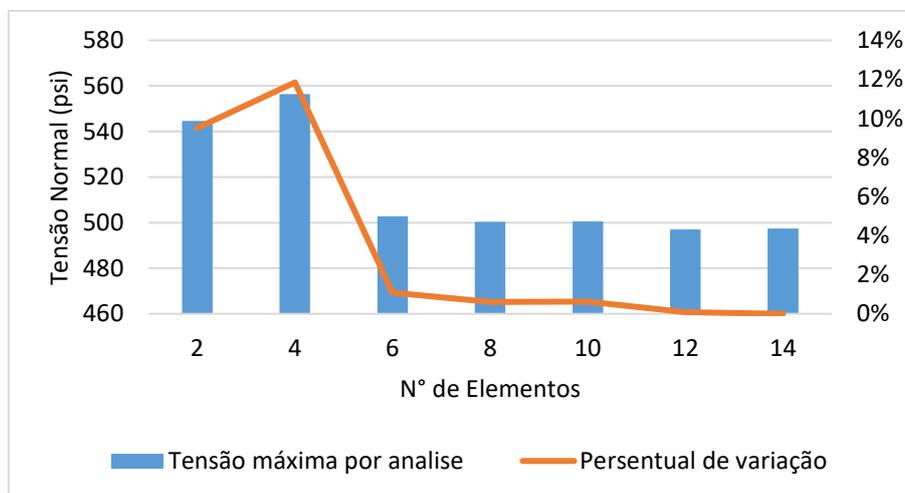
Figura 39. Convergência de malha do MEF para tensão de cisalhamento.



Fonte: Autoria própria.

A convergência de malha analisa para as tensões de cisalhamento demonstraram que as simulações com dois e quatro elementos na espessura do adesivo apresentaram um percentual de divergência maior com relação a análise com quatorze elementos na espessura do adesivo.

Figura 40. Convergência de malha do MEF para tensão normal.

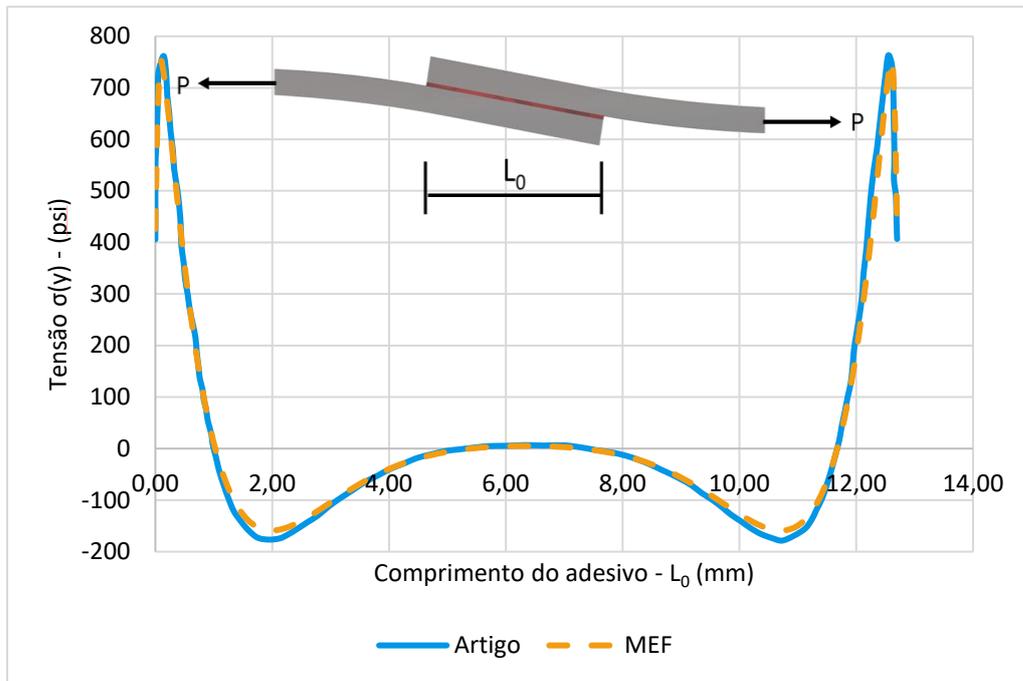


Fonte: Autoria própria.

A malha de oito elementos demonstrou um comportamento de tensão normal e de cisalhamento semelhante ao das malhas com um número maior de elementos, indicando uma variação percentual próxima de zero em relação à análise com 14 elementos, sem exigir maior capacidade computacional, como é necessário para malhas com um número maior de elementos.

Adotando os parâmetros de malha conforme indicado no Capítulo 4.3.1 foi considerado a utilização de oito elementos na espessura do adesivo, obteve-se uma malha com um total de 936.000 elementos. Ao observar o gráfico de tensão de cisalhamento é notado um comportamento muito semelhante entre os dois modelos para tensão normal, como visto na Figura 41.

Figura 41. Comparação de tensões normais: Zhu e Kedward (2005) vs. MEF.

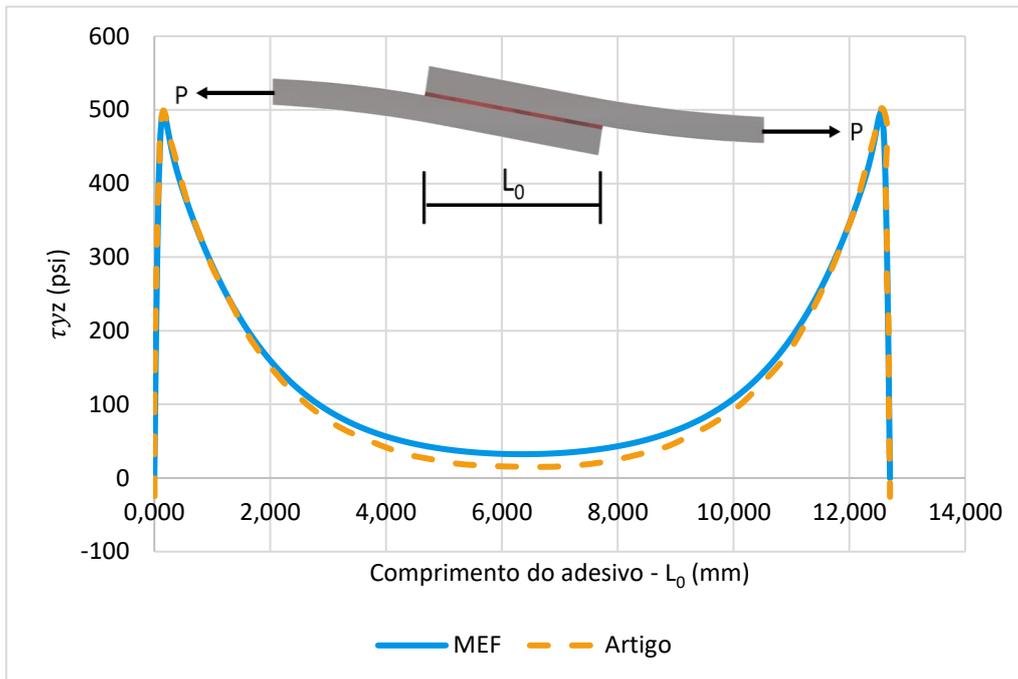


Fonte: Autoria própria.

Com base em uma observação visual do comportamento das tensões demonstradas na Figura 41 foi possível perceber que o modelo desenvolvido no software de Elementos Finitos possui um comportamento muito próximo ao artigo de referência. Foi notado apenas um pequeno distanciamento dos valores de tensões ao se aproximar dos valores mínimos de tensão.

O comportamento das tensões de cisalhamento também se assemelha, como visto na Figura 42, no qual foi observado um pequeno distanciamento das curvas de tensões de cisalhamento na região central do gráfico.

Figura 42. Comparação de tensões de cisalhamento: Zhu e Kedward (2005) vs. MEF.



Fonte: Autoria própria.

#### 4.4 Aplicação do MSM para uma junta adesivada simples

De modo similar ao que foi realizado com o MEF, inicialmente foi feita a importação da geometria, inserção das propriedades dos materiais, seguida pela definição das condições de contato entre as geometrias e as condições de contorno, incluindo restrições de deslocamento e aplicação de forças.

Apesar do software de simulação do Método Sem Malha possuir alguns parâmetros que auxiliam em uma melhor distribuição de pontos ao longo da geometria da peça, não foi identificado na literatura trabalhos que apresentem testes de sensibilidade para analisar os ganhos de precisão das simulações utilizando MSM. Portanto, foi proposta uma estratégia comparativa para testar os parâmetros e analisar os resultados do caso base e da simulação utilizando o MSM.

##### 4.4.1 Parâmetros e execução da simulação em MSM

Para obter a melhor resolução dos resultados esperados foi necessário testar os parâmetros intrínsecos ao software da seguinte forma:

Teste 1: *Adapt for Stiffness* - A Altair recomenda este recurso para previsão do fluxo de carga, análise modal e análise térmica. Utiliza três passes adaptativos, sendo geralmente o método de solução mais ágil. Contudo, o desenvolvedor do software aponta limitação com sólidos finos;

Teste 2: *Adapt for Stress* - Indicado para análise geral de tensões, este método emprega quatro passagens adaptáveis e ativa lógicas adicionais para um refinamento mais preciso em áreas de alta tensão. É apropriado para sólidos finos;

Teste 3: Customizado com sete passes e nível de refinamento alto - Recomendado para aprimorar a precisão em toda a montagem, serve como um controle principal para intensificar o refinamento da solução;

Teste 4: Customizado com sete passes, nível de refinamento alto e opção de se adaptar aos *features* da peça - De maneira análoga ao Teste 3, acrescenta-se a capacidade de adaptabilidade agressiva para áreas com gradientes de tensão em características locais. É aplicável exclusivamente à estática estrutural;

Teste 5: Customizado com sete passes, nível de refinamento alto e a opção de se adaptar a sólidos finos - De forma similar ao Teste 3, introduz-se a habilidade de alcançar maior precisão em seções finas;

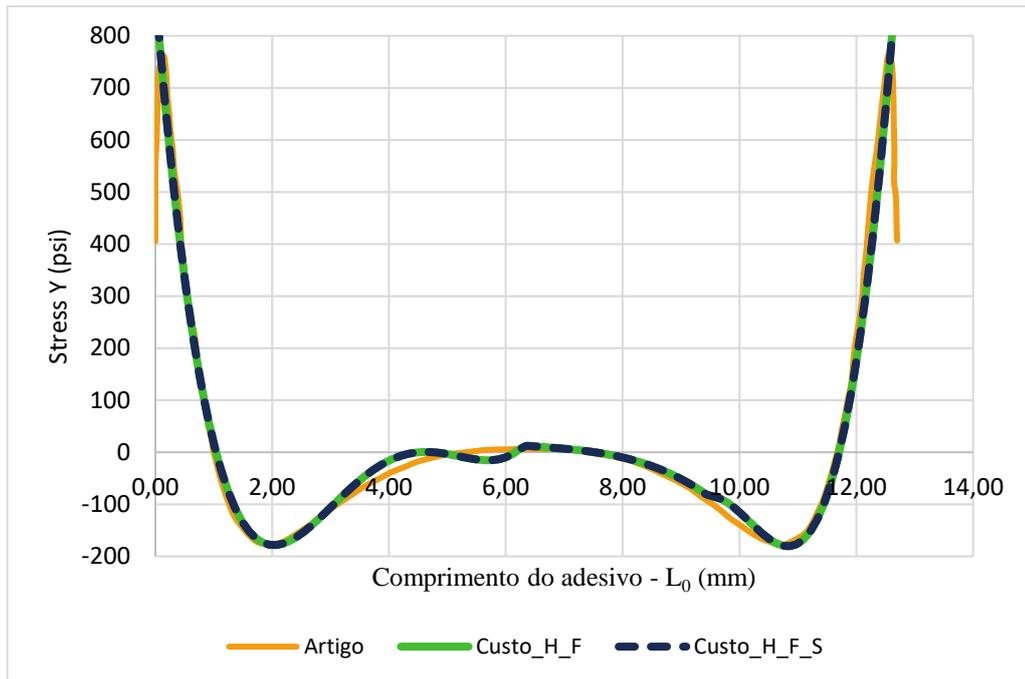
Teste 6: Customizado com sete passes, nível de refinamento alto e com as opções de se adaptar aos *features* da peça e sólidos finos.

Todas as condições de teste foram comparadas com os dados do caso base e com os resultados obtidos pela análise em MEF. Após determinar a condição de uso mais eficaz, conduziu-se uma nova série de testes para verificar a convergência dos resultados conforme o número de passes. Para tanto, estabeleceram-se os parâmetros ótimos identificados no teste anterior, prosseguindo com a validação do número de passes variando de 2 a 7. Por fim, foi proposta a criação de gráficos para comparar as respostas de cada parâmetro de controle com os dados obtidos pelos autores Zhu e Kedward (2005).

#### **4.4.2 Resultados da validação da simulação em MSM**

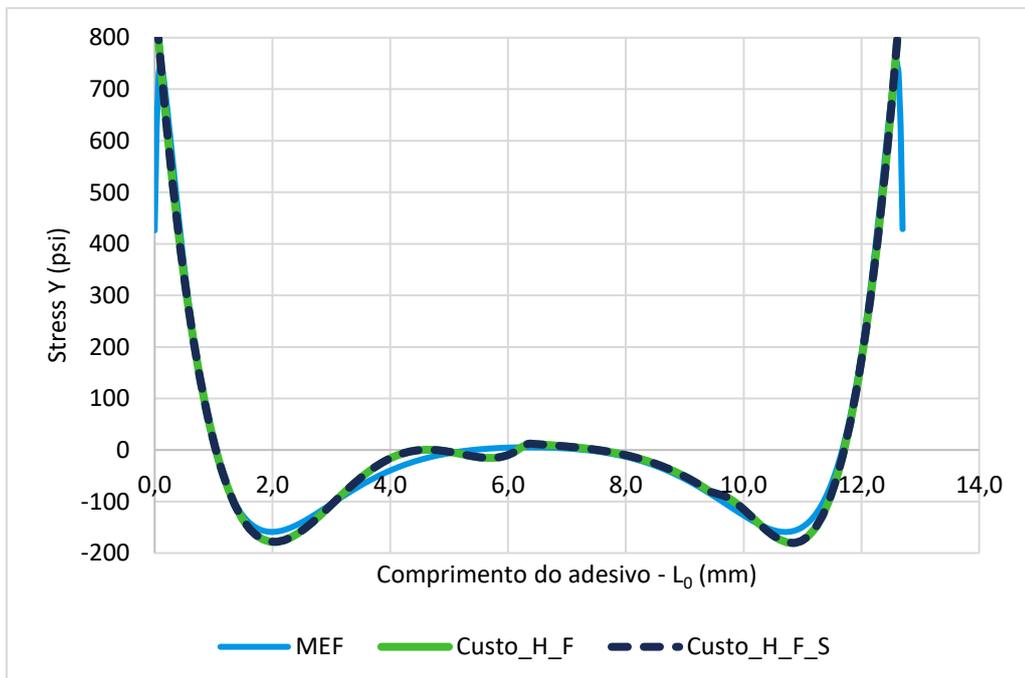
Os dados obtidos através das simulações utilizando o software de Método Sem Malha indicaram que, para as curvas traçadas ao longo da linha média do adesivo, as simulações que empregaram configurações de customização aplicando 7 passos e um alto nível de refinamento, além de adotarem funcionalidades de adaptação ao *features* das peças, tanto para opções de sólidos finos habilitadas quanto desabilitadas, apresentaram resultados consistentes quando comparado com caso base e o software de Elementos Finitos, conforme ilustrado nas Figuras 43 a 46. Onde Custo\_H\_F representa as opções de customização com 7 passes, alto nível de refinamento e a opção de adaptar a sólidos finos, e Custo\_H\_F\_S representa a opção customização com 7 passes, alto nível de refinamento e a opção de adaptar ao *features* da peça e considerar sólidos finos.

Figura 43. Comparação de tensões normais: Zhu e Kedward (2005) vs. MSM.



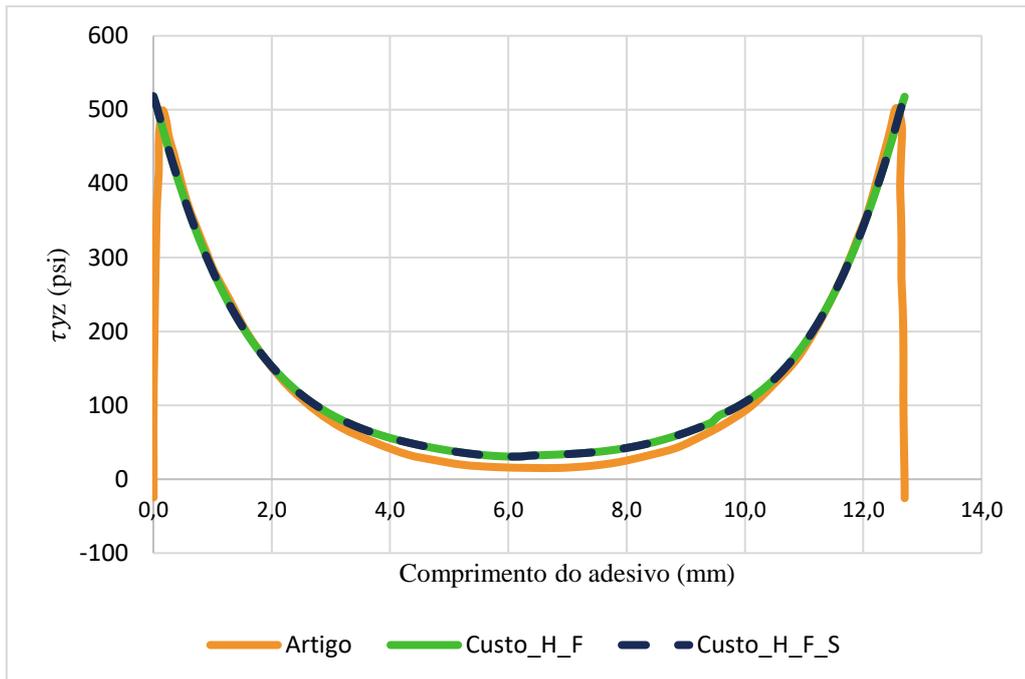
Fonte: Autoria própria.

Figura 44. Comparação de tensões normais: MEF vs. MSM.



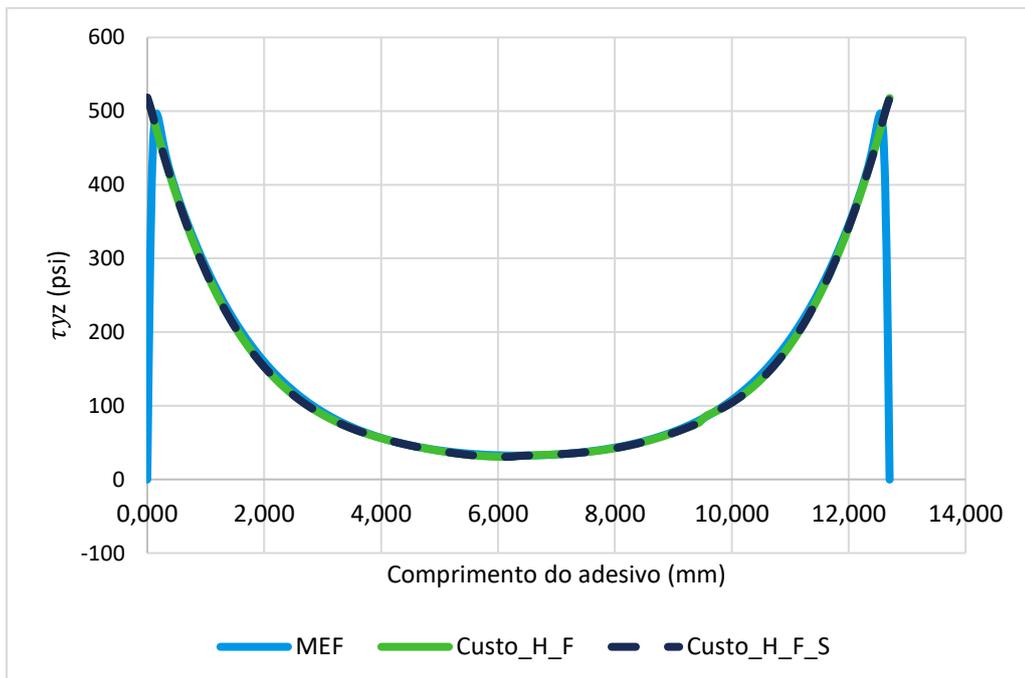
Fonte: Autoria própria.

Figura 45. Comparação de tensões de cisalhamento: Zhu e Kedward (2005) vs. MSM.



Fonte: Autoria própria.

Figura 46. Comparação de tensões de cisalhamento: MEF vs. MSM.



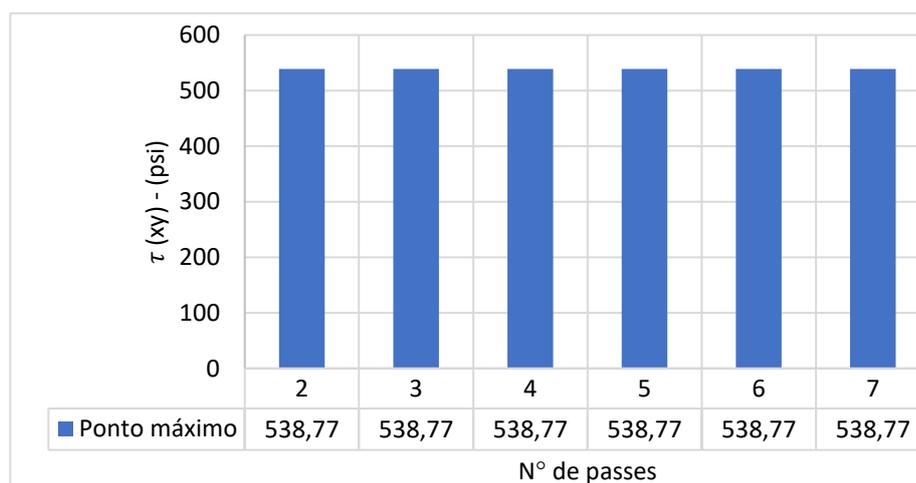
Fonte: Autoria própria.

A partir da análise das curvas de tensão normal, Figura 43 e Figura 44, foram observados dois fenômenos relevantes: i) uma ligeira mudança na trajetória da curva gerada pelo MSM próximo aos pontos de 4 a 6 mm ao longo do adesivo, possivelmente

devido a discretização da nuvem de pontos que pode introduzir distorções devido à interação entre subdomínios adjacentes, e ii) a desconsideração do aumento rápido das tensões nas extremidades da ligação, fenômeno evidenciado nas curvas tanto do artigo quanto do software de Elementos Finitos, mas ausente nos resultados fornecidos pelo software de Método Sem Malha . Este fato indica que o software, ao operar com a metodologia de MSM, tende a exibir valores de tensão superiores aos reais ao prever tensões de arrancamento da junta, sugerindo assim, uma abordagem mais conservadora na análise. Ao analisar os gráficos de tensão de cisalhamento, quase todas as curvas tiveram uma resposta com baixa distorção quando comparado com os dados obtidos por Zhu e Kedward (2005) e do MEF. As curvas dos demais parâmetros analisados nos testes desenvolvidos no software de Método Sem Malha são apresentados no Apêndice B.

A análise realizada com o MSM para verificar a convergência relativa ao número de passes, mostrado na Figura 47, indica que para esta aplicação específica a variação no número de passagens não resultou em mudanças significativas nos pontos de tensão de cisalhamento máxima e na região central do comprimento do adesivo. Este fato sugere que o modelo de discretização adotado é suficientemente confiável para capturar as características essenciais do comportamento desse tipo de junta adesivada sem necessidade de refinamento adicional nas iterações. Além disso, a independência do resultado em relação ao número de passes facilita a otimização do processo de simulação, economizando tempo e recursos computacionais sem comprometer a precisão.

Figura 47. Teste de convergência: n° de passes x a tensão de cisalhamento máxima.



Fonte: Autoria própria.

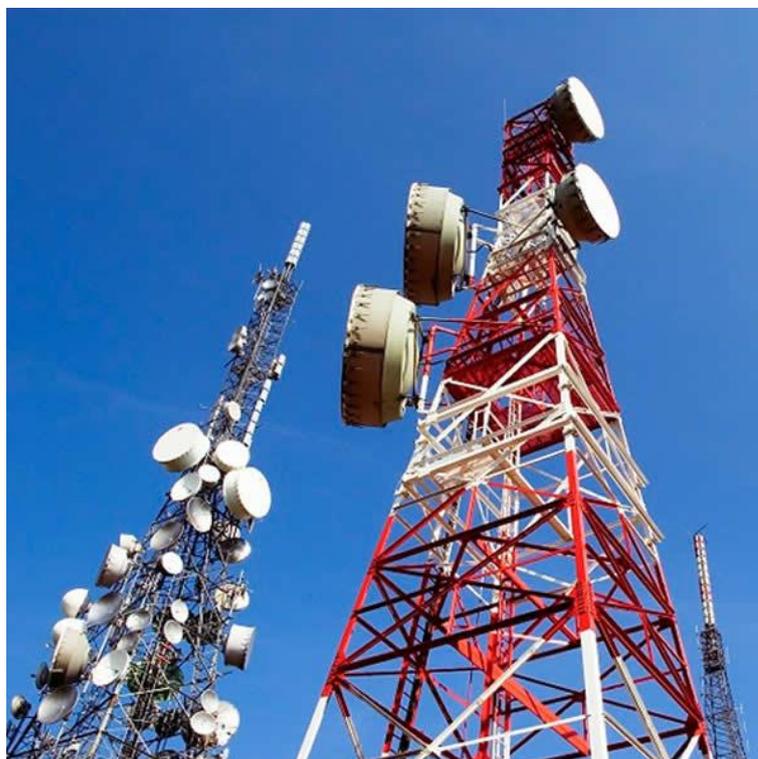
## 5 Estudo de Caso 2: Geometria com média complexidade

Elevar o nível de maturidade por meio da simulação de modelos com média complexidade proporciona a captura de detalhes específicos sem onerar recursos computacionais e tempo de execução. Esta etapa envolve a identificação cuidadosa dos parâmetros mais relevantes dos softwares e a calibração precisa do modelo com dados experimentais ou referências confiáveis. Ao focar na simulação de modelos de complexidade média com essas diretrizes, pode-se obter um avanço notável na análise e no entendimento de sistemas complexos, fundamentando decisões com maior segurança.

Nesse contexto, nesta etapa foi definida uma geometria de média complexidade com objetivo de facilitar a avaliação do comportamento da junta adesiva através da comparação entre os resultados obtidos pela aplicação dos métodos numéricos e os dados reais. Posteriormente, o modelo foi desenvolvido e submetido a simulações utilizando os MEF e MSM, aplicando os parâmetros previamente estabelecidos.

Neste estudo, a geometria adotada é inspirada em torres treliçadas, constituídas por barras interligadas em forma de triângulos, proporcionando excepcional estabilidade estrutural e eficácia na distribuição de cargas, esse tipo de estrutura é muito utilizado em torres de comunicação (LAGAROS; KARLAFTIS, 2016; LIU *et al.*, 2022), como ilustrado na Figura 48.

*Figura 48. Torre de telecomunicação.*



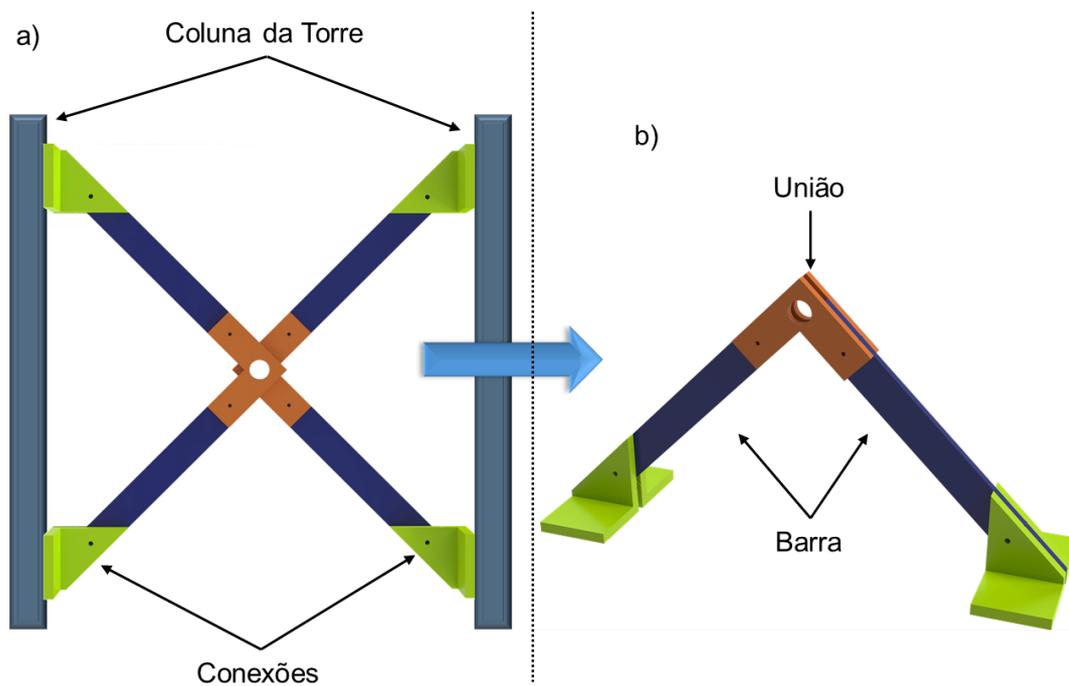
*Fonte: Ágoris (2024).*

Sua geometria permite não apenas uma grande resistência contra forças de compressão e tração, mas também uma otimização no uso do material, tornando a estrutura leve, porém robusta (MURTY, 2002). No entanto, a maioria das uniões das barras metálicas é realizada por meio de soldagem ou por parafusos, dependendo das especificações e requisitos do projeto da torre, indicando a possibilidade do uso de adesivos estruturais nesse tipo de estrutura.

### 5.1 Definição da geometria de média complexidade

O modelo proposto é composto por uma estrutura de barras unidas através de adesivos estruturais, como demonstrado na Figura 49. A imagem à esquerda (a) mostra a montagem completa constituída por duas colunas laterais da torre (azul claro), as barras diagonais responsáveis pela transmissão de esforços (azul escuro), os elementos de conexão entre as colunas e as barras (verde) e as uniões entre barras (laranja). Para esse estudo de caso, serão desenvolvidas simulações em MEF e MSM, além dos testes experimentais da geometria da estrutura representada na imagem à direita (b) da Figura 49, denominado corpo de prova da estrutura adesivada.

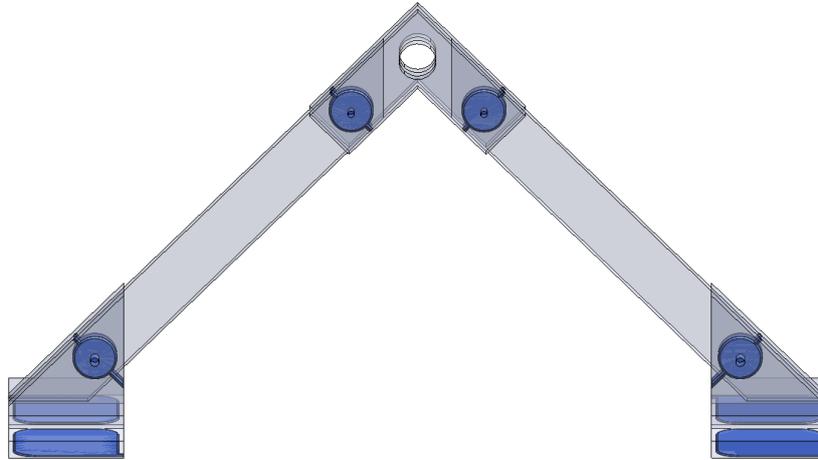
Figura 49. Modelo com geometria com média complexidade.



Fonte: Autoria própria.

A partir da Figura 49 (b), foi elaborada a Figura 50, que indica as regiões adesivadas as quais são os pontos de interesse deste estudo de caso.

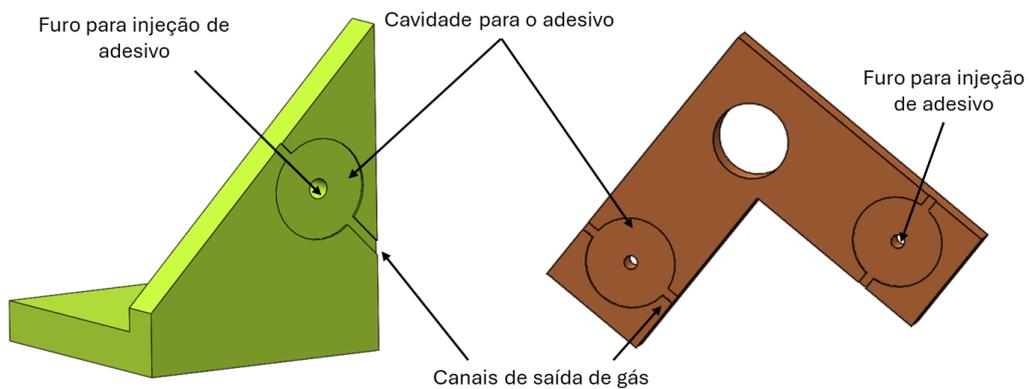
Figura 50. Indicação das regiões adesivadas.



Fonte: Autoria própria.

As peças projetadas possuem uma cavidade de 10 mm de diâmetro e profundidade de  $0,2 \pm 0,08$  mm para alojar o adesivo. Adicionalmente, cada peça foi projetada com um orifício para viabilizar a injeção do adesivo usando uma agulha de 1,8 mm, além de canais para permitir a saída de ar e o excesso do adesivo, como mostrado na Figura 51.

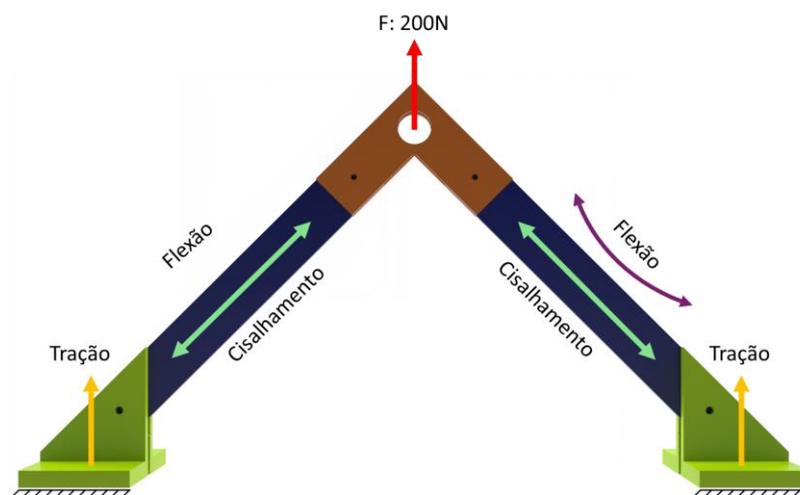
Figura 51. Desing das peças: Uniões e Conexões.



Fonte: Autoria própria.

Desta forma, ao aplicar uma força na região do furo as juntas adesivadas foram submetidas a carregamentos de tração, cisalhamento, flexão e torção, como mostrado na Figura 52.

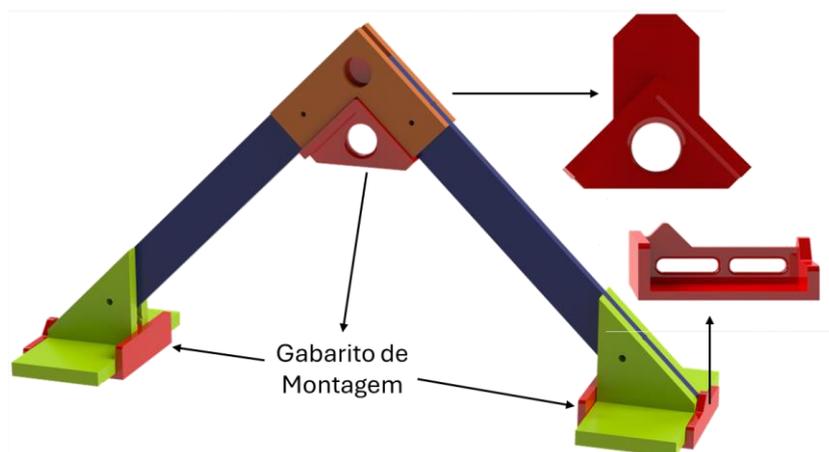
Figura 52. Diagrama de corpo livre da geometria com média complexidade.



Fonte: Autoria própria.

Para garantir uma precisão no alinhamento dos componentes foram desenvolvidos dois gabaritos de montagem, conforme demonstrado na Figura 53.

Figura 53. Gabarito de montagem para corpos de prova de geometria média.



Fonte: Autoria própria.

## 5.2 Estudo Experimental - Teste de tração

Esta fase envolveu a fabricação e o teste de cinco corpos de prova da estrutura física, comparando os resultados de deslocamento obtidos com os modelos simulados, permitindo, dessa forma, aferir o erro associado a cada método empregado. Nesta seção são detalhados os aspectos experimentais, incluindo os materiais utilizados, os métodos empregados para a produção dos corpos de prova da estrutura adesivada, e os ensaios realizados para determinar as propriedades mecânicas do adesivo.

O processo de fabricação dos corpos de prova da estrutura de barra adotado foi por Manufatura Aditiva (MA) devido à possibilidade de gerar peças pequenas e lotes limitados de forma ágil, ideal para prototipagem rápida. As cavidades projetadas facilitam o processo de deposição do adesivo e asseguram a espessura recomendada pelo fabricante, simplificando a montagem dos componentes. Para a produção das peças, utilizou-se a máquina HP Jet Fusion 5210 3D, que opera depositando agentes de fusão sobre um leito de material em pó e, em seguida, fundindo-os para formar uma camada sólida.

### 5.2.1 Montagem e teste dos corpos de prova da estrutura adesivada

O procedimento de montagem dos cinco corpos de prova iniciou-se com a limpeza dos componentes fabricados em MA da região destinada à adesão utilizando papel embebido em acetona para limpar as superfícies que entrariam em contato com o adesivo. O procedimento realizado é similar ao adotado na preparação descrito nos Capítulos 3.2.4.1 e 3.2.4.5, no entanto os corpos de prova não foram submetidos a estufa visto que a transição vítrea do PA12 é inferior a 60 °C. Utilizando gabaritos, as peças foram alinhadas e fixadas juntas com prendedores de papel de 15 mm, como demonstrado na Figura 54.

*Figura 54. Fixação das peças durante etapa de cura do adesivo*



*Fonte: Autoria própria.*

Para a base de suporte da estrutura, utilizou-se uma placa de aço A36 com dimensões de 200 x 200 x 10 mm (comprimento x largura x espessura), a qual foi devidamente fixada à máquina onde os corpos de prova foram testados. Esta base foi utilizada somente durante o ensaio, não sendo considerada nas simulações do comportamento do conjunto testado. A placa de aço foi preparada com o Bristle Blaster da Monti Power, que através de suas cerdas de aço em movimento rotativo, limpa e texturiza a superfície de maneira semelhante ao jateamento. Em seguida, a placa foi

devidamente limpa com papel embebido com acetona e colocadas em uma estufa a aproximadamente 60 °C por 10 minutos para eliminar a umidade.

Após as placas de aço alcançarem a temperatura ambiente, os ingredientes do Betamate 2096 foram misturados manualmente e colocados em uma seringa de 5 ml acoplada com uma agulha de 1,8 mm de diâmetro, conforme apresentado na Figura 55. Desta forma, o adesivo foi injetado nas cavidades dos corpos de prova.

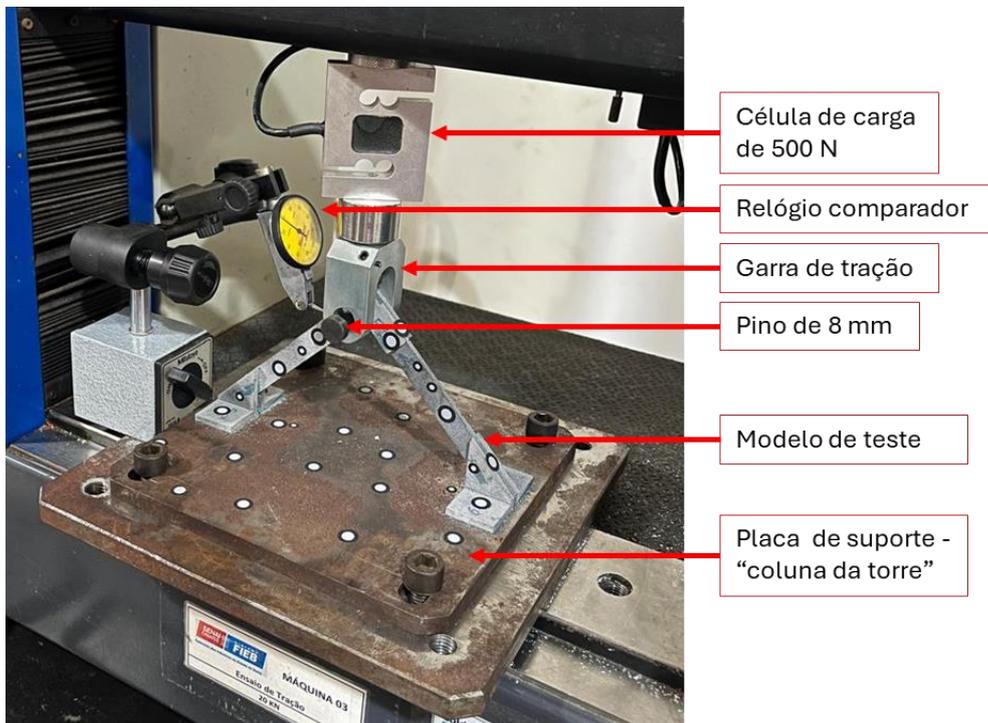
Figura 55. Seringa utilizada para injetar o adesivo nas cavidades das peças.



Fonte: Autoria própria.

Depois da etapa de cura, que teve um tempo mínimo de duração de 7 dias, seguindo a indicação do fabricante, a placa de suporte foi fixada à máquina de ensaios de tração, modelo EMIC DL 2000, que estava equipada com uma célula de carga de 500 N. Um pino de aço de 8 mm foi usado para ligar o orifício presente no corpo de prova da estrutura adesivada à garra da máquina. A montagem desse conjunto de componentes pode ser vista na Figura 56.

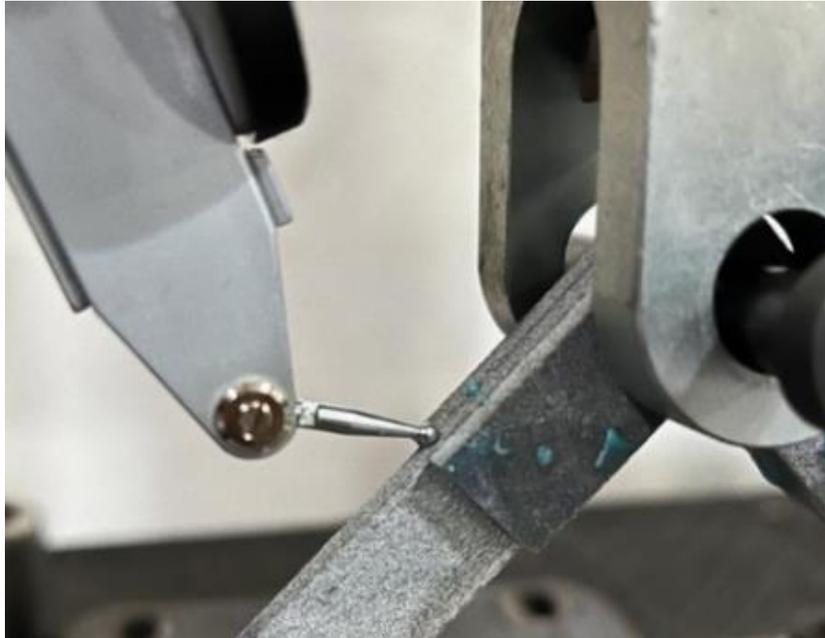
Figura 56. Montagem do aparato de teste.



Fonte: Autoria própria.

Adicionalmente, foi definido um ponto de controle, conforme indicado na Figura 57, para posicionar a ponta do relógio comparador, que tem uma capacidade de 0,2 mm e resolução de 0,002 mm, que foi utilizado para medir o deslocamento vertical da estrutura durante o teste.

*Figura 57. Ponto de controle para realizar as medidas de deslocamento vertical.*



*Fonte: Autoria própria.*

O teste de deslocamento foi realizado em duas etapas: inicialmente com uma carga de 100 N e posteriormente com 200 N. Essa etapa foi necessária, visto que a capacidade do relógio comparador é inferior ao deslocamento total observado na estrutura. Dessa forma, o teste foi interrompido com a carga de tração de 100 N para reajustar o relógio comparador a zero e, em seguida, retomar o ensaio a partir da carga de 100 N até os 200 N. Ao fim de cada aferição, os valores foram somados, resultando no deslocamento total por medida. Para assegurar resultados mais representativos, cada ensaio de carga foi repetido dez vezes, proporcionando uma base estatística adequada, visto que essa repetitividade fornece uma amostra suficientemente grande para reduzir a influência de valores atípicos e verificar se está havendo um plastificação dos corpos de prova. Em seguida, os dados do relógio comparador foram tratados e comparados com os dados das simulações.

### **5.2.2 Tratamento dos dados de deslocamento da estrutura**

Os resultados de deslocamento do ponto de controle para cada corpo de prova estão indicados na Tabela 6.

Tabela 6. Medidas de deslocamento dos corpos de prova da estrutura adesivada no ponto de controle.

<i>Dados dos testes</i>	<i>CP 1 (mm)</i>	<i>CP 2 (mm)</i>	<i>CP 3 (mm)</i>	<i>CP 4 (mm)</i>	<i>CP 5 (mm)</i>
<i>Medida 1</i>	<i>0,318</i>	<i>0,346</i>	<i>0,310</i>	<i>0,320</i>	<i>0,300</i>
<i>Medida 2</i>	<i>0,312</i>	<i>0,338</i>	<i>0,310</i>	<i>0,324</i>	<i>0,310</i>
<i>Medida 3</i>	<i>0,320</i>	<i>0,358</i>	<i>0,312</i>	<i>0,320</i>	<i>0,300</i>
<i>Medida 4</i>	<i>0,328</i>	<i>0,350</i>	<i>0,328</i>	<i>0,310</i>	<i>0,300</i>
<i>Medida 5</i>	<i>0,320</i>	<i>0,332</i>	<i>0,326</i>	<i>0,328</i>	<i>0,304</i>
<i>Medida 6</i>	<i>0,316</i>	<i>0,350</i>	<i>0,310</i>	<i>0,318</i>	<i>0,304</i>
<i>Medida 7</i>	<i>0,314</i>	<i>0,342</i>	<i>0,322</i>	<i>0,328</i>	<i>0,304</i>
<i>Medida 8</i>	<i>0,328</i>	<i>0,348</i>	<i>0,326</i>	<i>0,328</i>	<i>0,308</i>
<i>Medida 9</i>	<i>0,328</i>	<i>0,346</i>	<i>0,318</i>	<i>0,310</i>	<i>0,310</i>
<i>Medida 10</i>	<i>0,328</i>	<i>0,342</i>	<i>0,316</i>	<i>0,326</i>	<i>0,294</i>

*Fonte: Autoria própria.*

A partir dos dados registrados do deslocamento dos corpos de prova da estrutura adesivada nos pontos de controle, foi utilizado o software Excel para realizar uma análise de variação total dentro desse grupo de dados (ANOVA), como mostrado na Tabela 7. Foram calculadas a média e a variância do deslocamento de cada corpo de prova para um fator de concentração de 0,05 e o desvio padrão para cada corpo de prova.

Tabela 7. Análise de variância e desvio padrão.

Grupo	Contagem	Média (mm)	Variância	Desvio Padrão
CP 1	10	0,3212	4,02E-05	0,00601
CP 2	10	0,3452	5,17-05	0,00682
CP 3	10	0,3178	5,28E-05	0,00690
CP 4	10	0,3212	4,82E-05	0,00658
CP 5	10	0,3036	2,47E-05	0,00472
Média Geral		0,3218	4,35E-05	0,00621

Fonte: Autoria própria.

A partir da análise da Tabela 8 é possível notar que o valor de P é inferior ao fator de concentração (0,05), sugerindo que há uma diferença significativa entre os grupos. Além disso, o valor de F é aproximadamente 20 vezes maior que o valor de F crítico indicando que a variabilidade entre os grupos é significativamente maior do que a variabilidade dentro dos grupos. Deste modo, é possível concluir que a hipótese nula é rejeitada indicando que há uma diferença estatisticamente significativa entre as médias dos grupos analisados.

Tabela 8. Análise ANOVA.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	P	F crítico
Entre grupos	0,008955	4	0,002239	51,43251	3,19E-16	2,578739
Dentro dos grupos	0,001959	45	4,35E-05	-	-	-
Total	0,010914	49	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

Diante disso, foi realizado o teste Tukey, conforme Eq. 19, para identificar quais corpos de prova estão apresentando divergências, a partir da análise da variável DMS (diferença mínima significativa).

$$DMS = q \cdot \sqrt{\frac{MQ_{residuo}}{n^{\circ} \text{ de grupos}}} \quad \text{Eq. 19}$$

O valor de q corresponde a um valor tabelado para o fator de concentração 5%, apresentado no Anexo A, que é obtido pela relação do número de médias e o número de graus de liberdade dos grupos, portando foi identificado que o valor de q é de 4,01. Diante disso o valor encontrado para DMS é de 0,026.

Comparado os valores da diferença em módulo entre as médias de cada corpo de prova, apresentado na Tabela 9, é possível verificar que os valores de CP2-CP3 e CP2-

CP5 são maiores que o valor de DMS, portanto os demais corpos de prova possuem valores de médias semelhantes.

Tabela 9. Análise Tokey.

Concentração 5%	Média 1 (mm)	Média 2 (mm)	Diferença em módulo (mm)
CP1-CP2	0,3212	0,3452	0,024
CP1-CP3	0,3212	0,3178	0,0034
CP1-CP4	0,3212	0,3212	1,11E-16
CP1-CP5	0,3212	0,3036	0,0176
CP2-CP3	0,3452	0,3178	0,0274
CP2-CP4	0,3452	0,3212	0,024
CP2-CP5	0,3452	0,3036	0,0416
CP3-CP4	0,3178	0,3212	0,0034
CP3-CP5	0,3178	0,3036	0,0142
CP4-CP5	0,3212	0,3036	0,0176

Fonte: Autoria própria.

A partir desta análise, é possível determinar que, a princípio, os corpos de prova CP2 e CP5 apresentam médias de deslocamento distantes dos parâmetros aceitáveis, conforme observado pelo F crítico. Considerando apenas a média dos corpos de prova CP1, CP3 e CP4, que é de 0,320 mm, observou-se que a exclusão de CP2 e CP5 não altera de forma significativa a média geral do deslocamento dos corpos de prova. Dado que CP2 e CP5 estão equidistantes da média dos demais corpos de prova e que o desvio padrão médio foi baixo, então foi considerado o valor do deslocamento da estrutura de 0,3218 mm.

### 5.3 Simulação estrutural

Para a avaliação estrutural do corpo de prova da estrutura adesivada foram empregados softwares comerciais de Métodos de Elementos Finitos e Sem Malha. O propósito destas simulações consiste em analisar e comparar as tensões de von-Misses na região de aplicação do adesivo, bem como prever o deslocamento da peça para correlacionar com a análise experimental. No entanto, a análise experimental não abrange a medição das tensões do adesivo, apenas o deslocamento da estrutura quando submetido a 200 N. A geometria adotada nas simulações foi simplificada, o que levou à remoção do canal de injeção do adesivo e dos canais de saída de gás, contudo essa alteração não impactou no comportamento observado do adesivo e da estrutura.

A análise das simulações estruturais é caracterizada pela avaliação de como o modelo de teste reage quando sujeito a uma força de tração de 200 N, conforme ilustrado no diagrama de corpo livre da Figura 52. As simulações através do MEF e MSM foram testadas levando em consideração a não linearidade dos materiais.

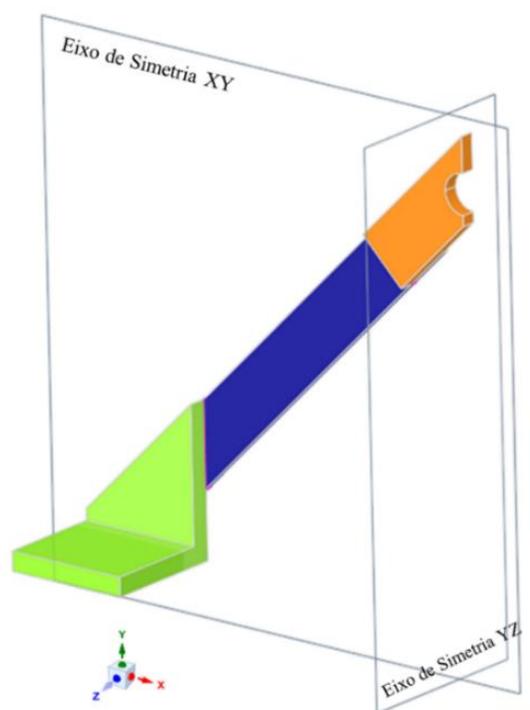
### 5.3.1 Simulação estrutural da geometria complexa usando o MSM

Para a simulação implementada no software de Método Sem Malha, foram estabelecidos parâmetros específicos com base nos estudos de casos anteriores que mostraram resultados satisfatórios para geometrias simples e de média complexidade. Solicitou-se que o nível de refino da geometria importada fosse ajustado para *standard*, e a geração de conexões fosse definida como *high*, considerando contatos para *gaps* de até 0,1 mm e uma tolerância de penetração máxima de 0,1 mm. Além disso, foi requisitado que a conexão dos cabos dos estais fosse tratada como *Grounded* e a análise especificada como linear estática customizada, com seis passes, alto nível de refinamento e opções para se adaptar aos *features* das peças e sólidos finos.

### 5.3.2 Simulação estrutural da geometria com média complexidade usando o MEF

Na simulação conduzida no software de Elementos Finitos, optou-se pela aplicação de uma condição de simetria em dois planos, Figura 58, com o objetivo de reduzir o custo computacional. A peça foi modelada com apenas um quarto de sua geometria completa, considerando as condições de simetria planar em relação ao plano XY e YZ.

Figura 58. Representação da análise montada no software de Elementos Finitos.



Fonte: Autoria própria

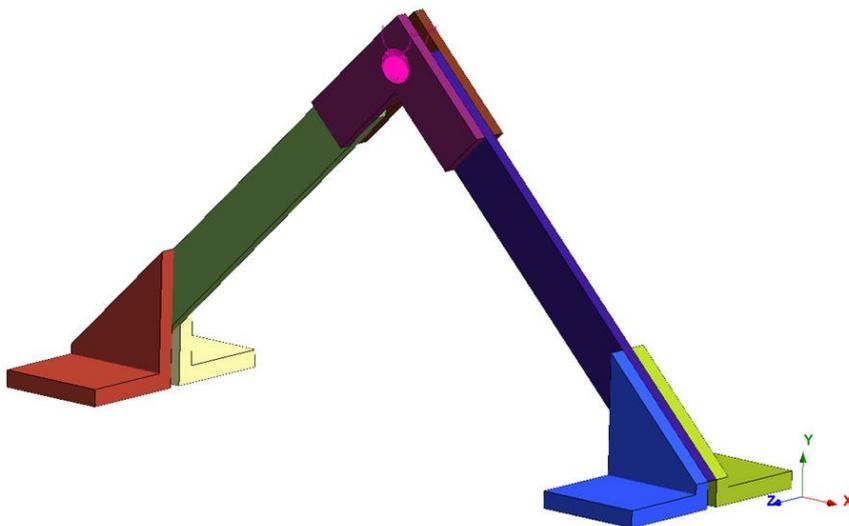
Inicialmente foram definidas as propriedades dos materiais e aplicada a força de tração na direção +Y de maneira incremental, variando de 5 N a 50 N. Estes valores são devidos à condição de um quarto de simetria adotada, necessitando que a carga seja quatro vezes menor. Adicionalmente, tratou-se os contatos entre as superfícies que não estão aderidas com a configuração “no separation”. Esta configuração assegura que as superfícies em contato permaneçam unidas ao longo da análise, permitindo a transmissão de forças de compressão sem que ocorra penetração entre elas. Este é o caso, por exemplo, da interação entre os elementos da estrutura analisada como: i) barra (azul) e conexões (verde), ou ii) barra (azul) e uniões (laranja), Figura 49.

No que se refere à malha estruturada, realizou-se cortes nas peças para facilitar a criação de uma malha hexaédrica nas geometrias, adotando o método de geração de malha “sweep method”. Em seguida, ao analisar os resultados foram geradas as respostas de deslocamento da estrutura e as tensões de von-Misses na superfície do adesivo e na linha média.

### 5.3.3 Simulação estrutural da geometria com média complexidade usando o MSM

A abordagem utilizada para a simulação no software do Método Sem Malha iniciou com a importação da geometria e não foi adotada uma condição de simetria, conforme observado na Figura 59.

Figura 59. Representação da análise montada no MSM.



Fonte: Autoria própria

Após a importação da geometria foram especificadas as propriedades dos materiais e estabelecidas as condições de contato, bem como as condições de contorno. Nesse caso, foi implementado dez simulações incrementais de 20 até 200 N. O *setup* foi configurado de forma personalizada, ativando os parâmetros de alto nível de refinamento e as opções para *features* da peça e sólidos finos. Por fim, realizou-se uma

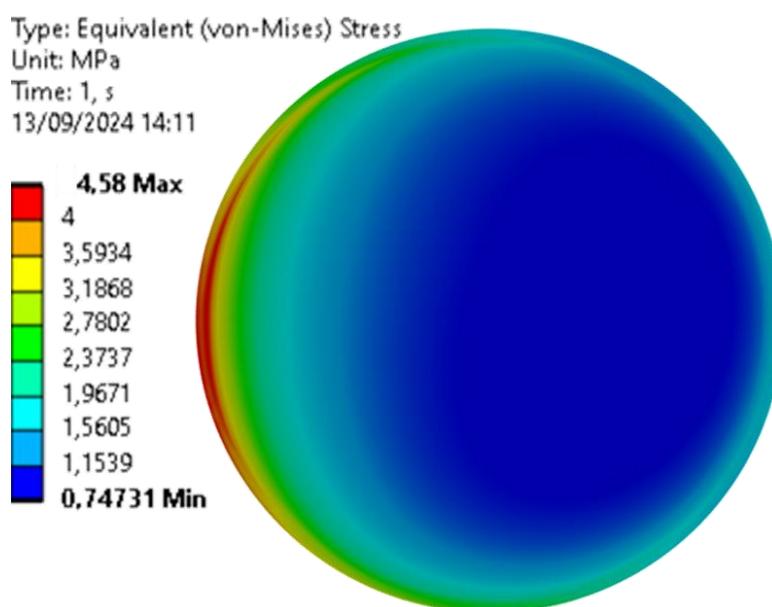
análise de convergência para avaliar o comportamento das respostas com variações no número de passes, que oscilou entre 2 e 7.

#### 5.4 Validação de métodos numéricos para geometria de média complexidade

##### 5.4.1 Análise das tensões de von-Mises na linha média do adesivo por diferentes métodos

De acordo com o modelo tridimensional analisado neste trabalho, caracterizado por uma geometria de média complexidade, a análise de tensões locais utilizando o MEF resultou em uma malha composta por 478.278 nós e 105.919 elementos, onde para o adesivo foi considerado uma malha com 8 elementos na espessura e uma razão de aspecto de até 5, conforme testes executados no Capítulo 4.3.2. Esta análise indicou uma tensão máxima no adesivo localizada na junção entre os elementos denominados conexão e barra. O valor de tensão máxima na linha média do adesivo foi de 4,58 MPa, como apresentado na Figura 60. Adicionalmente, observou-se um deslocamento máximo da estrutura analisada de 0,469 mm e não foi identificada nenhuma deformação plástica da estrutura.

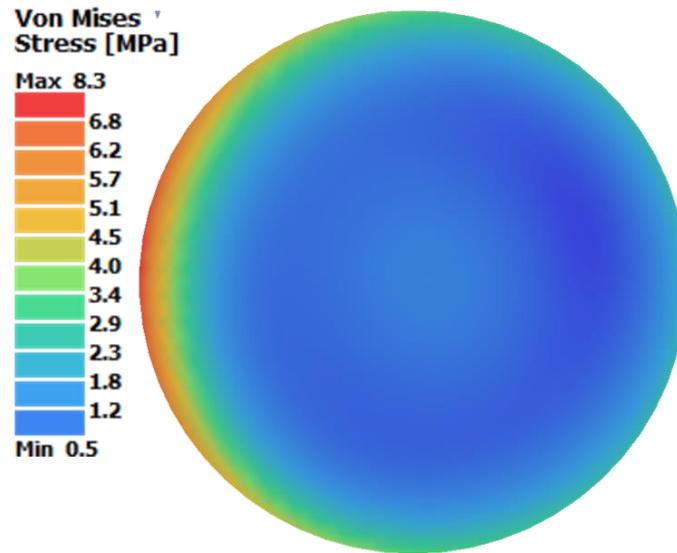
Figura 60. Distribuição de tensão de von-Mises em um dos adesivos de junção usando o MEF.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos pela simulação através do MSM indicaram uma tensão máxima na mesma região do MEF, e um valor de tensão máxima de 8,33 MPa, como mostrado na Figura 61. O deslocamento máximo da estrutura também foi próximo de 0,466 mm.

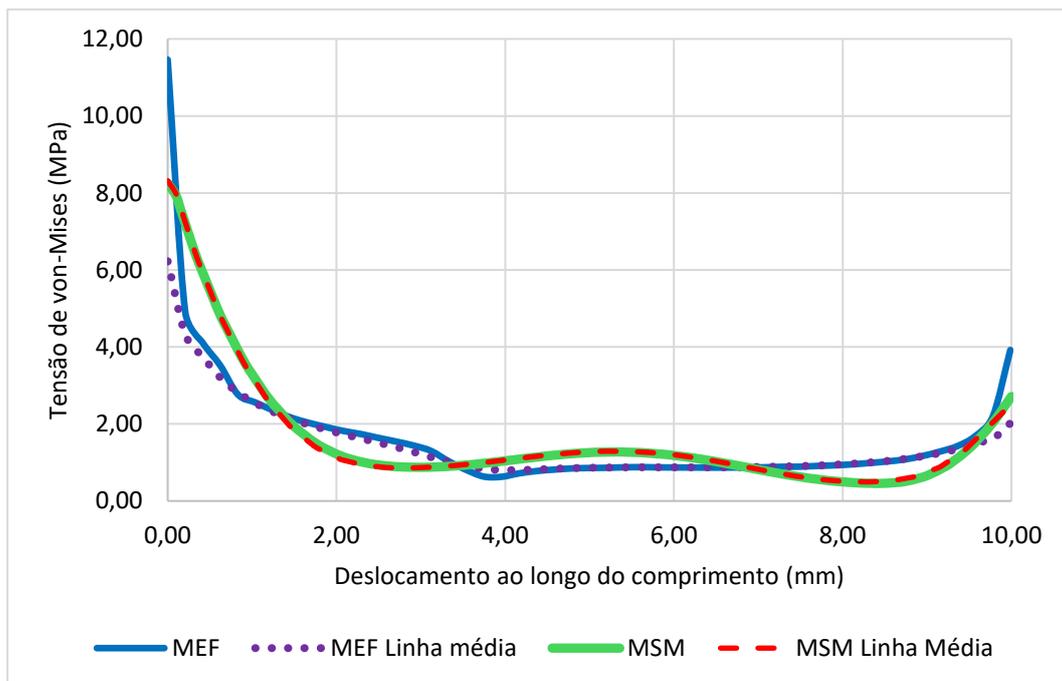
Figura 61. Distribuição de tensão em um dos adesivos de junção usando o MSM.



Fonte: Autoria própria.

A partir da análise da Figura 62, observou-se que na área periférica do adesivo os dois softwares encontraram tensões similares. Contudo, a variação das tensões não foi significativa, não afetando o comportamento da junta. Esse fenômeno pode ser atribuído à discretização da malha no MEF e à distribuição de pontos no MSM.

Figura 62. Variações de tensão de von-Misses: extremidades e linha média.



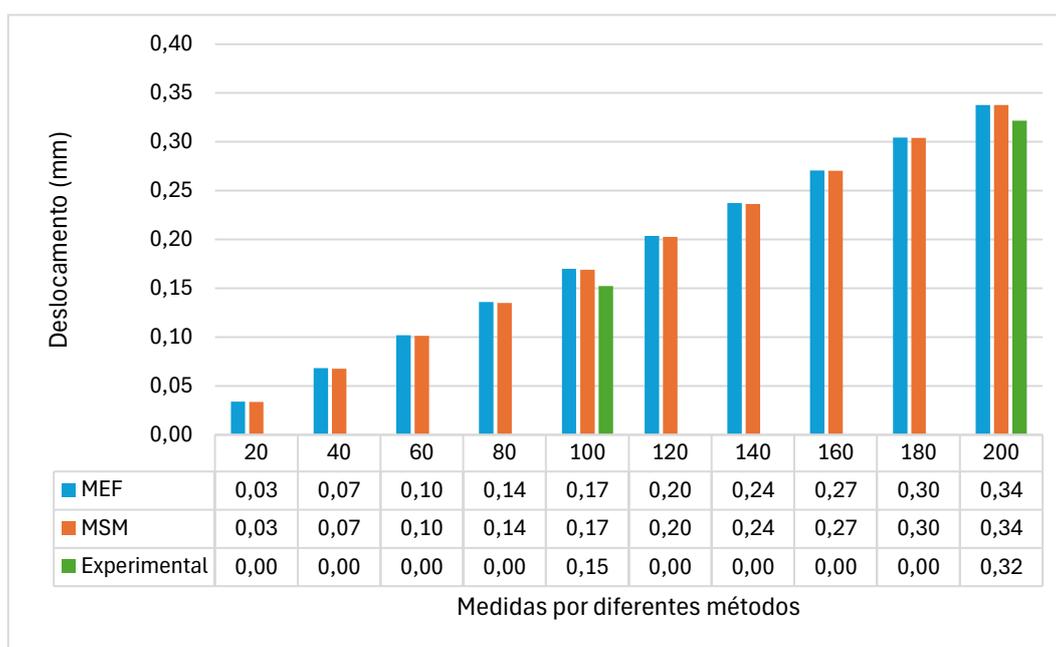
Fonte: Autoria própria.

Na utilização do MEF, observou-se que a tensão na extremidade da junta adesivada (borda) é maior que na linha média, respeitando o princípio de alteração da tensão em razão da espessura do adesivo, no entanto, recomenda-se avaliar o desempenho de um adesivo com base em seu comportamento ao longo da linha média. Por outro lado, no MSM, esse efeito não foi observado para a mesma geometria; a distribuição de tensão tanto nas extremidades quanto na linha média exibiu comportamentos similares. Portanto, o software baseado em MSM não foi capaz de detectar a atenuação das tensões nessa região.

### 5.5 Comparação de deslocamento: MEF, MSM e experimental

Os resultados das simulações em ambos os softwares apresentaram uma convergência dos dados com um erro inferior a 0,006 %, indicando que, dentro do regime elástico da estrutura, os softwares fornecem respostas muito similares, conforme comportamento ilustrado na Figura 63.

Figura 63. Comparativo de deslocamento: métodos numéricos vs. experimental.



Fonte: Autoria própria.

A partir da análise comparativa do deslocamento máximo no ponto de controle do corpo de prova da estrutura adesivada foi observado um deslocamento no eixo Y de 0,3218 mm, obtido a partir da média dos cinco corpos de prova para uma carga de 200 N. No conjunto de dados foi observado um erro de 5 % dos resultados obtidos nas simulações em relação ao experimental, como apresentado na Figura 63.

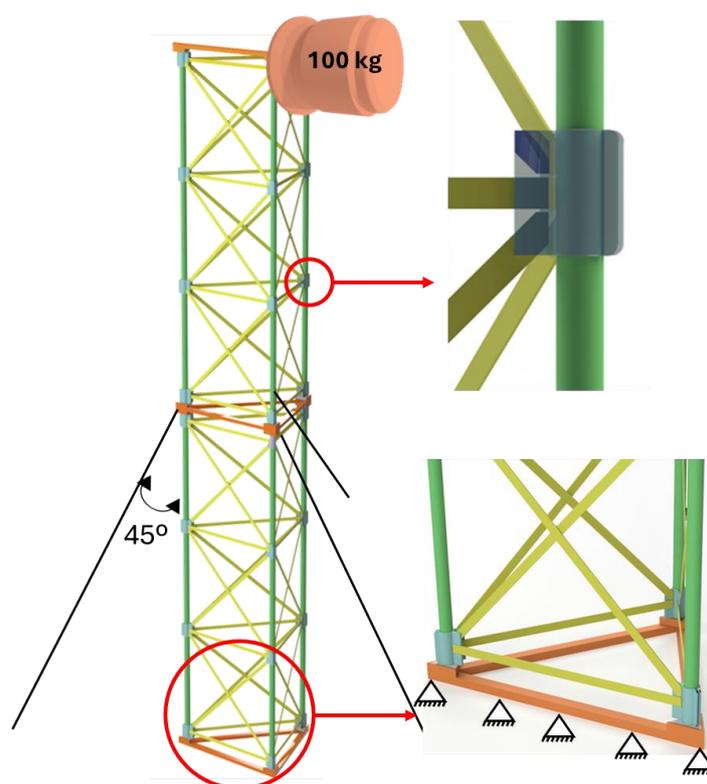
## 6 Estudo de Caso 3: Geometria complexa

Este estudo de caso consiste em avaliar a precisão e confiabilidade dos resultados de deslocamento e tensão nas estruturas de geometria complexa adesivada desenvolvidos por softwares comerciais de Métodos de Elementos Finitos e Sem Malha, investigar a velocidade de obtenção das respostas, além de desenvolver uma análise econômica das simulações.

### 6.1 Definição da estrutura de alta complexidade

A estrutura de alta complexidade trata-se de uma torre de telecomunicação constituída por componentes em aço estrutural, como bases triangulares, tubos e barras chatas. As conexões entre esses componentes foram projetadas de modo que uma luva, também em aço estrutural, permita unir as colunas e as barras horizontais e diagonais através do adesivo estrutural Betamate 2096 (caracterizado no Capítulo 3.2.4). A função principal dessa torre é sustentar uma antena de 100 kg que é fixada em uma das faces, Figura 64.

Figura 64. Modelo do estudo de caso.



Fonte: Autoria própria.

O centro de gravidade da antena está localizado a 1.000 mm de uma das faces da torre. A base da torre é ancorada ao solo e reforçada por três estais com diâmetro de 3/8" equidistantes e sem pré-carga, que estão conectadas no ponto de união entre

o primeiro e o segundo módulo da estrutura. Esta configuração é adotada porque o software de Método Sem Malha, utilizado neste estudo, não permite considerar o efeito de não compressão nos estais. Assim, é possível estabelecer as mesmas condições de simulação em ambos os softwares de MEF e MSM. Para a simulação da estrutura foi adotado que os materiais possuem um comportamento linear-elástico conforme os dados apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Dados dos materiais utilizados na torre de telecomunicação.

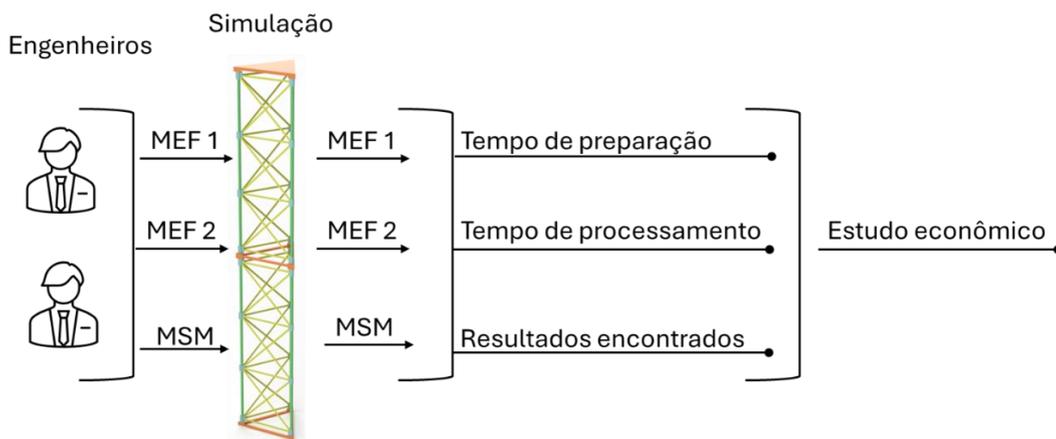
Dados dos materiais	Aço Estrutural	Betamate 2096
Tensão de escoamento	250 MPa	10,19 MPa
Poisson	0,3	0,33
Módulo de elasticidade	200 GPa	1655 MPa
Densidade	7800 kg / m <sup>3</sup>	1120 kg/ m <sup>3</sup>

Fonte: Aatoria própria.

## 6.2 Simulação estrutural de alta complexidade

Para a execução das simulações deste estudo de caso foram selecionados dois engenheiros com expertise em análise estrutural, que tiveram como objetivo desenvolver a simulação de uma estrutura complexa, monitorando o tempo total requerido para o pré-processamento, processamento e análise da acurácia das respostas dos softwares de Elementos Finitos e Sem Malha, como apresentado na Figura 65.

Figura 65. Metodologia para validação de simulações de geometrias complexas.



Fonte: Aatoria própria.

Neste estudo de caso, foi proposta a utilização de dois softwares de Método de Elementos Finitos, denominados MEF 1 e MEF 2, e um software de Método Sem Malha,

MSM, os quais foram descritos no Capítulo 3.2.1. O MEF 1 possui um custo de aquisição mais elevado e um número maior de ferramentas auxiliares com recursos mais avançados, como uma variedade maior de condições de contato, restrições de movimentação e configurações de carregamento. O segundo software, MEF 2, foi escolhido por sua integração com a ferramenta CAD, por possuir uma interface amigável para o projetista, sendo compatível com simulações estruturais lineares e apresenta um custo inferior ao MEF 1. Já o MSM não necessita desenvolver uma simplificação na geometria analisada reduzindo o tempo de pré-processamento da análise. Deste modo, após o levantamento dos tempos de pré-processamento e simulação, foi possível realizar uma análise econômica dos custos associados a execução de simulações utilizando o MEF 1, MEF 2 e o MSM.

Para conduzir o experimento, cada engenheiro utilizou um computador conforme descrito no Capítulo 3.2.2, com os softwares necessários instalados e o modelo CAD da torre. Solicitou-se que os engenheiros documentassem as etapas do processo de simulação, incluindo o tempo necessário para a criação ou definição da malha (MEF) e das condições da nuvem de pontos (MSM), o estabelecimento das condições de contorno, a definição dos contatos entre os elementos, a configuração da análise linear estática e, por fim, o tempo de processamento geral.

Posteriormente, foi requisitado aos engenheiros que registrassem o deslocamento total da estrutura em relação aos eixos X, Y e Z e que fosse gerada uma imagem representativa das tensões de von-Mises na estrutura, destacando os valores máximos de tensão na coluna e nas barras, facilitando a visualização dos pontos críticos de esforço entre os diversos resultados. Por fim, foi elaborado um gráfico das tensões de von-Mises ao longo da linha média do adesivo, que conecta a barra horizontal mais exigida da estrutura, proporcionando uma análise específica das tensões em uma das junções mais críticas.

### **6.2.1 Simulação estrutural da geometria complexa usando o MEF**

Nas simulações estruturais realizadas com os softwares MEF 1 e MEF 2, não foi estabelecida uma padronização dos parâmetros utilizados para a obtenção dos resultados, no entanto, foi solicitado que a estratégia adotada para as simulações em ambos os softwares fosse a mesma. Mesmo assim, é esperado que ocorram variações nos valores de tensão, tanto na estrutura quanto na linha média do adesivo, bem como nos deslocamentos. Essas variações podem ser atribuídas as diferenças nos recursos disponíveis em cada software, que impactam nas condições de contato e na malha desenvolvida para a estrutura complexa. Além disso, essas diferenças podem estar relacionadas ao nível de experiência do engenheiro, o que pode influenciar diretamente na precisão dos resultados, bem como no tempo necessário para a montagem e obtenção das respostas em cada simulação.

### 6.3 Resultado das análises da geometria complexa

A abordagem adotada pelos Engenheiros I e II na condução das simulações é detalhada no Anexo B.

#### 6.3.1 Comparação do deslocamento global da estrutura

Os resultados da análise de deslocamento global da estrutura são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Posição do deslocamento da estrutura em relação aos eixos de coordenada.

Softwares		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Global (mm)
Engenheiro I	MEF 1	0,0241	0,0820	0,5120	0,5278
	MEF 2	0,0230	0,0784	0,4890	0,5038
	MSM	0,0365	0,0803	0,4983	0,5138
Engenheiro II	MEF 1	0,0271	0,0821	0,5112	0,5268
	MEF 2	0,0327	0,0736	0,4503	0,4628
	MSM	0,0220	0,0788	0,4933	0,5087

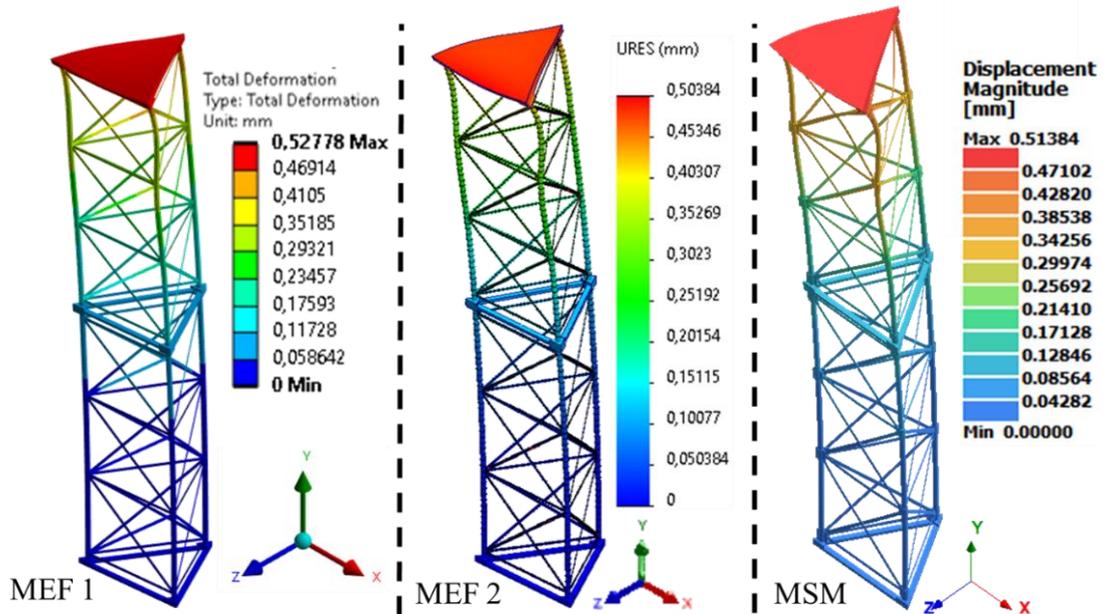
Fonte: Autoria própria.

Os resultados mostram uma pequena discrepância entre os valores de deslocamento global obtidos pelas análises dos dois engenheiros usando o software de MEF 1, resultando em um distanciamento percentual de 0,2% entre os valores obtidos, demonstrando uma consistência aceitável, apesar dos engenheiros usarem parâmetros de malhas diferentes (3.486.339 elementos para o Engenheiro I e 163.457 elementos para o Engenheiro II). A simulação com o software de MEF 2, indicou um deslocamento global da estrutura 8,9% maior obtido pelo Engenheiro I em comparação ao deslocamento constatado pelo Engenheiro II (13.473 elementos para o Engenheiro I e 790.061 elementos para o Engenheiro II). Já a divergência entre os valores de deslocamento global obtidos pelas simulações realizadas com o MSM foi de 1,0%, sendo que a análise desenvolvida resultou em 236.652 e 239.836 números de pontos para os Engenheiros I e II respectivamente.

Analisando a média de deslocamento global obtida por cada software, observou-se que a média para o MEF 1 foi de 0,5273 mm. A média do MEF 2, por sua vez, foi 9,1% menor (0,4833 mm) que a do MEF 1, enquanto que a média do MSM foi 4,6% menor (0,5112 mm), também em relação ao MEF 1. Esses resultados indicam que, neste estudo de caso, o MSM apresentou valores mais próximos ao MEF 1 do que o MEF 2.

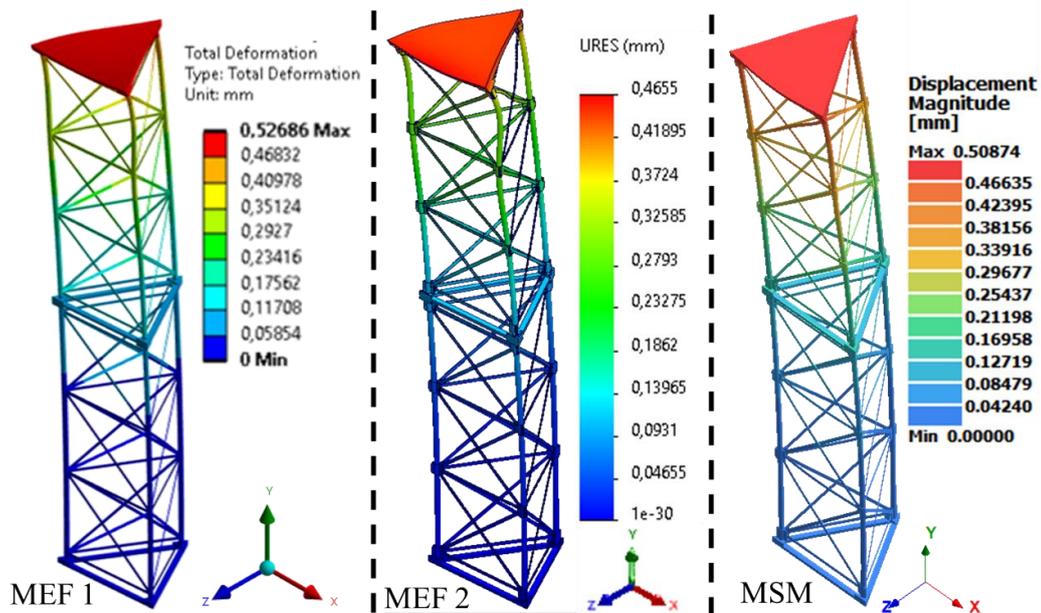
Além disso, a partir das Figuras 66 e 67 foi possível observar que o comportamento da estrutura simulada foi bastante semelhante em ambos os softwares, evidenciando uma deformação muito parecida tanto das barras superiores quanto da base superior.

Figura 66. Deslocamento da torre utilizando uma escala de 1700 vezes - Engenheiro I.



Fonte: Autoria própria.

Figura 67. Deslocamento da torre utilizando uma escala de 1700 vezes - Engenheiro II.

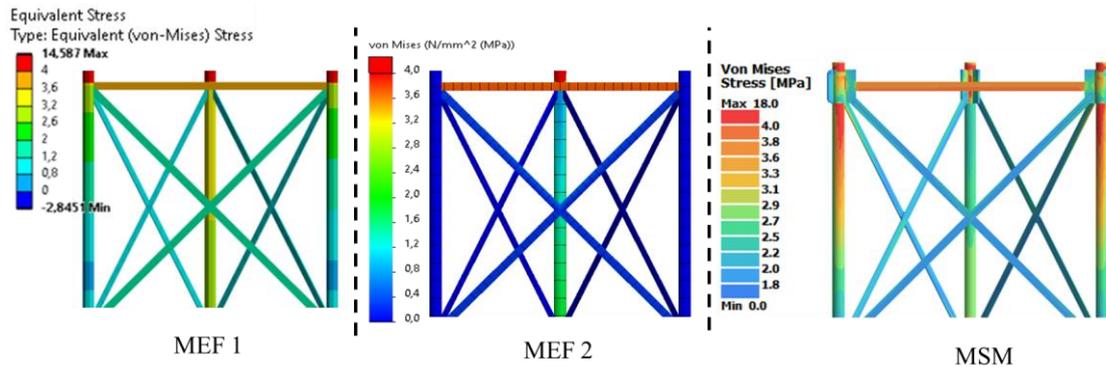


Fonte: Autoria própria.

### 6.3.2 Comparação entre as respostas das regiões mais solicitadas e o comportamento do adesivo

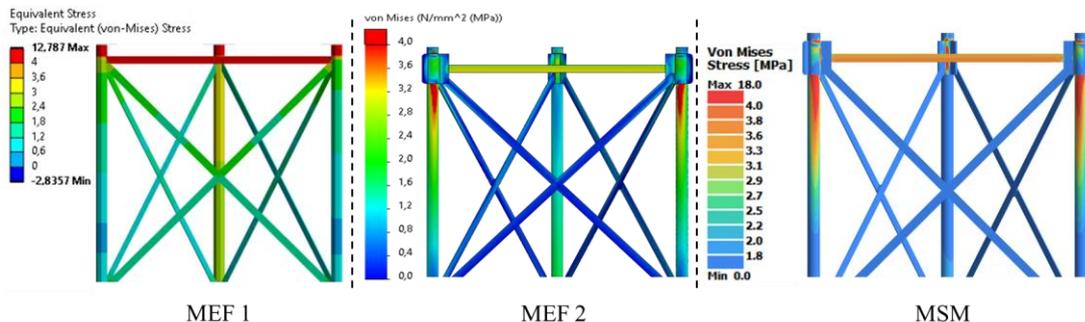
Quanto às barras mais solicitadas, observou-se que os três softwares de simulação apresentaram as mesmas regiões de tensão máxima as quais acontecem nas extremidades das colunas do módulo superior, sendo os valores máximos bem próximos entre si, conforme Figuras 68e 69.

Figura 68. Estresse nas colunas e barras da torre - Engenheiro I.



Fonte: Autoria própria.

Figura 69. Estresse nas colunas e barras da torre - Engenheiro II.



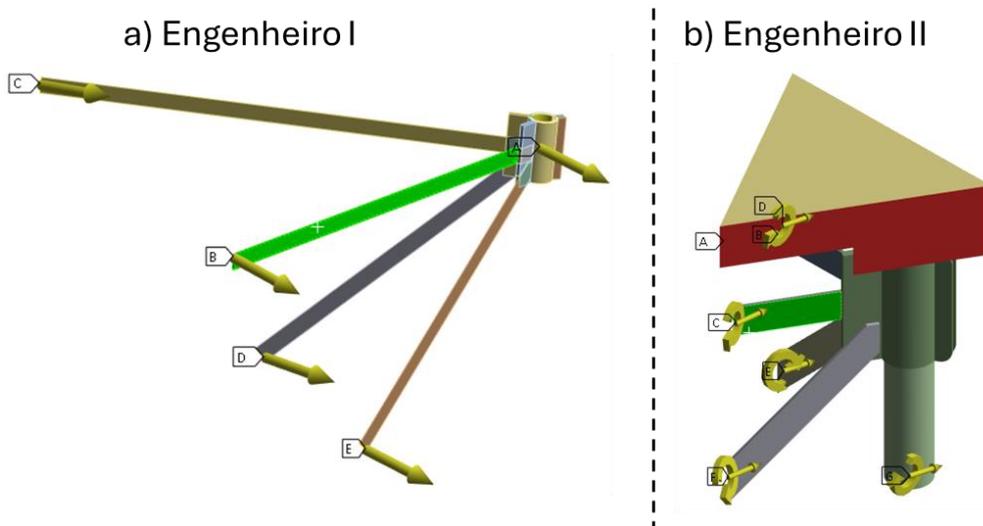
Fonte: Autoria própria.

As simulações realizadas pelo Engenheiro I mostram que as barras destacadas em laranja, para o MEF 1, MEF 2 e MSM da Figura 68, estão submetidas a uma tensão de von Misses de aproximadamente 4 MPa. Foram nesses pontos que os adesivos foram avaliados e seus resultados comparados. Por outro lado, a simulação conduzida pelo Engenheiro II, ilustrada na Figura 69, apresentou valores de tensão de von Misses diferentes para a mesma barra: o MEF 1 indicou uma tensão de 4,0 MPa, enquanto o MEF 2 e o MSM indicaram tensões de 3,5 MPa e 3,6 MPa, respectivamente.

Nos softwares de Métodos de Elementos Finitos, além da análise global foi conduzida uma análise local, ilustrada pela Figura 70, na qual foi determinado que cada nó dessa estrutura fosse submetido ao deslocamento resultante da simulação global.

Esta abordagem permitiu identificar as tensões em toda a estrutura e em especial no adesivo de ligação que une a "luva" à barra sinalizada na cor verde.

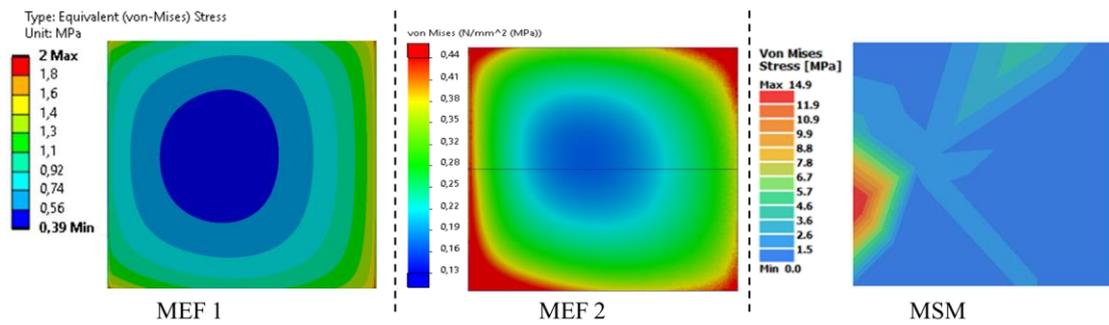
Figura 70. Diagrama da análise local da torre de telecomunicação.



Fonte: Autoria própria.

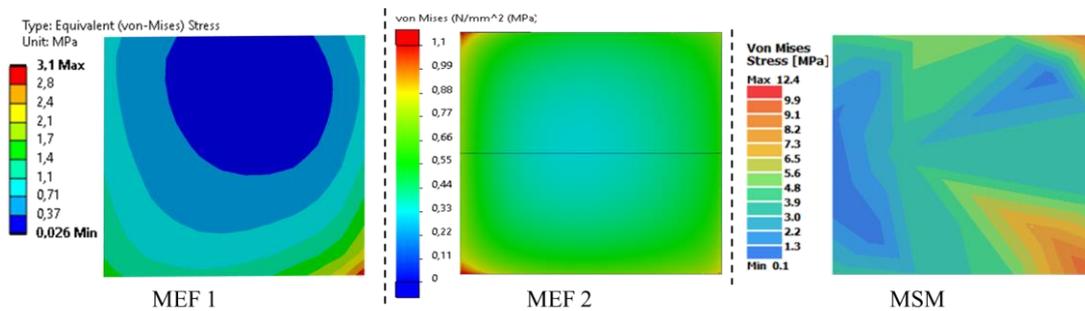
Em seguida, foram avaliadas as tensões de von-Mises no adesivo, apresentadas pelas Figuras 71 e 72. Foi possível notar que a análise realizada no software de MEF 1 apresentou um gradiente de tensões próximo do esperado, com zonas bem definidas sendo que as maiores tensões são localizadas nas extremidades do adesivo e uma zona de baixa solicitação no centro. Esses achados também foram observados na simulação do MEF 2 realizada pelo Engenheiro I, contudo com valores de tensões inferiores aos identificados no MEF 1. Em contrapartida, o padrão das zonas de tensões não foi detectado nas simulações desenvolvidas utilizando os softwares de MEF 2 desenvolvidos pelo Engenheiro II e MSM. No MSM, foram observadas tensões mais elevadas em comparação com as demais análises, além de um campo de tensões pouco uniforme. Isto pode ser devido ao fato que este adesivo se encontra próximo ao adesivo da barra "E", este fato pode ser justificado pela existência de duas regiões de concentração de tensão muitas próximas de espessuras finas, deste modo o software de MSM pode apresentar valores de tensões diferentes do esperado devido à proximidade das zonas de influências dos pontos.

Figura 71. Tensão de von-Mises no adesivo mais solicitado na torre – Engenheiro I.



Fonte: Autoria própria.

Figura 72. Tensão de von-Mises no adesivo mais solicitado na torre – Engenheiro II.



Fonte: Autoria própria.

As divergências entre os resultados dos softwares podem ser atribuídas às diferentes estratégias de implementação adotadas pelos engenheiros, aos diversos algoritmos de processamento e aos parâmetros internos de cada software. Na simulação desenvolvida com o software de MSM, foi considerada a geometria completa da torre sem simplificações, o que resultou em limitações na discretização da nuvem de pontos. Apesar desta limitação, o deslocamento da estrutura foi similar aos demais, porém com um gradiente de tensões nos adesivos divergente. Por outro lado, as simulações desenvolvidas com os softwares de MEF 1 e MEF 2 foram simplificadas, a análise foi realizada de forma global e em seguida local. Na análise global, observou-se que o MEF 2 não possui de todos os parâmetros de controle de malha e opções de contato presentes no MEF 1, por estas razões não foi possível capturar os elevados gradientes de tensão que ocorre nas bordas do adesivo. A análise local, por sua vez, depende dos resultados obtidos pela análise global, portanto pode apresentar resultados inconsistentes visto que também é influenciado pela malha e condições de contato, resultando em um maior tempo de simulação. Além disso, a estratégia adotada pelo Engenheiro II, considera um número menor de elementos no modelo e na espessura do adesivo (4 elementos), enquanto o Engenheiro I adotou um refinamento maior (8 elementos), de forma o Engenheiro II optou por gerar respostas mais rápidas com menor precisão dos resultados.

### 6.3.3 Tempo de simulação para geometria complexa

O tempo necessário para a montagem e resolução das simulações estão apresentadas nas Tabelas 12, 13 e 14.

Tabela 12. Tempo de implementação das simulações globais no MEF 1 e MEF 2.

Atividades		Engenheiro I		Engenheiro II	
		MEF 1 (min)	MEF 2 (min)	MEF 1 (min)	MEF 2 (min)
Análise Global	Ajuste da geometria	62	64	40	1
	Definição dos materiais	5	1	3	20
	Definição dos contatos	30	45	20	2
	Definição da malha	10	8	7	20
	Definição dos carregamentos e restrições	5	15	4	5
	Setup dos parâmetros da simulação	1	2	2	5
	Resolução	3	6	5	50
	Total	116	141	81	103

Fonte: Autoria própria.

Tabela 13. Tempo de implementação das simulações local no MEF 1 e MEF 2.

Atividades		Engenheiro I		Engenheiro II	
		MEF 1 (min)	MEF 2 (min)	MEF 1 (min)	MEF 2 (min)
Análise Local	Ajuste da geometria	16	16	12	12
	Definição dos materiais	5	10	5	15
	Definição dos contatos	5	12	13	10
	Definição da malha	10	39	10	22
	Definição dos carregamentos e restrições	5	25	1	12
	Setup dos parâmetros da simulação	5	2	3	3
	Resolução	53	151	49	115
	Total	99	255	90	396

Fonte: Autoria própria.

Tabela 14. Tempo de implementação das simulações no MSM.

Atividades	Engenheiro I	Engenheiro II
	MSM (min)	MSM (min)
Ajuste da geometria	0	0
Definição dos materiais	5	1
Definição dos contatos	1	5
Definição da nuvem de pontos	1	1
Definição dos carregamentos e restrições	5	2
Setup dos parâmetros da simulação	1	2
Resolução	31	90
Total	44	101

Fonte: Autoria própria.

A partir dos dados apresentados nas Tabelas 12, 13 e 14, observou-se que o tempo dedicado ao ajuste da geometria utilizando os softwares de MEF impacta na comparação do tempo de pré-processamento entre os softwares de MSM e MEF, pois o software de Método Sem Malha dispensa um tratamento prévio da geometria desconsiderando essa etapa no fluxo de atividades. Por outro lado, a estratégia empregada pelos Engenheiros I e II nos softwares de Elementos Finitos consistiu em converter os componentes da torre em elementos 1-D para a análise global. Embora essa abordagem geralmente demande mais tempo em comparação ao uso de elementos sólidos ou de casca, a utilização de elementos unidimensionais pode acelerar a previsão do comportamento da estrutura, como o deslocamento e a identificação dos componentes mais solicitados da torre de telecomunicação. Além disso, os Engenheiros I e II adotaram a estratégia de realizar uma análise local para verificar as tensões no adesivo, em que foi observada uma significativa demanda de tempo, uma vez que é necessário isolar os componentes, nesta etapa foi necessário utilizar uma ferramenta CAD para gerar novas geometrias.

Em relação aos tempos de definição dos materiais, carregamentos e restrições de movimentação, bem como dos parâmetros de *setup* da simulação, não foi observada uma disparidade significativa. Acredita-se que essas etapas estejam relacionadas à organização dos recursos disponíveis nos softwares, refletindo assim a usabilidade dos mesmos.

Os parâmetros para definição das condições de contato e da malha estão relacionados à estratégia adotada pelos Engenheiros. O software de MSM dispõe de um sistema de reconhecimento de contatos que se baseia na definição de distanciamento e penetração entre os componentes, facilitando o reconhecimento semiautomático e, conseqüentemente, reduzindo o tempo necessário para essa operação, já que não é necessário criar contatos manuais. Os softwares de MEF 1 e MEF 2 também oferecem

uma função de reconhecimento automático de contatos, contudo devido à estratégia de uso de elementos de vigas e a uma análise local subsequente, é necessário definir contatos manualmente para ajustar os pontos de conexão e os tipos de contato.

#### **6.4 Análise econômica**

A partir da análise econômica da implementação dos softwares de Elementos Finitos e Sem Malha, foi possível comparar o custo-benefício das ferramentas, com objetivo de otimizar os recursos financeiros da execução do projeto, além de contribuir no planejamento do orçamento de projetos futuros, garantindo que a alocação de recursos seja feita de maneira mais estratégica e baseada em dados experimentais e de simulações.

Os valores dos softwares considerados neste trabalho foram obtidos com base em orçamentos recentes negociados como SENAI CIMATEC. No entanto, é importante salientar que esses valores são restritos ao SENAI CIMATEC e podem sofrer variações entre diferentes fornecedores ou em função de negociações específicas realizadas por cada empresa. Portanto, os preços apresentados nesse trabalho são adotados como referência, estando sujeitos a alterações.

##### **6.4.1 Levantamento dos dados de custo**

Baseado na Lei Federal de nº 4950-A, foi verificado que profissionais graduados em cursos superiores de Engenharia, trabalhando 8 horas diárias, devem receber um salário mínimo profissional de 8,5 salários mínimos. Adotando-se o salário mínimo atual de R\$ 1.412,00, o salário mensal estimado para um engenheiro corresponde a R\$ 12.002,00. Para facilitar o levantamento dos custos da hora do engenheiro, este foi calculado dividindo o salário mensal por 168 horas mensais, correspondentes a 21 dias trabalhados de 8 horas diárias, resultando no valor de R\$ 1,19 por minuto.

Quanto ao uso dos softwares e da workstation, o custo do aluguel anual da licença e do computador foi fracionado pelo número de dias úteis, considerando 8 horas diárias de funcionamento. Tomando como base que o ano de 2024 possui 255 dias úteis, são estimados 122.400 minutos. O custo do aluguel anual da licença do software de MEF 1 é de R\$ 270.256,14, o que equivale a um custo por minuto de R\$ 2,21. Já o aluguel anual do software de MEF 2 é de R\$ 22.932,00, o qual possui um custo por minuto de R\$ 0,19. A licença anual do software de MSM é de R\$ 128.400,00, resultando em um custo por minuto de R\$ 1,05. Já a workstation foi adquirida por R\$ 32.000,00, apresentando um custo de R\$ 0,09 por minuto. Os detalhes destes custos estão listados na Tabela 15 e os respectivos orçamentos levantados estão disponíveis no Anexo C, ambos documentos elaborados para atender as necessidades do SENAI CIMATEC.

Tabela 15. Levantamento dos custos por minuto.

Softwares	Valor Total	Por minutos
MEF 1	R\$ 270.256,14	R\$ 2,21
MEF 2	R\$ 22.932,00	R\$ 0,19
MSM	R\$ 128.400,00	R\$ 1,05
Workstation	R\$ 32.000,00	R\$ 0,26
Engenheiro	R\$ 12.002,00	R\$ 1,19

Fonte: Autoria própria.

A licença do software de MEF 1 foi disponibilizada para o desenvolvimento dessa pesquisa pelo Centro Universitário SENAI CIMATEC que inclui o módulo de simulação estrutural e ferramentas adicionais. O modelo de precificação desta licença é caracterizado pelo custo anual de uma licença flutuante que apenas um usuário pode utilizá-la. Além disso, essa licença é para apenas quatro processadores, limitando seu uso em computadores com maior quantidade de núcleos.

Da mesma forma, a licença do software de MEF 2 também foi disponibilizada pelo Centro Universitário SENAI CIMATEC, e é do tipo flutuante, instalada em um servidor, permitindo que apenas um usuário a utilize por vez. O software de MEF 2 é uma ferramenta de modelagem CAD que integra um módulo de simulação estrutural, porém há uma limitação de processamento, de modo a ficar restrito ao processamento em quatro núcleos.

Já o modelo de precificação do software de MSM, também disponibilizado pelo Centro Universitário SENAI CIMATEC, ocorre pela compra de *tokens* que permite ao usuário acessar diversos softwares do portfólio do desenvolvedor. Para a versão *standard* do software de Método Sem Malha, são necessários 30 *tokens* e para a versão *Advanced* são requeridos 50 *tokens*. Este modelo de precificação oferece flexibilidade, visto que inclui o pacote de softwares que contêm ferramentas para a implementação de simulações: estruturais, de escoamento de fluidos, térmicas, eletromagnéticas e de ótica. A utilização destes softwares depende exclusivamente do número de *tokens* adquirido, deste modo é possível que duas ou mais pessoas possam utilizar os softwares ao mesmo tempo caso haja saldo. Além disso, ao possuir uma quantidade mínima de *tokens* é possível executar a análise em computadores com maior quantidade de núcleos, não sendo necessário fazer a aquisição de uma licença específica.

Deste modo, o software de Método Sem Malha pode ser mais indicado para empresas que demandam por diversas ferramentas de simulação, acesso por múltiplos usuários ao mesmo tempo e execução de análises em computadores com maior volume de núcleos.

## 6.5 Resultados da análise econômica

Os custos dos honorários, baseados nos tempos de simulação registrados pelos engenheiros, variaram da seguinte forma: ao utilizar o software MEF 1, os custos variaram entre R\$ 136,85 e R\$ 189,21; com o software MEF 2, entre R\$ 151,13 e R\$ 284,41; e ao empregar o software MSM, entre R\$ 13,09 e R\$ 15,47, conforme detalhado na Tabela 16.

Tabela 16. Custos de hora-homem utilizando os softwares MEF 1 e MEF 2 e MSM.

Etapas	Custo do Engenheiro I			Custo do Engenheiro II		
	MEF 1 (R\$)	MEF 2 (R\$)	MSM (R\$)	MEF 1 (R\$)	MEF 2 (R\$)	MSM (R\$)
Ajuste da geometria	92,82	95,20	-	61,88	15,47	-
Definição dos materiais	11,90	13,09	5,95	9,52	41,65	1,19
Definição dos contatos	41,65	67,83	1,19	33,32	14,28	5,95
Definição da malha ou nuvem de pontos	23,80	55,93	1,19	20,23	49,98	1,19
Definição dos carregamentos e restrições	11,90	47,60	5,95	5,95	20,23	2,38
Setup dos parâmetros da simulação	7,14	4,76	1,19	5,95	9,52	2,38
Resolução	-	-	-	-	-	-
Total	189,21	284,41	15,47	136,85	151,13	13,09

Fonte: Autoria própria.

Adicionalmente, o custo total do uso das licenças, com base no tempo de utilização, variou entre R\$ 307,19 e R\$ 753,61 para o software MEF 1; entre R\$ 64,41 e R\$ 75,24 para o MEF 2; e entre R\$ 46,20 e R\$ 106,05 para o software MSM, conforme indicado na Tabela 17.

Tabela 17. Custos de aluguel dos softwares MEF 1, MEF 2 e MSM.

Etapas	Custo do Engenheiro I			Custo do Engenheiro II		
	MEF 1 (R\$)	MEF 2 (R\$)	MSM (R\$)	MEF 1 (R\$)	MEF 2 (R\$)	MSM (R\$)
Ajuste da geometria	172,38	15,20	-	114,92	2,47	-
Definição dos materiais	22,10	2,09	5,25	17,68	6,65	1,05
Definição dos contatos	77,35	10,83	1,05	61,88	2,28	5,25
Definição da malha ou nuvem de pontos	44,20	8,93	1,05	37,57	7,98	1,05
Definição dos carregamentos e restrições	22,10	7,60	5,25	11,05	3,23	2,10
Setup dos parâmetros da simulação	13,26	0,76	1,05	11,05	1,52	2,10
Resolução	402,22	29,83	32,55	53,04	31,35	94,50
Total	753,61	75,24	46,20	307,19	55,48	106,05

Fonte: Autoria própria.

Quanto ao custo de utilização do computador, os valores obtidos variaram da seguinte forma: entre R\$ 88,66 e R\$ 36,14 para o uso do software MEF 1; entre R\$ 88,14 e R\$ 102,96 para o MEF 2; e entre R\$ 11,44 e R\$ 26,26 para o uso do software de Método Sem Malha, conforme mostrado na Tabela 18.

Tabela 18. Custos de utilização da Workstation

Etapas	Custo do Engenheiro I			Custo do Engenheiro II		
	MEF 1 (R\$)	MEF 2 (R\$)	MSM (R\$)	MEF 1 (R\$)	MEF 2 (R\$)	MSM (R\$)
Ajuste da geometria	20,28	20,80	-	13,52	3,38	-
Definição dos materiais	2,60	2,86	1,30	2,08	9,10	0,26
Definição dos contatos	9,10	14,82	0,26	7,28	3,12	1,30
Definição da malha ou nuvem de pontos	5,20	12,22	0,26	4,42	10,92	0,26
Definição dos carregamentos e restrições	2,60	10,40	1,30	1,30	4,42	0,52
Setup dos parâmetros da simulação	1,56	1,04	0,26	1,30	2,08	0,52
Resolução	47,32	40,82	8,06	6,24	42,90	23,40
Total	88,66	102,96	11,44	36,14	75,92	26,26

Fonte: Autoria própria.

O custo total médio de utilização dos softwares para implementar as simulações do estudo de caso 3 foi de R\$ 755,83 para o MEF 1, R\$ 372,57 para o MEF 2 e R\$ 109,26 para o MSM. Esta análise demonstra que, além da capacidade de processamento de um computador e recursos embarcados no software a estratégia adotada pelo engenheiro pode resultar em um custo menor para a simulação. Além disso, foi observado que a interface de comando, aliada à supressão de etapas, como a simplificação da geometria, pode gerar uma redução significativa de custos, permitindo a otimização dos recursos. Deste modo, observou se que estas estratégias e características podem contribuir para o planejamento de outras atividades designadas ao engenheiro de simulação.



## 7 Discussão sobre os Resultados

No primeiro estudo de caso, que examina juntas adesivadas simples, observou-se que os modelos analíticos avaliados fornecem uma representação similar das tensões, tanto cisalhantes quanto normais, nos adesivos. Apesar dos resultados obtidos pelo desenvolvimento dos modelos analíticos apresentarem aderência com os resultados do estudo de Zhu e Kedward (2005), eles não capturam completamente todas as variações ao longo do adesivo. O estudo conduzido para avaliar os parâmetros do software de Método Sem Malha revelou-se relevante para obter resultados próximos aos de Zhu e Kedward (2005), e serviram como base para recomendação em estudos de casos futuros. O software de Método Sem Malha se mostrou uma ferramenta capaz para prever tensões ao longo da junta adesiva, embora apresente algumas limitações na captura de variações rápidas de tensão nas extremidades da ligação e distorções causadas pela discretização da nuvem de pontos. Isso destaca a necessidade de cautela na interpretação dos resultados, especialmente em regiões críticas com tensões elevadas. O software de Elementos Finitos, por sua vez, apresentou resultados mais confiáveis quando comparados com os dados obtidos por Zhu e Kedward (2005) e representados nos gráficos de tensões cisalhantes e normais.

No segundo estudo de caso, focado em uma geometria de média complexidade, houve uma consistência notável entre os dados obtidos por meio dos MEF e MSM, identificando com precisão a localização das maiores tensões e a área adesivada mais solicitada, além do deslocamento no ponto de controle. Contudo, o software de Método Sem Malha não conseguiu replicar os mesmos resultados de tensões nas bordas do adesivo que foi apresentado pelo MEF, assim como a variação de tensões devido a mudanças na espessura do adesivo em geometrias complexas. Foi observado que ao aumentar a complexidade e dimensões da estrutura adesivada, houve uma perda de dados devido à discretização da nuvem de pontos. O MSM possui recursos para otimizar a geração da nuvem de pontos, adaptando-a às características das peças e trabalhando com sólidos finos, indicando que há um limite para não aumentar excessivamente o custo computacional.

No terceiro estudo de caso, os softwares de MEF 1, MEF 2 e MSM apresentaram resultados semelhantes em relação ao deslocamento da torre de telecomunicação e na identificação dos elementos mais solicitados. Isso indica que estes softwares têm a capacidade de verificar o deslocamento da estrutura de forma aproximada, de modo que o MEF 1 foi o que apresentou valores de deslocamento mais próximo entre as análises dos engenheiros, seguido pelo MSM e por último o MEF 2. Com relação à análise das tensões nos adesivos, foi observado que o software de MSM apresenta limitações na discretização da nuvem de pontos, devido ao tamanho da estrutura da torre e à baixa espessura dos adesivos nas junções dos componentes, o que resultou em distorções nos resultados de tensões. Já em relação a estratégia adotada pelos engenheiros para a simulação com o MEF 1 e MEF 2, foram apresentados possíveis erros associados à correlação entre as análises global e local. Dessa forma, observou-se que a utilização dos softwares de MEF 1 com a implementação da malha

devidamente estruturada e os parâmetros de deslocamento da análise global transferidos corretamente para a análise local, o MEF 1 demonstrou ser o software mais indicado na avaliação do comportamento do adesivo. Por outro lado, a partir das simulações utilizando o software de MEF 2 observou-se que para alcançar resultados mais precisos, seria necessário um refinamento adicional da malha, o que foi limitado pela capacidade de processamento da Workstation utilizada neste estudo.

Portanto, conclui-se que o MSM é indicado para a execução de análises conceituais em projetos de grande complexidade, mesmo que apresente algumas limitações de controle. Do ponto de vista das geometrias de baixa e média complexidade, o MSM apresentou resultados similares aos do MEF, podendo ser aplicados para etapas de análise preliminar, visto que os estudos de casos 1 e 2 indicaram que as respostas encontradas foram parecidas com as do MEF. Vale ressaltar que o tempo de processamento dos resultados com a utilização do MSM foi significativamente mais rápido do que com o MEF, permitindo que os engenheiros possam explorar um maior número de conceitos nas fases preliminares dos projetos e alcançassem resultados mais promissores a um custo operacional entorno de 6,9 vezes menor.

## 8 Considerações Finais

Os adesivos apresentam diversas vantagens quando aplicados em substituição de uniões aparafusadas, rebitadas, conformadas ou soldadas. Contudo, o projeto de juntas adesivadas exige validações numéricas e/ou experimentais que inclui a participação de engenheiros experientes, utilização de computadores de alto desempenho, disponibilidade de softwares de simulação numérica e aparato experimental.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a integridade de estruturas adesivadas de diversas complexidades através do uso do método MSM adotando o desenvolvimento de três estudos de caso. Nesse contexto, foi desenvolvida uma metodologia no qual foram aplicados modelos analíticos, numéricos e experimentais a fim de avaliar a confiabilidade dos dados para a geometria de diferentes complexidades.

No primeiro estudo de caso, que analisou juntas adesivadas simples, verificou-se que os modelos analíticos avaliados forneceram uma representação bastante precisa das tensões, tanto cisalhantes quanto normais, nos adesivos. Os modelos analíticos demonstraram similaridade aos resultados dos estudos apresentados na literatura, embora não tenham conseguido capturar todas as variações ao longo do adesivo de forma integral. A utilização do software de Método Sem Malha neste estudo de caso também apresentou resultados semelhantes ao caso base, o que reforça sua implementação na simulação de juntas adesivadas simples. No entanto, algumas limitações foram observadas, especialmente na captura de variações rápidas de tensão nas extremidades das juntas e as distorções resultantes da discretização da nuvem de pontos. Deste modo é destacada a importância de uma interpretação cuidadosa dos resultados, particularmente nas regiões das bordas dos adesivos.

O segundo estudo de caso, desenvolvido a partir de uma geometria de média complexidade, destacou a similaridade do MEF e do MSM na identificação das regiões de maior tensão e do valor de deslocamento no ponto de controle. No entanto, o software de Método Sem Malha enfrentou dificuldades em replicar os resultados de tensões nas bordas do adesivo obtidos pelo software de Elementos Finitos e a variação das tensões ao longo da espessura do adesivo. Este estudo de caso também evidenciou que o software de Método Sem Malha possui limitações inerentes ao aumento da complexidade e tamanho das estruturas adesivadas, que podem levar à perda de precisão devido à discretização da nuvem de pontos.

No terceiro estudo de caso, que envolveu uma estrutura de alta complexidade (torre de telecomunicação), tanto a utilização do MEF quanto do MSM indica resultados similares em relação aos valores de deslocamento global da estrutura e das tensões de von-Mises nas barras e coluna. Para este estudo de caso, a discrepância nos resultados entre os softwares de MEF surgiu devido a estratégia adotada por cada engenheiro e aos recursos disponibilizados em cada software, no qual o MEF 1 possui recursos que conseguem controlar melhor a geração da malha e condições de contato, além disso do algoritmo de

processamento que gerou respostas mais rápidas com uma menor necessidade de poder computacional. As respostas obtidas pelo MSM indicaram que, ao trabalhar com uma estrutura muito grande unida por uma fina camada de adesivo, os resultados se mostraram inconsistentes. Esse fato pode ser atribuído às limitações na discretização da nuvem de pontos, no entanto se o software permitisse uma discretização mais refinada da nuvem de pontos em regiões de interesse, os resultados poderiam se aproximar dos obtidos pelo MEF 1, porém a implementação desse recurso elevaria o custo computacional, já que o software foi projetado principalmente para a previsão de rigidez em geometrias complexas.

Por fim, a partir dos resultados obtidos pela metodologia proposta nesse trabalho, verificou-se que o software de Método Sem Malha apresentou resultados satisfatórios para análises conceituais de geometrias complexas adesivadas e análises preliminares para estruturas de baixa e média complexidade. Tais características são relevantes para a execução de simulações exploratórias as quais necessitam simular múltiplas configurações de geometrias de forma ágil e econômica, oferecendo uma relação custo computacional versus custo operacional significativamente mais baixo em comparação aos softwares de Método de Elementos Finitos.

### **8.1 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Como sugestão para trabalhos futuros, devido a necessidade de reconhecer o desempenho dos softwares, seria apropriado avaliar os resultados alcançados dentro do regime plástico dos materiais e compará-los com resultados experimentais. Adicionalmente, é essencial construir o modelo de uma geometria complexa e realizar os respectivos ensaios.

Outra sugestão é desenvolver um teste de sensibilidade para verificar os valores de tensões com relação ao grau de influência da proximidade de uma peça adesivada com outra.

## Referências

- 3M. **Adhesives for composite material applications.** Disponível em: [https://www.3m.com/3M/en\\_US/bonding-and-assembly-us/composite-bonding/](https://www.3m.com/3M/en_US/bonding-and-assembly-us/composite-bonding/). Acesso em: 05 jan. 2023.
- 3M. **Common Stress Types in Adhesive Joints.** Disponível em: [https://www.3m.co.uk/3M/en\\_GB/bonding-and-assembly-uk/training-education/science-of-adhesion/common-stress-types-adhesive-joints/](https://www.3m.co.uk/3M/en_GB/bonding-and-assembly-uk/training-education/science-of-adhesion/common-stress-types-adhesive-joints/). Acesso em: 08 jun. 2024.
- ABRANTES, I., FERREIRA, A. F., MAGALHÃES, L. B., COSTA, M. e SILVA, A. **The impact of revolutionary aircraft designs on global aviation emissions.** *Renewable Energy*, v. 223, p. 119937, 1 Mar 2024. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.119937>
- ADAMS, R. D. e PEPPIATT, N. A. **Stress analysis of adhesive-bonded lap joints.** *Journal of Strain Analysis*, v. 9, n. 3, p. 185–196, 3 Jul 1974. <http://dx.doi.org/10.1243/03093247V093185>
- ADAMS, R. D. e WAKE, W. C. **Structural Adhesive Joints in Engineering.** Springer Netherlands, 1984. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-5616-2>
- ÁGORIS. **Telecomunicaciones.** Disponível em: <https://www.agoris.com.mx/>. Acesso em: 04 fev. 2024.
- ALI, Mubasher; SARI, Resy Kumala; SAJJAD, Uzair; SULTAN, Muhammad; ALI, Hafiz Muhammad. **Effect of annealing on microstructures and mechanical properties of PA-12 lattice structures proceeded by multi jet fusion technology.** *Additive Manufacturing*, [S.L.], v. 47, p. 102, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2021.102285>.
- ALLMAN, D. J., **A theory for the elastic stresses in adhesive bonded lap joints.** *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, v. 30, p. 415–436, Nov 1997 <https://doi.org/10.1093/qjmam/30.4.415>
- ALTAIR. **5X FASTER STEEL CONNECTION ANALYSIS.** 2019a. Disponível em: [https://altair.com/docs/default-source/resource-library/sim\\_customerstory\\_som\\_letter.pdf?sfvrsn=6e119522\\_1](https://altair.com/docs/default-source/resource-library/sim_customerstory_som_letter.pdf?sfvrsn=6e119522_1). Acesso em: 04 jun. 2023.
- ALTAIR. **DRIVING AEROSPACE COMPETITIVENESS.** 2019c. Disponível em: [https://resources.altair.com/resfile\\_web\\_path/file-en/SIM\\_CustomerStory\\_INESPASA\\_Letter.20211028145315616.pdf](https://resources.altair.com/resfile_web_path/file-en/SIM_CustomerStory_INESPASA_Letter.20211028145315616.pdf). Acesso em: 05 jun. 2023.
- ALTAIR. **Using Altair SimSolid for Bone Biomechanic.** 2019b. Disponível em: [https://altair.com/docs/default-source/resource-library/hw\\_0002\\_005\\_customerstory\\_rothmcfarlane\\_letter6d66dd9c-55bc-4758-af70-e33198b3cb6e.pdf?sfvrsn=2e836af\\_3](https://altair.com/docs/default-source/resource-library/hw_0002_005_customerstory_rothmcfarlane_letter6d66dd9c-55bc-4758-af70-e33198b3cb6e.pdf?sfvrsn=2e836af_3). Acesso em: 05 jun. 2023.

- AHMAD, F., AL AWADH, M. e NOOR, S.. **Optimum alternate material selection methodology for an aircraft skin.** *Chinese Journal of Aeronautics*, v. 36, n. 7, p. 476–488, 1 Jul 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.05.019>.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1002-99: Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal).** 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638-10: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.** 2015.
- ANTELO, J.; AKHAVAN-SAFAR, A.; CARBAS, R.J.C.; MARQUES, E.A.s.; GOYAL, R.; SILVA, L.F.M. da. **Replacing welding with adhesive bonding: an industrial case study.** *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, v. 113, p. 103064, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.103064>.
- APANOVITCH, V. **Using altair simsolid technology overview.** Altair, 2019.
- APANOVITCH, V. **The Method of external finite element approximations.** Independently published, 2021.
- ARANDJELOVIC, Mihajlo *et al.* **Failure analysis of welded joint with multiple defects by extended Finite Element Method and Engineering Critical Analysis.** *Engineering Failure Analysis*, [S.L.], v. 160, p. 108176, jun. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108176>.
- ARCHELLO. **Corporativo Antara II.** 2023. Disponível em: <https://archello.com/pt/project/corporativo-antara-ii>. Acesso em: 26 fev. 2024.
- ARIA, M. e CUCCURULLO, C. **Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis.** *Journal of Informetrics*, v. 11, n. 4, p. 959–975, 1 Nov 2017. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- BARBOSA, João Paulo. **Elementos de máquinas.** São Mateus: Independente, 2011. 214 p.
- BEARDMORE, P e JOHNSON, C. F. **The Potential for Composites in Structural Automotive Applications.** *Composites Science and Technology*, v. 26, p. 251–281, 1986. [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(86\)90002-3](https://doi.org/10.1016/0266-3538(86)90002-3)
- BELAASILIA, Youssef *et al.* **A numerical mesh-free model for elasto-plastic contact problems.** *Engineering Analysis With Boundary Elements*, [S.L.], v. 82, p. 68-78, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enganabound.2017.05.010>.
- BELINHA, J. **Meshless Methods in Biomechanics - Bone Tissue Remodelling Analysis.** p. 320, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06400-0>
- BELYTSCHKO, T., LU, Y. Y. e GU, L. **Element-free Galerkin methods.** *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 37, n. 2, p. 229–256, 30 Jan 1994. <https://doi.org/10.1002/nme.1620370205>

- BUDHE, S.; BANEJA, M.D.; BARROS, S. de; SILVA, L.F.M. da. **An updated review of adhesively bonded joints in composite materials.** *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, [S.L.], v. 72, p. 30-42, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.10.010>.
- CAMPILHO, R.D.s.G. et al. **Optimization study of hybrid spot-welded/bonded single-lap joints.** *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, [S.L.], v. 37, p. 86-95, set. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.01.018>.
- CARNEIRO NETO, R. M., SAMPAIO, E. M. e ASSIS, J. T. **Numerical and experimental analysis of bonded joints with combined loading.** *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 90, p. 61–70, Abr 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.02.002>
- CASTRO, B. D., MAGALHÃES, F. C. e RUBIO, J. C. C. **Numerical analysis of damage mechanisms for 3D-printed sandwich structures using a meshless method.** *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, v. 30, n. 5, p. 055003, 18 Maio 2022. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-651X/ac6cfc>.
- CHEN, Jiun-Shyan et al. **Meshfree Methods: progress made after 20 years.** *Journal Of Engineering Mechanics*, [S.L.], v. 143, n. 4, p. 10-28, abr. 2017. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)em.1943-7889.0001176](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)em.1943-7889.0001176)..
- CHEN, D. e CHENG, S. **An analysis of adhesive-bonded single-lap joints.** *Journal of Applied Mechanics*, v. 50, p. 109 – 115, Mar 1983. <https://doi.org/10.1115/1.3166976>
- CHEN, J. S., HILLMAN, M. e CHI, S. W. **Meshfree Methods: Progress Made after 20 Years.** *Journal of Engineering Mechanics*, v. 143, n. 4, p. 04017001, 23 Jan 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001176](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001176)
- COGNARD, P. **Handbook of Adhesives and Sealants.** Versailles: Philippe Cognard. 492 p. 2005
- DILLARD, D. A. **Advances in Structural Adhesive Bonding.** *Elsevier*, v. 2 Ed. 2023. <http://dx.doi.org/10.1533/9781845698058>
- DONTHU, N., KUMAR, S. e PANDEY, N. **Research Constituents, Intellectual Structure, and Collaboration Patterns in Journal of International Marketing: An Analytical Retrospective.** *Journal of International Marketing*, v. 29, n. 2, p. 1–25, 1 Jun 2021. <https://doi.org/10.1177/1069031X211004234>
- DONTHU, N., KUMAR, S. e PANDEY, N. **A retrospective evaluation of Marketing Intelligence and Planning: 1983–2019.** *Marketing Intelligence and Planning*, v. 39, n. 1, p. 48–73, 30 Jan 2021. <https://doi.org/10.1108/MIP-02-2020-0066>
- DOW AUTOMOTIVE, **Technical Datasheet: Betamate 2096.** Dow Europe GmbH, 2021.
- EBNESAJJAD, S. e LANCK, A. H. **Adhesives technology handbook**, *Elsevier*, 3 Ed., 2014.
- ERHARD, G. **Designing with plastics.** *Hanser*, 2006.

- FORS: Fredrik. Analysis of Metal to Composite Adhesive Joints in Space Applications. 2010. 115 f. TCC (Graduação) - Curso de Institute Of Economic And Industrial Development: Universidade de Linköping: Linköping: 2010.
- FALSAFI, Afshin. **The science and mechanics of adhesion: an industrial view.** *Dental Materials*, [S.L.], v. 39, n. 8, p. 682-685, ago. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dental.2023.06.001>.
- FARIA, A. *et al.* **Novel Mechanical Characterization Method Applied to Non-Structural Adhesives: Adherend Material Sensitivity.** *Journal on Mechanics of Solids*, v. 1, n. 1, p. 25–30, 11 Nov 2022. [https://doi.org/10.24840/2975-8262\\_001-001\\_001799](https://doi.org/10.24840/2975-8262_001-001_001799)
- FAYAZBAKHS, K. e ABEDIAN, A. **Materials selection for applications in space environment considering outgassing phenomenon.** *Advances in Space Research*, v. 45, n. 6, p. 741–749, 15 Mar 2010. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.11.017>
- FEITO, D. Á. **Fracture mechanics of carbon fibre reinforced plastics to ti-alloy adhesive joints.** 2012. 148 f. Tese (Doutorado) - Curso de Mechanics Of Materials, Department Of Mechanical Engineering, Imperial College London, London, 2012.
- GAJEWSKI, J., GOLEWSKI, P. e SADOWSKI, T. **The Use of Neural Networks in the Analysis of Dual Adhesive Single Lap Joints Subjected to Uniaxial Tensile Test.** *Materials (Basel, Switzerland)*, v. 14, n. 2, p. 1–17, 2 Jan 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14020419>
- GINGOLD, R. A. e MONAGHAN, J. J. **Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and Application to Non-Spherical Stars.** *Monthly Notices Of The Royal Astronomical Society*, v. 181, n. 3, p. 375-389, 1 dez. 1977. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/181.3.375>.
- GLOBE NEWSWIRE. **Structural Adhesives Market to Hit USD 22.1 billion by 2031, at a CAGR 6.9% | Says Transparency Market Research, Inc.** 2023.
- GOLAND, M. e REISSNER, E. **The Stresses in Cemented Joints.** *Journal of Applied Mechanics*, v. 11, n. 1, p. A17–A27, 1 Mar 1944. <https://dx.doi.org/10.1115/1.4009336>
- GOYAL, Vijay; GOYAL, Vinay. **Solutions to Engineering Problems Using Finite Element Methods.** Geogia: Advanced Engineering Instructional Services, 2022.
- GRAMES, E. M. *et al.* **An automated approach to identifying search terms for systematic reviews using keyword co-occurrence networks.** *Methods in Ecology and Evolution*, v. 10, n. 10, p. 1645–1654, 1 Out 2019. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13268>
- GUI-RONG, Liu. **MESHFREE METHODS: moving beyond the finite element method.** 2. ed. Miami: Taylor & Francis Group, 2009.
- HARPER, C. A. **Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites.** *The McGraw-Hill Companies.* 4 Ed., 2002.
- HART-SMITH, L. J., **Adhesive-bonded double lap joints.** NASA CR 112236, Douglas Aircraft Company, Long Beach. 1973

- HE, Xiacong. **A review of finite element analysis of adhesively bonded joints.** *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, [S.L.], v. 31, n. 4, p. 248-264, jun. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.01.006>.
- JANG, Y. Y. *et al.* **Dissimilar material bonding technology for lightweight future mobility: A review.** *Polymer Testing*. v. 129, Dez 2023 <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108281>
- JOSHI, Durgesh; RAVI, Bhallamudi. **Quantifying the Shape Complexity of Cast Parts.** *Computer-Aided Design And Applications*, [S.L.], v. 7, n. 5, p. 685-700, jan. 2010. CAD Solutions, LLC. <http://dx.doi.org/10.3722/cadaps.2010.685-700>.
- KHAN, Sabih Ahmad; IQBAL, Mazhar; MEHMOOD, Zahid; AFSHAN, Zar. **Numerical Analysis of Static Strength Riveted, Adhesive and Hybrid Joints.** *International Conference On Applied And Engineering Mathematics (Icaem)*, [S.L.], , 30 ago. 2021. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/icaem53552.2021.9547157>.
- KILIC, Suleyman; OZTURK, Fahrettin; DEMIRDOGEN, Mehmet Fatih. **A comprehensive literature review on friction stir welding: process parameters, joint integrity, and mechanical properties.** *Journal Of Engineering Research*, [S.L.], set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jer.2023.09.005>.
- KRISHNAN, K. S. G., BERTRAM, O. e SEIBEL, O. **Review of hybrid laminar flow control systems.** *Progress in Aerospace Sciences*. v. 93, p. 24–52, Ago 2017. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.05.005>
- LAGAROS, N. D. e KARLAFTIS, M. G. **Lifecycle cost structural design optimization of steel wind towers.** *Computers & Structures*, v. 174, p. 122–132, 1 Out 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.09.013>
- LI, Dezhi; CHRYSANTHOU, Andreas; PATEL, Imran; WILLIAMS, Geraint. **Self-piercing riveting-a review.** *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, [S.L.], v. 92, n. 5-8, p. 1777-1824, 20 mar. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-0156-x>.
- LIU, G. R. **An Overview on Meshfree Methods: For Computational Solid Mechanics.** *International Journal of Computational Methods*, v. 13, n. 5, 31 Ago 2016. <https://doi.org/10.1142/S0219876216300014>
- LIU, G.R.; GU, Y.T.. **An Introduction to Meshfree Methods and Their Programming.** New York: Springer, 2005.
- LIU, J. *et al.* **Robotic assisted vaginal natural orifice transluminal endoscopic surgery high uterosacral ligament suspension (NOTES-HUS) for uterine prolapse with and without uterine preservation.** *Intelligent Surgery*, v. 3, p. 14–15, 1 Jun 2022. <https://doi.org/10.1016/j.isurg.2022.05.003>

- LIU, W. K. *et al.* **Overview and applications of the reproducing Kernel Particle methods.** *Archives of Computational Methods in Engineering*, v. 3, n. 1, p. 3–80, Mar 1996. <https://doi.org/10.1007/BF02736130>
- LIU, Zheng *et al.* **A developed fatigue analysis approach for composite wind turbine blade adhesive joints using finite-element submodeling technique.** *Engineering Failure Analysis*, [S.L.], v. 164, p. 108701, out. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108701>.
- MORDOR INTELLIGENCE. **Mercado de adesivos e selantes automotivos - tamanho e análise de participação - tendências e previsões de crescimento até 2028.** 2024. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/automotive-adhesives-and-sealants-market>. Acesso em: 03 fev. 2024.
- MURTY, M. K. S. **Structural engineering institute. Task committee on the dynamic response of lattice towers.** *Dynamic response of lattice towers and guyed masts*. p. 266, 2002.
- NAYROLES, B., TOUZOT, G. e VILLON, P. **Generalizing the finite element method: Diffuse approximation and diffuse elements.** *Computational Mechanics*, v. 10, n. 5, p. 307–318, 1992. <https://doi.org/10.1007/BF00364252>
- OJALVO, I. e EIDINOFF, H. **Bond thickness effects upon stresses in single-lap adhesive joints.** *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*. V. 86, p. 347 - 356. 1978
- OLIVEIRA, T. S. **Método Sem Malha local-colocação na forma fraca em elasticidade linear.** 2016. Tese (Doutorado)- Curso De Estruturas E Construção Civil Departamento De Engenharia Civil E Ambiental, UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, BRASÍLIA, 2016.
- OÑATE, E. e IDELSOHN, S. **A mesh-free finite point method for advective-diffusive transport and fluid flow problems.** *Computational Mechanics*, v. 21, n. 4–5, p. 283–292, 25 maio 1998. <https://doi.org/10.1007/s004660050304>
- PRADHAN, Karan Kumar *et al.* **Finite Element Method.** *Computational Structural Mechanics*, [S.L.], p. 25-28, 2019. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-815492-2.00010-1>.
- PEREIRA, P. L. *et al.* **Bibliometric analysis for simulating the behavior of adhesives using the meshless method.** 2022. <https://doi.org/10.5151/siintec2022-241204>
- PEREIRA, T. F. C. *et al.* **Cohesive zone parameter influence on the impact strength of composite adhesive joints.** Elsevier B.V. p. 14–23, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.05.004>
- PERTICARRARI, Amanda Liz Pacífico Manfrim. **Testes de Comparação de Médias.** São Paulo: Unesp, 2007. 27 slides, color.
- PETRIE, E. M. **Handbook of Adhesives and Sealants.** *McGraw Hill*, 2ª ed., 2007.
- PIZZI, A. e MITTAL, K. L. **Handbook of Adhesive Technology.** *CRC Press*, 3ª Ed. ed. CRC Press, 2017.

- POCIUS, A. V. **Adhesion and Adhesives Technology: An Introduction**. 4. ed., 2021. v. 4. <https://doi.org/10.3139/9783446431775>
- PORTELA, A. e CHARAFI, A. **Finite Elements Using Maple**. *A Symbolic Programming Approach*, oct 2022. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-55936-5>
- R7. **Airbus Commercial e Altair Simsolid fazem parceria por aeronaves sustentáveis**. 2023. Disponível em: <https://noticias.r7.com/prisma/luiz-fara-monteiro/airbus-commercial-e-altair-simsolid-fazem-parceria-por-aeronaves-sustentaveis-02022023/>. Acesso em: 08 dez. 2023.
- GOYAL, Vijay; GOYAL, Vinay. **Solutions to Engineering Problems Using Finite Element Methods**. Geogia: Advanced Engineering Instructional Services, 2022.
- REIS, M. e VALE, A. Q. **Método BiLi - Uma otimização para revisão bibliográfica e literária**. 2021. Disponível em: <https://github.com/Brazilian-Institute-of-Robotics/bir-mini-bili-method>. Acesso em: 04 mar. 2023.
- RESENDE, R. F. P. *et al.* **Meshless approach to material plasticity in adhesive joints**. *Procedia Structural Integrity*. v. 33, p. 126-137, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.10.017>
- RIBEIRO, M. L. **Programa para análise de juntas coladas: compósito/compósito e metal/compósito**. 2009. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2009.
- SÁNCHEZ-ARCE, I. J. *et al.* **Analyzing single-lap joints bonded with a brittle adhesive by an elastic meshless method**. *Procedia Structural Integrity*, v. 28, p. 1084–1093, 1 Jan 2020. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.123>
- SCHOLLMAYER, Martin. *Through-Thickness Performance of Adhesive Connections Between FRP Bridge Decks and Steel Main Girders*. 218 f. Tese (Doutorado) - Curso de Sciences, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2009.
- SCHWEITZER, M. A. **Partition of Unity Method**. In: SCHWEITZER, Marc Alexander (org.). *A Parallel Multilevel Partition of Unity Method for Elliptic Partial Differential Equations*. A: Springer, p. 13-22. 2003 <https://doi.org/10.1007/978-3-642-59325-3>
- SHRIVASTAVA: Anshuman. *Introduction to Plastics Engineering*.: William Andrew: 2018.
- Singiresu, S. R. **The Finite Element Method in Engineering**. 6. ed., 2018. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01493-6>
- SOUTIS, C. **Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction**. *Materials Science and Engineering A*, v. 412, p. 171–176, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.064>
- SILVA, L. F. M., ADAMS, R. D. e ÖCHSNER, A. **Handbook of Adhesion Technology**. P. 430, 2. ed., Springer, 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-55411-2>

- SILVA, L. F. M. e CAMPILHO, R. D. S. G. **Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints.** *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*, v. 9, n. 3, p. 1–93, 1 Oct 2012. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-23608-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23608-2_1)
- SILVA, L. F. M. *et al.* **Analytical Modelling for the Single-Lap Joint. Strength Prediction of Adhesively Bonded Joints.** 1° ed. CRC Press. p. 8–46, 2017
- SILVA, L. F. M. *et al.* **Analytical models of adhesively bonded joints-Part I: Literature survey.** *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 29, n. 3, p. 319–330, Abr 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.06.005>
- SUKUMAR, N., MORAN, B. e BELYTSCHKO, T. **The natural element method in solid mechanics.** *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 43, n. 5, p. 839–887, 15 Nov 1998. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0207\(19981115\)43:5<839::AID-NME423>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(19981115)43:5<839::AID-NME423>3.0.CO;2-R)
- TAN, Lisa Jiaying; ZHU, Wei; ZHOU, Kun. **Recent Progress on Polymer Materials for Additive Manufacturing.** *Advanced Functional Materials*, [S.L.], v. 30, n. 43, p., 6 ago. 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/adfm.202003062>.
- TAIB, A. A. *et al.* **Bonded joints with composite adherends. Part I. Effect of specimen configuration, adhesive thickness, spew fillet and adherend stiffness on fracture.** *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 26, n. 4, p. 226–236, Jul 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2005.03.015>
- TSAI, C. L. *et al.* **Analysis of cohesive failure in adhesively bonded joints with the SSPH meshless method.** *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 51, p. 67–80, 1 Jun 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.02.009>
- TSAI, M. Y., OPLINGER, D.W. e MORTON, J. **Improved theoretical solutions for adhesive lap joints.** *International Journal of Solids and Structures*, v. 35, n. 12, p. 1163–1185, Abr 1998. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(97\)00097-8](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(97)00097-8)
- UPADHYAY, B. D., SONIGRA, S. S. e DAXINI, S. D. **Numerical analysis perspective in structural shape optimization: A review post 2000.** *Advances in Engineering Software*, v. 155, 2021a. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2021.102992>.
- VALENTE, J. P. A. *et al.* **Adhesive joint analysis under tensile impact loads by cohesive zone modelling.** *Composite Structures*, v. 222, 15 Ago 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110894>
- VERMA, S. e GUSTAFSSON, A. **Investigating the emerging COVID-19 research trends in the field of business and management: A bibliometric analysis approach.** *Journal of Business Research*, v. 118, p. 253–261, 1 Set 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.06.057>
- VOLKERSEN O. **Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten.** *Luftfahrtforschung*, p. 41–47, 1938.

- WAKE, W. C. **Theories of adhesion and uses of adhesives: a review.** *Polymer*, v. 19, n. 3, p. 291–308, 1 Mar 1978. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(78\)90223-9](https://doi.org/10.1016/0032-3861(78)90223-9)
- WANG, A. *et al.* **Surface pretreatments on CFRP and titanium for manufacturing adhesively bonded bi-material joints.** p. 24–28, 2020.
- WANG, H. e QIN, Q. H. **Methods of Fundamental Solutions in Solid Mechanics.** *Elsevier*, 2019.
- WANG, J. G. e LIU, G. R. **A point interpolation meshless method based on radial basis functions.** *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 54, n. 11, p. 1623–1648, 20 Ago 2002. <https://doi.org/10.1002/nme.489>
- WANG, W. *et al.* **Predicting the influence of discretely notched layers on fatigue crack growth in fibre metal laminates.** *Engineering Fracture Mechanics*, v. 145, p. 1-14, ago. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.06.062>
- WANG, W., RANS, C. e BENEDICTUS, R. **Analytical prediction model for non-symmetric fatigue crack growth in Fibre Metal Laminates.** *International Journal Of Fatigue*, v. 103, p. 546-556, out. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.06.035>
- WEI, Y. *et al.* **Adhesively bonded joints-A review on design, manufacturing, experiments, modeling and challenges.** *Composites Part B*, v. 276, p. 111225, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111225>
- WEST, P. **GitHub - FlamingTempura/bibtex-tidy: Cleaner and Formatter for BibTeX files.** Disponível em: <https://github.com/FlamingTempura/bibtex-tidy>. Acesso em: 20 jun. 2022.
- YAKUPOV, S. N. *et al.* **A new variant of the fem for evaluation the strenght of structures of complex geometry with heterogeneous material structure.** *Case Studies in Construction Materials*, v. 19, 1 Dez 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02360>
- YAZDI, H. A., HASHEMI, J. e GAD, E. **Seismic fragility assessment of non-structural drywall partitions with screw and adhesive fixing through multi-axis cyclic testing.** *Thin-Walled Structures*, v. 176, 1 Jul 2022. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109303>
- ZHANG, L.W., ADEMILOYE, A. S. e LIEW, K. M. **Meshfree and Particle Methods in Biomechanics: Prospects and Challenges.** *Archives Of Computational Methods In Engineering*, v. 26, n. 5, p. 1547-1576, 6 set. 2018. <http://dx.doi.org/10.1007/s11831-018-9283-2>.
- YUAN, Huang; XU, Yangjian. **Computational fracture mechanics assessment of adhesive joints.** *Computational Materials Science*, [S.L.], v. 43, n. 1, p. 146-156, jul. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2007.07.053>.
- YUAN, Shangqin; SHEN, Fei; CHUA, Chee Kai; ZHOU, Kun. **Polymeric composites for powder-based additive manufacturing: materials and applications.** *Progress In Polymer Science*, [S.L.], v. 91, p. 141-168, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.11.001>.

YUQIAO, Z. e KEDWARD, K. **Methods of Analysis and Failure Predictions for Adhesively Bonded Joints of Uniform and Variable Bondline Thickness.** *U.S. Department Of Transportation Federal Aviation Administration.* Springfield: Federal Aviation Administration, 2005

ZHU, Yuqiao; KEDWARD, Keith. **Methods Of Analysis And Failure Predictions For Adhesively Bonded Joints Of Uniform And Variable Bondline Thickness.** California: Department Of Mechanical & Environmental Engineering, 2005.

## Apêndice A

### Memorial de cálculo do modelo de Volkersen

$$E := 71,7 \text{ GPa}$$

$$F := 1000 \text{ psi}$$

$$Ea := 4,14 \text{ GPa}$$

$$tt := 0,064 \text{ in}$$

$$ta := 0,01 \text{ in}$$

$$tb := 0,064 \text{ in}$$

$$b := 1 \text{ in}$$

$$l := 0,5 \text{ in}$$

$$va := 0,4$$

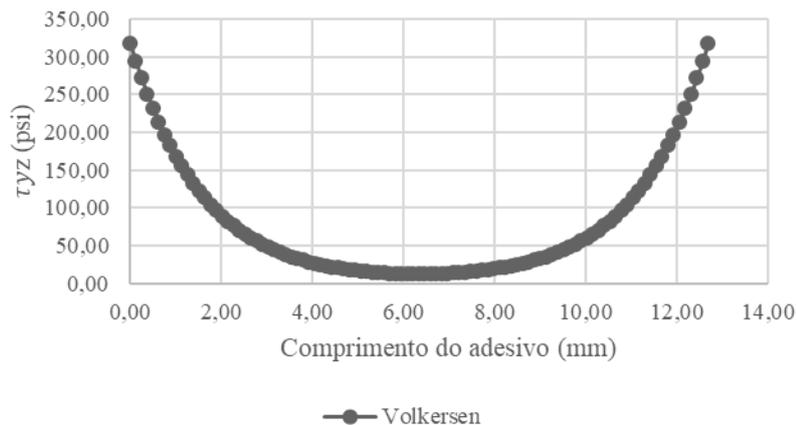
$$P := F \cdot b \cdot ta = 10 \text{ lbf}$$

$$Ga := \frac{Ea}{2 \cdot (1 + va)} = 1,4786 \text{ GPa}$$

$$\omega := \sqrt{\left( \frac{Ga}{E \cdot tt \cdot ta} \cdot \left( 1 + \frac{tt}{tb} \right) \right)} = 8,0276 \frac{1}{\text{in}}$$

$$\tau_{xy} := \frac{P \cdot \omega}{2 \cdot b \cdot l} \cdot \frac{\cosh\left(\frac{\omega \cdot x}{l}\right)}{\sinh\left(\frac{\omega}{2}\right)} + \left( \frac{tt - tb}{tt + tb} \right) \cdot \left( \frac{\omega}{2} \right) \cdot \frac{\sinh\left(\frac{\omega \cdot x}{l}\right)}{\cosh\left(\frac{\omega}{2}\right)}$$

$\tau(yz)$  - Volkersen



## Memorial de cálculo do modelo de Goland & Reissner

$$v_a := 0,4$$

$$E_a := 600000 \text{ psi} = 4,1369 \text{ GPa}$$

$$v := 0,33$$

$$E := 10400000 \text{ psi} = 71,7055 \text{ GPa}$$

$$t := 0,064 \text{ in}$$

$$T := 0,01 \text{ in}$$

$$q := T \cdot b$$

$$F := 1000 \text{ psi}$$

$$b := 1 \text{ in}$$

$$l := 0,5 \text{ in}$$

$$c := \frac{l}{2} = 0,25 \text{ in}$$

$$G_a := \frac{E_a}{2 \cdot (1 + v_a)} = 2,1429 \cdot 10^5 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}$$

$$p := F \cdot T \cdot b = 10 \text{ lbf}$$

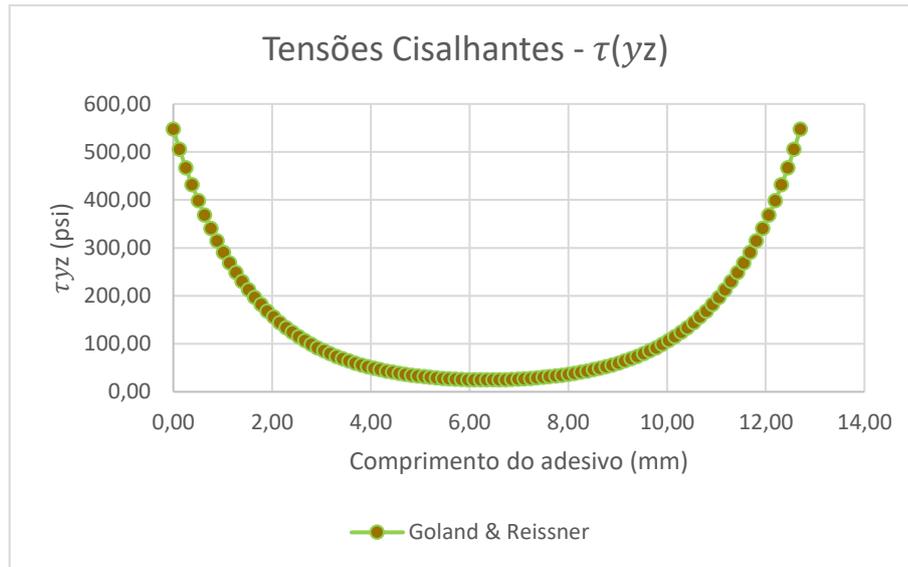
$$P := \frac{p}{b} = 10 \frac{\text{lbf}}{\text{in}}$$

$$\beta := \sqrt{8 \cdot \frac{G_a}{E} \cdot \frac{t}{T}} = 1,0271$$

$$u_2 := \sqrt{\frac{3 \cdot (1 - v^2)}{2}} \cdot \frac{1}{t} \cdot \sqrt{\frac{P}{t \cdot E}} = 0,07 \frac{1}{\text{in}}$$

$$k := \frac{\cosh(u_2 \cdot c)}{\cosh(u_2 \cdot c) + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sinh(u_2 \cdot c)} = 0,9528$$

$$\tau(x) := \frac{P}{8 \cdot c} \cdot \left( \frac{\beta \cdot c}{t} \cdot \left( (1 + 3 \cdot k) \cdot \frac{\cosh\left(\left(\frac{\beta \cdot c}{t}\right) \cdot \left(\frac{x}{c}\right)\right)}{\sinh\left(\frac{\beta \cdot c}{t}\right)} + 3 \cdot (1 - k) \right) \right)$$



$$\lambda := \frac{c}{t} \cdot 4 \sqrt{\frac{6 \cdot Ea \cdot t}{E \cdot T}} = 4,7657$$

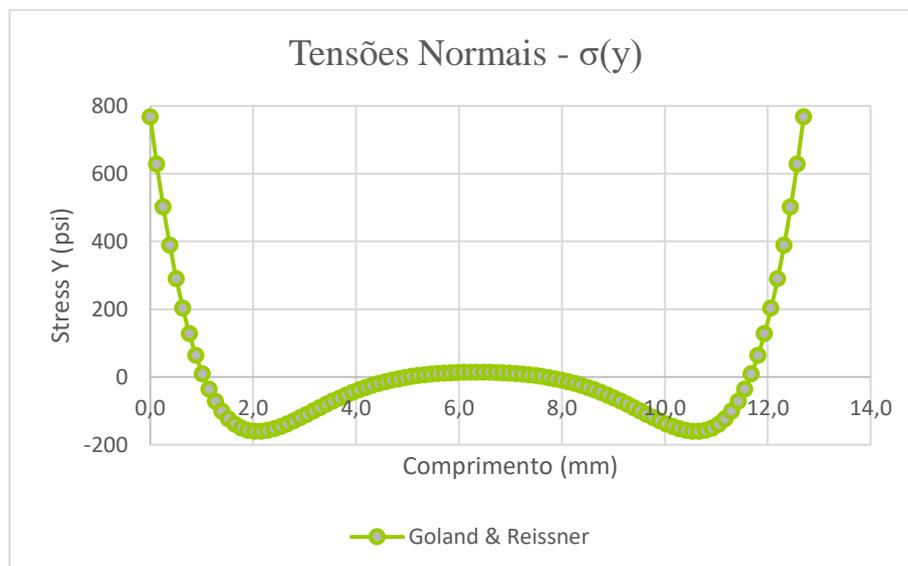
$$k' := \frac{k \cdot c}{t} \cdot \sqrt{3 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{P}{t \cdot E} = 0,0236$$

$$R1 := \cosh(\lambda) \cdot \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cdot \cos(\lambda) = -55,4998$$

$$R2 := \sinh(\lambda) \cdot \cos(\lambda) - \cosh(\lambda) \cdot \sin(\lambda) = 61,7499$$

$$\Delta := \frac{1}{2} \cdot (\sin(2 \cdot \lambda) + \sinh(2 \cdot \lambda)) = 3446,0849$$

$$\sigma(x) := \frac{P \cdot t}{\Delta \cdot c^2} \cdot \left( \left( R2 \cdot \lambda^2 \cdot \frac{k}{2} + \lambda \cdot k' \cdot \cosh(\lambda) \cdot \cos(\lambda) \right) \cdot \cosh\left(\frac{\lambda \cdot x}{c}\right) \cdot \cos\left(\frac{\lambda \cdot x}{c}\right) + \left( R1 \cdot \lambda^2 \cdot \frac{k}{2} + \lambda \cdot k' \cdot \sinh(\lambda) \cdot \sin(\lambda) \right) \cdot \sinh\left(\frac{\lambda \cdot x}{c}\right) \cdot \sin\left(\frac{\lambda \cdot x}{c}\right) \right)$$





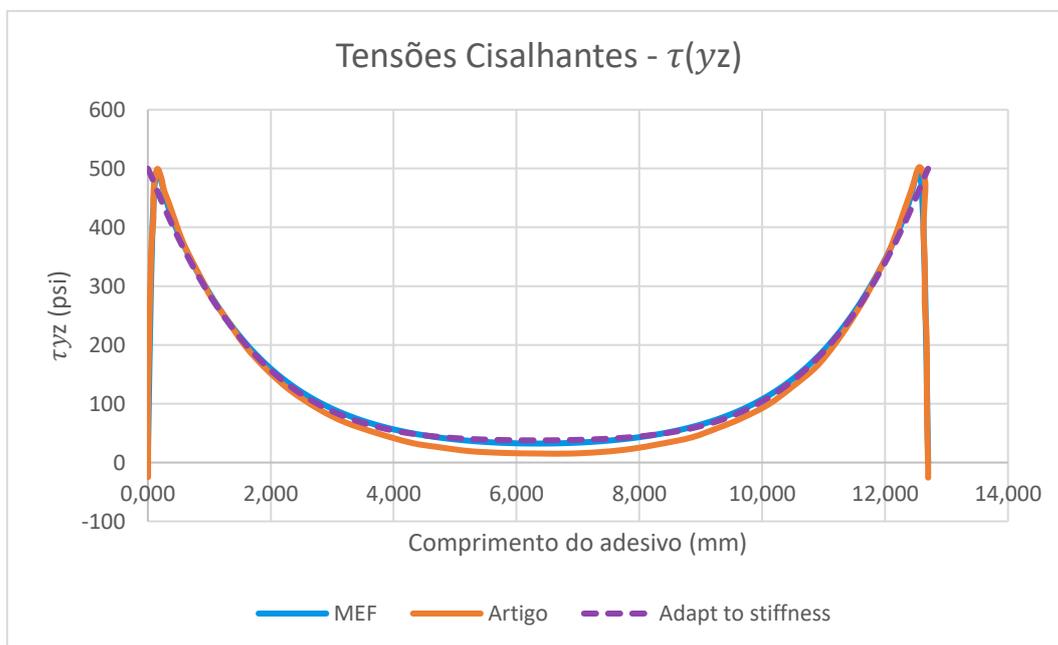
## Apêndice B

### Simulação numérica do modelo de média complexidade

Conforme discutido no Capítulo 4.4.2, o comportamento das curvas de tensões normais e de cisalhamento ao longo da linha média do adesivo foi analisado utilizando diferentes recursos do software de Método Sem Malha, com os recursos mais eficazes sendo detalhados no Capítulo Figura 73. O propósito foi determinar quais ferramentas mais se aproximam das respostas apresentadas por Zhu e Kedward (2005) em seu artigo e pelo modelo desenvolvido através do Método de Elementos Finitos.

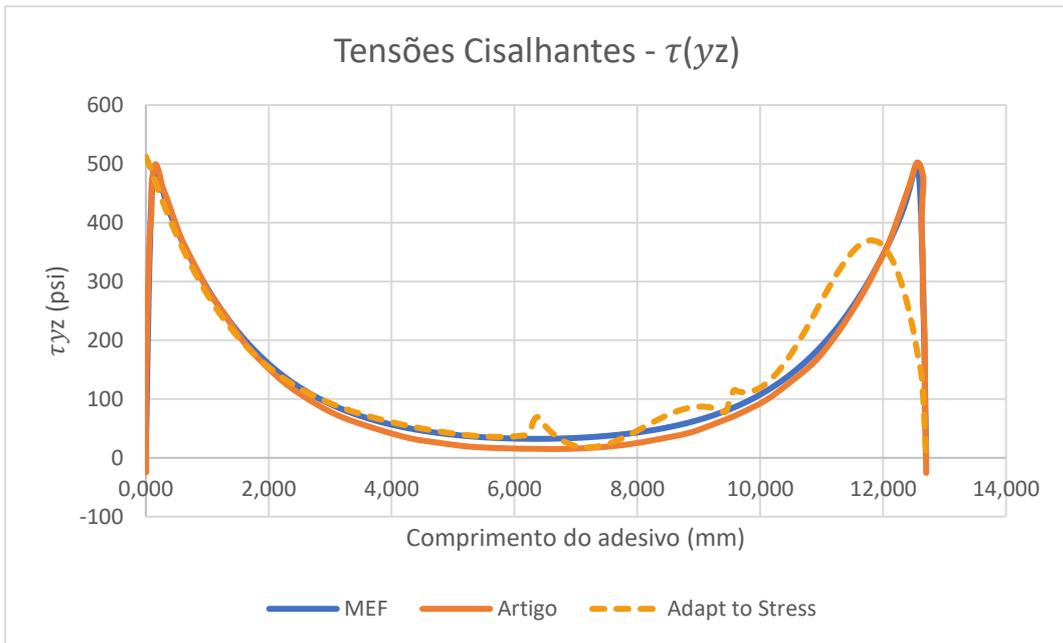
As Figuras 73 a 76 ilustram o comportamento da tensão de cisalhamento. Especificamente, a Figura 74 revela um comportamento assimétrico, sugerindo uma distorção no comportamento do adesivo a partir do ponto médio do seu comprimento (na região entre 6,35 mm até 12,7 mm), o que difere do comportamento esperado. Os demais gráficos exibem um comportamento bastante similar entre si e uma concordância notável com os resultados apresentados por Zhu e Kedward (2005) e pelo modelo em Elementos Finitos.

Figura 73. Tensão de cisalhamento: Comportamento do recurso Adapt for Stiffness.



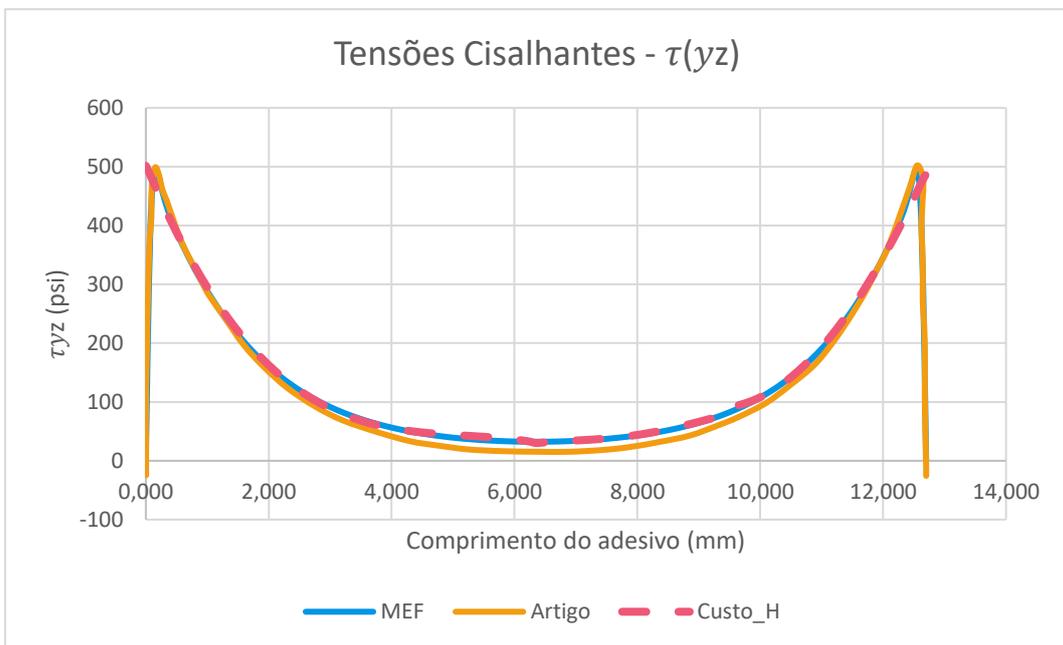
Fonte: Autoria própria.

Figura 74. Tensão de cisalhamento: Comportamento do recurso Adapt to Stress.



Fonte: Autoria própria.

Figura 75. Tensão de cisalhamento: Alto nível de refinamento.



Fonte: Autoria própria.

Figura 76. Tensão de cisalhamento: Alto nível de refinamento e adaptação aos features da peça.

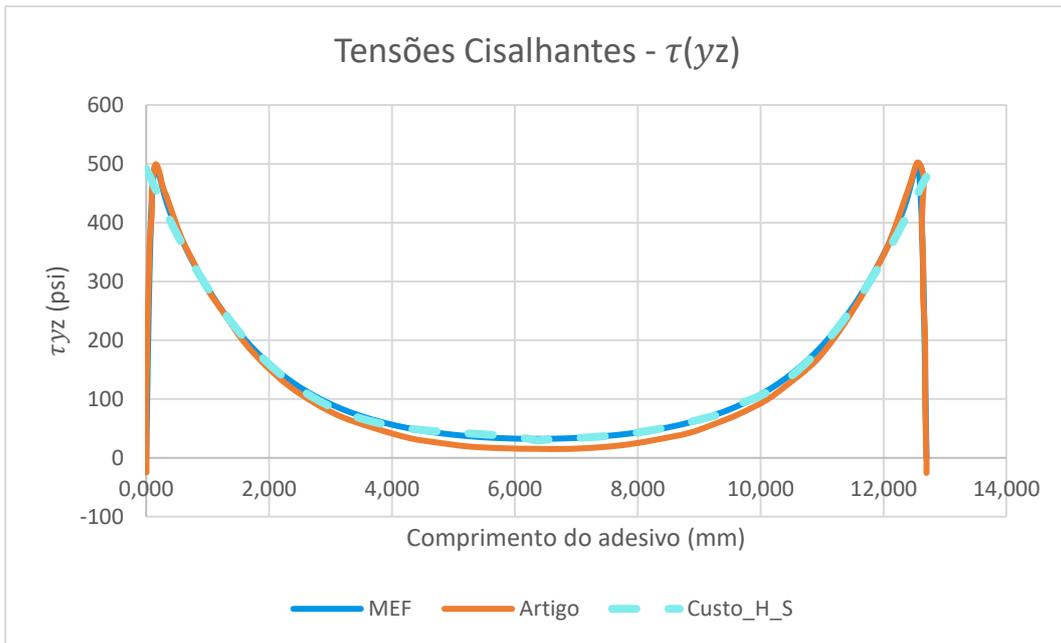


Fonte: Autoria própria.

As Figuras 77 a 80 ilustram o comportamento das tensões normais ao longo da linha média do adesivo. A curva de tensão normal que mais se distanciou do comportamento da curva de base, apresentada na Figura 77 Esta curva mostra uma tensão máxima semelhante ao modelo de referência, mas possui uma inclinação diferente das outras curvas, e os pontos de tensão mínima e da região central também apresentam divergências. A curva de *Adapt to Stress*, na Figura 78, exibe um comportamento bastante próximo ao da curva de referência; contudo, como mencionado anteriormente, apresenta distorções significativas que impactam a previsão do comportamento da tensão de cisalhamento.

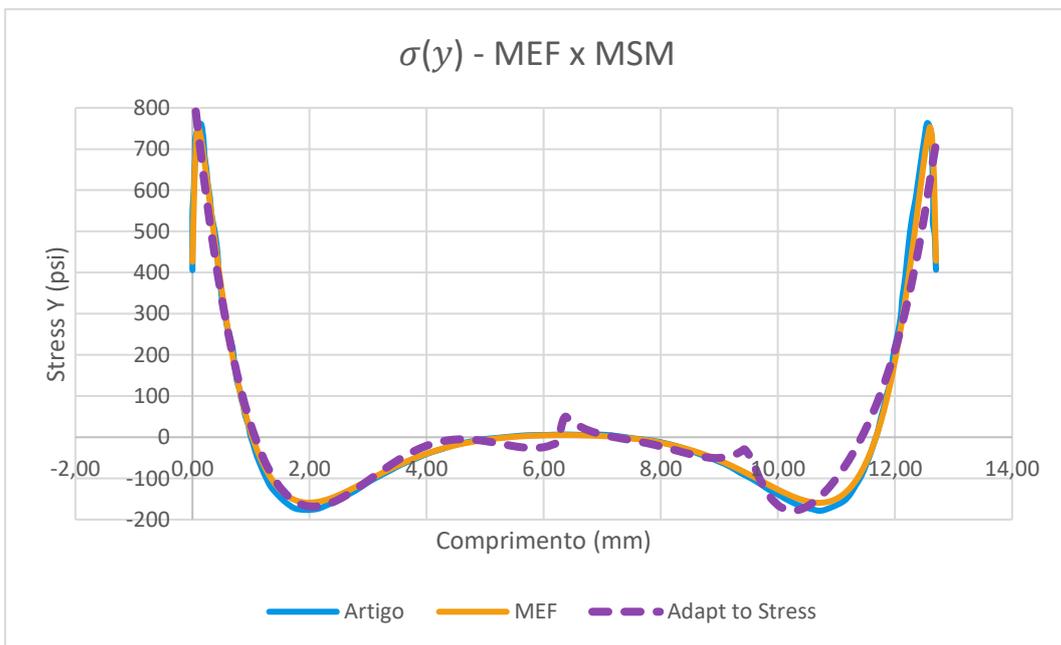
As outras curvas demonstram um comportamento assimétrico, indicando uma distorção no comportamento do adesivo do ponto inicial até o ponto médio de seu comprimento (na região de 0 mm a 6,35 mm), divergindo do comportamento esperado.

Figura 77. Tensão normal: Comportamento do recurso Adapt to Stiffness.



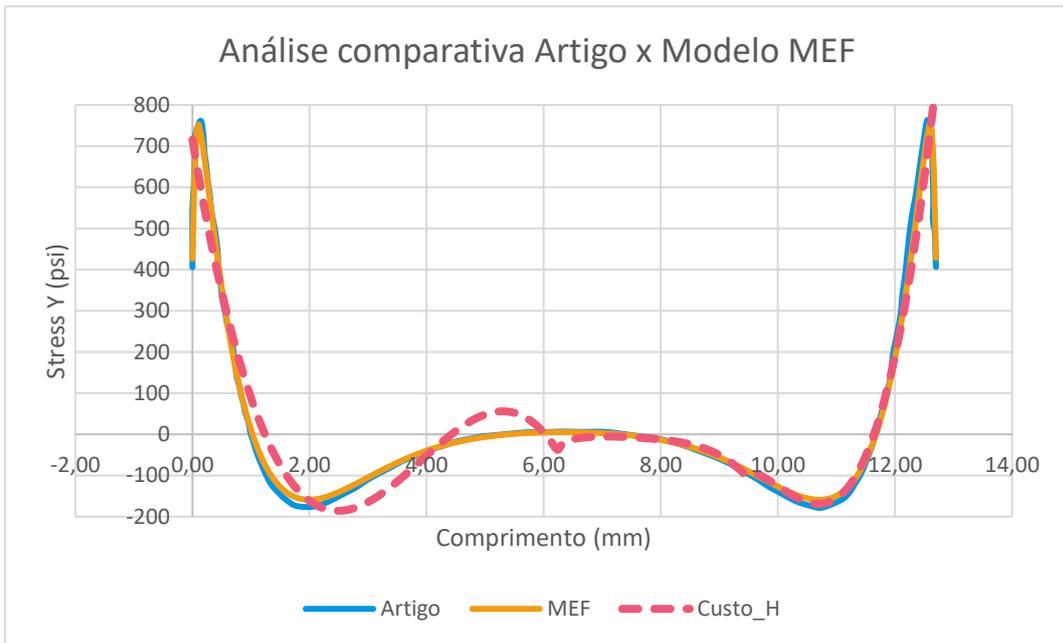
Fonte: Autoria própria.

Figura 78. Tensão normal: Comportamento do recurso Adapt to Stress.



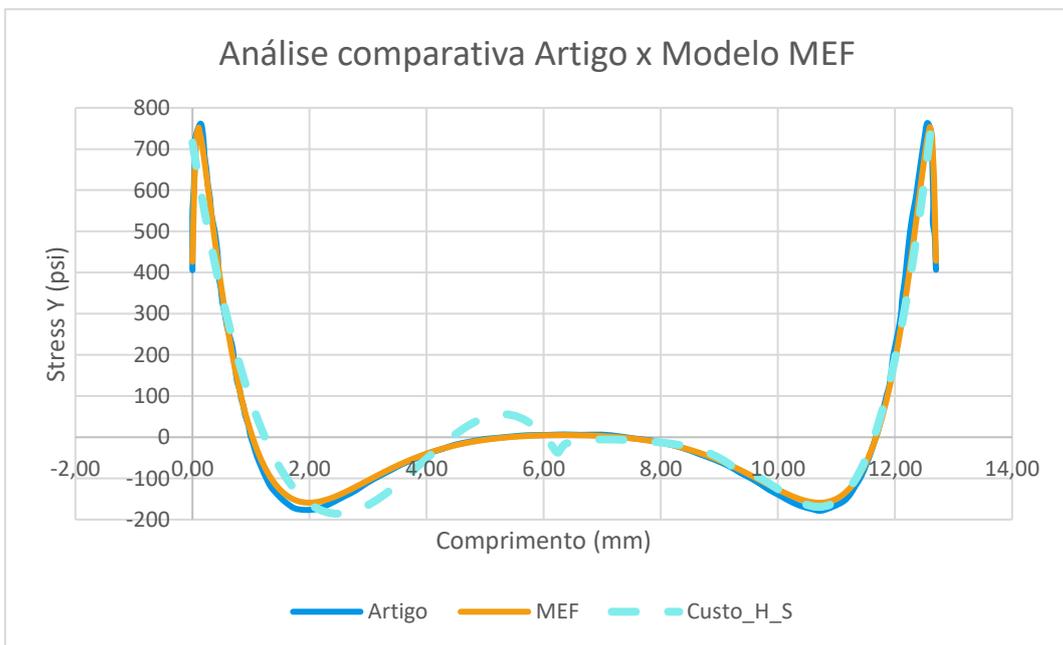
Fonte: Autoria própria.

Figura 79. Tensão normal: Alto nível de refinamento.



Fonte: Autoria própria.

Figura 80. Tensão normal: Alto nível de refinamento e adaptação aos features da peça.



Fonte: Autoria própria.

# Anexos A

Figura 81. Tabela para teste de Tukey

## TESTE DE TUKEY

Tabela 4. Valores da amplitude total estudentizada ( $q$ ), para uso no teste de Tukey, ao nível de 10% de probabilidade.

$n_1$  = número de médias.

$n_2$  = número de graus de liberdade do resíduo.

$n_1 \backslash n_2$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	24	30	40	60	80	100
1	8,93	13,44	16,36	18,49	20,15	21,50	22,64	23,62	24,47	25,24	25,92	26,54	27,10	27,62	28,10	28,54	28,96	29,35	29,71	30,99	32,50	34,38	36,91	38,62	39,91
2	4,13	5,73	6,77	7,54	8,14	8,63	9,05	9,41	9,72	10,01	10,26	10,49	10,70	10,89	11,07	11,24	11,39	11,54	11,68	12,16	12,73	13,44	14,40	15,04	15,52
3	3,33	4,47	5,20	5,74	6,16	6,51	6,81	7,06	7,29	7,49	7,67	7,83	7,98	8,12	8,25	8,37	8,48	8,58	8,68	9,03	9,44	9,95	10,65	11,12	11,48
4	3,01	3,98	4,59	5,03	5,39	5,68	5,93	6,14	6,33	6,49	6,65	6,78	6,91	7,02	7,13	7,23	7,33	7,41	7,50	7,79	8,14	8,57	9,16	9,56	9,86
5	2,85	3,72	4,26	4,66	4,98	5,24	5,46	5,65	5,82	5,97	6,10	6,22	6,34	6,44	6,54	6,63	6,71	6,79	6,86	7,12	7,43	7,82	8,35	8,71	8,99
6	2,75	3,56	4,07	4,44	4,73	4,97	5,17	5,34	5,50	5,64	5,76	5,87	5,98	6,07	6,16	6,25	6,32	6,40	6,47	6,71	7,00	7,36	7,85	8,18	8,44
7	2,68	3,45	3,93	4,28	4,55	4,78	4,97	5,14	5,28	5,41	5,53	5,64	5,74	5,83	5,91	5,99	6,06	6,13	6,19	6,42	6,69	7,04	7,50	7,82	8,06
8	2,63	3,37	3,83	4,17	4,43	4,65	4,83	4,99	5,13	5,25	5,36	5,46	5,56	5,64	5,72	5,80	5,87	5,93	6,00	6,21	6,47	6,80	7,25	7,55	7,78
9	2,59	3,32	3,76	4,08	4,34	4,54	4,72	4,87	5,01	5,13	5,23	5,33	5,42	5,51	5,58	5,65	5,72	5,79	5,85	6,06	6,31	6,62	7,05	7,34	7,57
10	2,56	3,27	3,70	4,02	4,26	4,47	4,64	4,78	4,91	5,03	5,13	5,23	5,32	5,40	5,47	5,54	5,61	5,67	5,73	5,93	6,17	6,48	6,89	7,18	7,40
11	2,54	3,23	3,66	3,96	4,20	4,40	4,57	4,71	4,84	4,95	5,05	5,15	5,23	5,31	5,38	5,45	5,51	5,57	5,63	5,83	6,06	6,36	6,77	7,05	7,26
12	2,52	3,20	3,62	3,92	4,16	4,35	4,51	4,65	4,78	4,89	4,99	5,08	5,16	5,24	5,31	5,37	5,44	5,49	5,55	5,74	5,98	6,27	6,66	6,94	7,14
13	2,50	3,18	3,59	3,88	4,12	4,30	4,46	4,60	4,72	4,83	4,93	5,02	5,10	5,18	5,25	5,31	5,37	5,43	5,48	5,67	5,90	6,19	6,57	6,84	7,04
14	2,49	3,16	3,56	3,85	4,08	4,27	4,42	4,56	4,68	4,79	4,88	4,97	5,05	5,12	5,19	5,26	5,32	5,37	5,43	5,61	5,84	6,12	6,50	6,76	6,96
15	2,48	3,14	3,54	3,83	4,05	4,23	4,39	4,52	4,64	4,75	4,84	4,93	5,01	5,08	5,15	5,21	5,27	5,32	5,38	5,56	5,78	6,06	6,43	6,69	6,89
16	2,47	3,12	3,52	3,80	4,03	4,21	4,36	4,49	4,61	4,71	4,80	4,89	4,97	5,04	5,11	5,17	5,23	5,28	5,33	5,51	5,73	6,00	6,38	6,63	6,82
17	2,46	3,11	3,50	3,78	4,00	4,18	4,33	4,46	4,58	4,68	4,77	4,86	4,93	5,01	5,07	5,13	5,19	5,24	5,30	5,47	5,69	5,96	6,32	6,58	6,77
18	2,45	3,10	3,49	3,77	3,98	4,16	4,31	4,44	4,55	4,65	4,75	4,83	4,90	4,97	5,04	5,10	5,16	5,21	5,26	5,44	5,65	5,92	6,28	6,53	6,72
19	2,45	3,09	3,47	3,75	3,97	4,14	4,29	4,42	4,53	4,63	4,72	4,80	4,88	4,95	5,01	5,07	5,13	5,18	5,23	5,41	5,62	5,88	6,24	6,49	6,67
20	2,44	3,08	3,46	3,74	3,95	4,12	4,27	4,40	4,51	4,61	4,70	4,78	4,85	4,92	4,99	5,05	5,10	5,16	5,20	5,38	5,59	5,85	6,20	6,45	6,63
22	2,43	3,06	3,44	3,71	3,92	4,09	4,24	4,36	4,47	4,57	4,66	4,74	4,81	4,88	4,94	5,00	5,06	5,11	5,16	5,33	5,53	5,79	6,14	6,38	6,56
24	2,42	3,05	3,42	3,69	3,90	4,07	4,21	4,34	4,44	4,54	4,63	4,71	4,78	4,85	4,91	4,97	5,02	5,07	5,12	5,29	5,49	5,74	6,09	6,32	6,50
26	2,41	3,04	3,41	3,67	3,88	4,05	4,19	4,31	4,42	4,52	4,60	4,68	4,75	4,82	4,88	4,94	4,99	5,04	5,09	5,25	5,45	5,70	6,04	6,28	6,45
28	2,41	3,03	3,40	3,66	3,86	4,03	4,17	4,29	4,40	4,49	4,58	4,66	4,73	4,79	4,85	4,91	4,96	5,01	5,06	5,22	5,42	5,67	6,00	6,23	6,41
30	2,40	3,02	3,39	3,65	3,85	4,02	4,16	4,28	4,38	4,47	4,56	4,64	4,71	4,77	4,83	4,89	4,94	4,99	5,03	5,20	5,39	5,64	5,97	6,20	6,37
40	2,38	2,99	3,35	3,60	3,80	3,96	4,10	4,21	4,32	4,41	4,49	4,56	4,63	4,69	4,75	4,81	4,86	4,90	4,95	5,11	5,29	5,53	5,85	6,07	6,24
60	2,36	2,96	3,31	3,56	3,75	3,91	4,04	4,16	4,25	4,34	4,42	4,49	4,56	4,62	4,67	4,73	4,78	4,82	4,86	5,02	5,20	5,42	5,73	5,94	6,10
80	2,35	2,94	3,29	3,54	3,73	3,89	4,01	4,13	4,22	4,31	4,39	4,46	4,52	4,58	4,64	4,69	4,73	4,78	4,82	4,97	5,15	5,37	5,67	5,87	6,03
120	2,34	2,93	3,28	3,52	3,71	3,86	3,99	4,10	4,19	4,28	4,35	4,42	4,48	4,54	4,60	4,65	4,69	4,74	4,78	4,92	5,10	5,31	5,61	5,81	5,96
240	2,34	2,92	3,26	3,50	3,68	3,83	3,96	4,07	4,16	4,24	4,32	4,39	4,45	4,51	4,56	4,61	4,65	4,70	4,74	4,88	5,05	5,26	5,54	5,74	5,89
∞	2,33	2,90	3,24	3,48	3,66	3,81	3,93	4,04	4,13	4,21	4,29	4,35	4,41	4,47	4,52	4,57	4,61	4,66	4,70	4,83	5,00	5,20	5,48	5,67	5,81

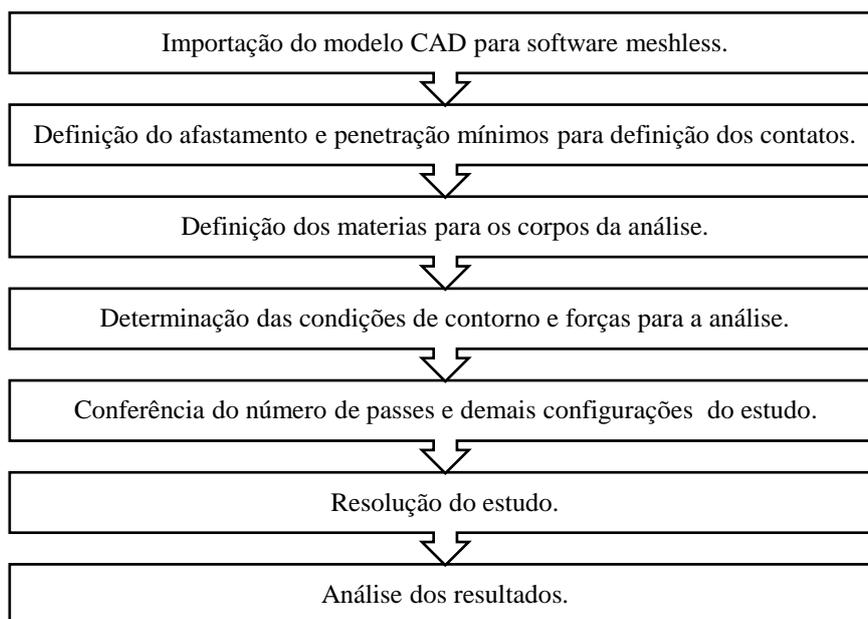
Fonte: Peticarrari (2007)

## Anexo B

### Estratégia utilizada pelos Engenheiros I e II

Para a investigação da torre em virtude da quantidade significativamente de conexões adesivadas. No que concerne à análise realizada no software de Método Sem Malha, o estudo prosseguiu conforme os procedimentos do descritos no Capítulo 5.3.1, conforme ilustrado na Figura 82.

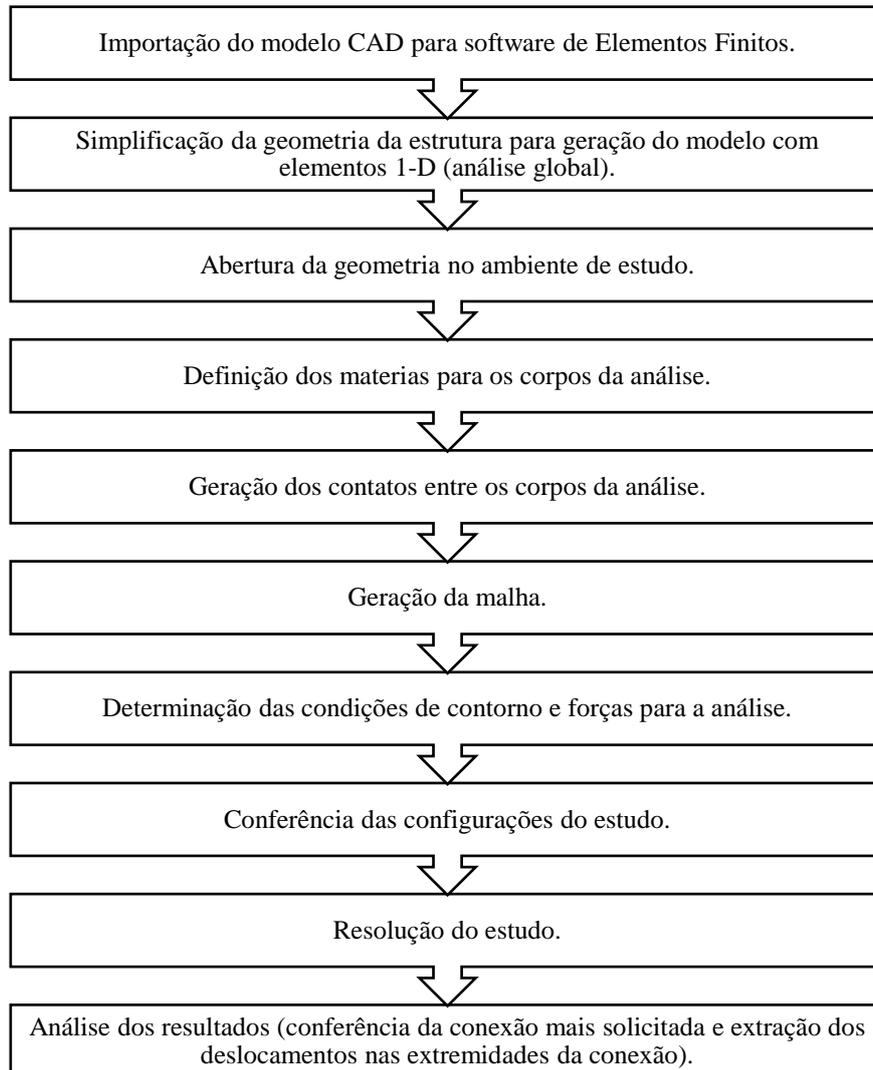
Figura 82. Estratégia adotada para o MSM - Engenheiros I e II.



Fonte: Autoria própria.

Quanto à análise conduzida por meio dos softwares de Elementos Finitos, inicialmente realizou-se uma análise utilizando elementos unidimensionais (viga e barra) com o objetivo de identificar a conexão mais solicitada e extrair seus deslocamentos, processo este denominada análise global, no qual ambos os engenheiros adotaram um fluxo de atividades muito similar, conforme está descrito na Figura 83. Apenas os parâmetros da malha, como o dimensional dos elementos foram diferentes.

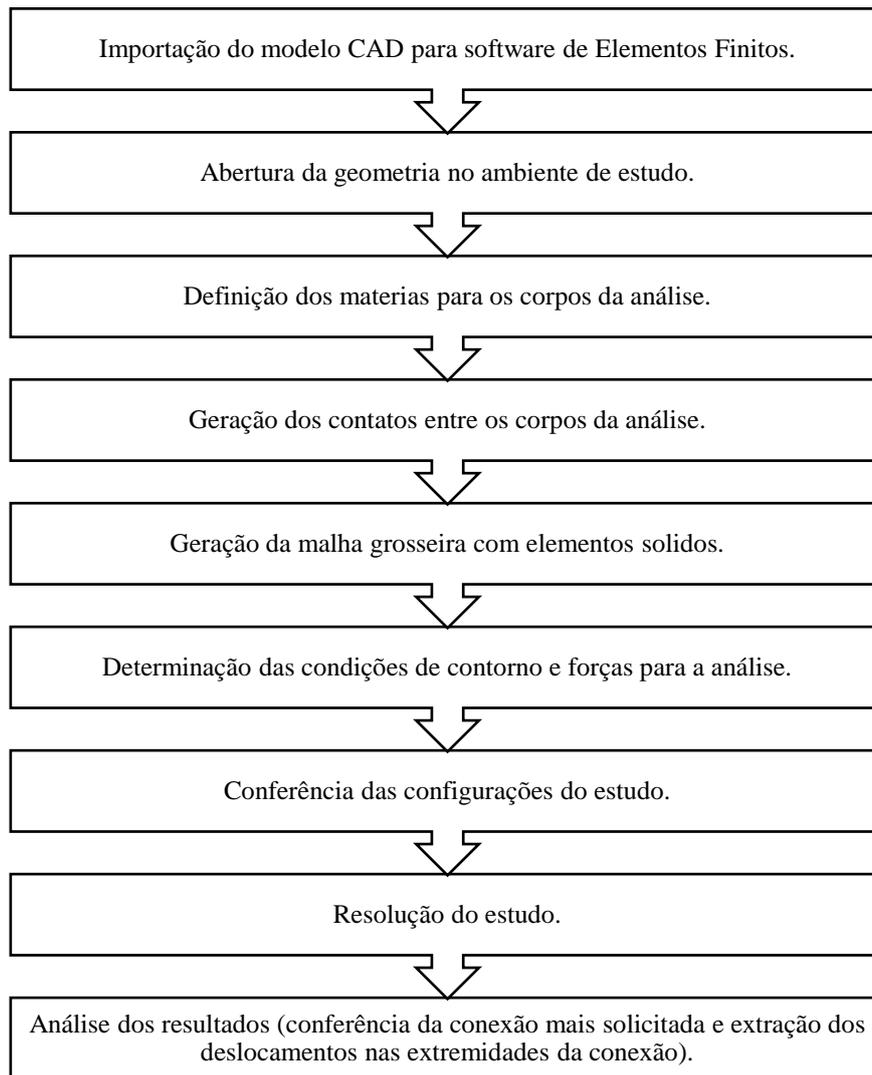
Figura 83. A estratégia adotada para as análises globais em MEF 1 e MEF 2 - Engenheiro I, e abordagem utilizada para o MEF 1 - Engenheiro II.



Fonte: Autoria própria.

O Engenheiro II adotou uma estratégia alternativa para desenvolver a análise de geometria global, utilizando uma malha com baixo nível de refinamento. Essa abordagem evita a necessidade de simplificação na geometria dos componentes da torre, facilitando o trabalho do engenheiro. No entanto, essa simplificação pode comprometer significativamente a precisão dos resultados alcançados. A estratégia está descrita na Figura 84.

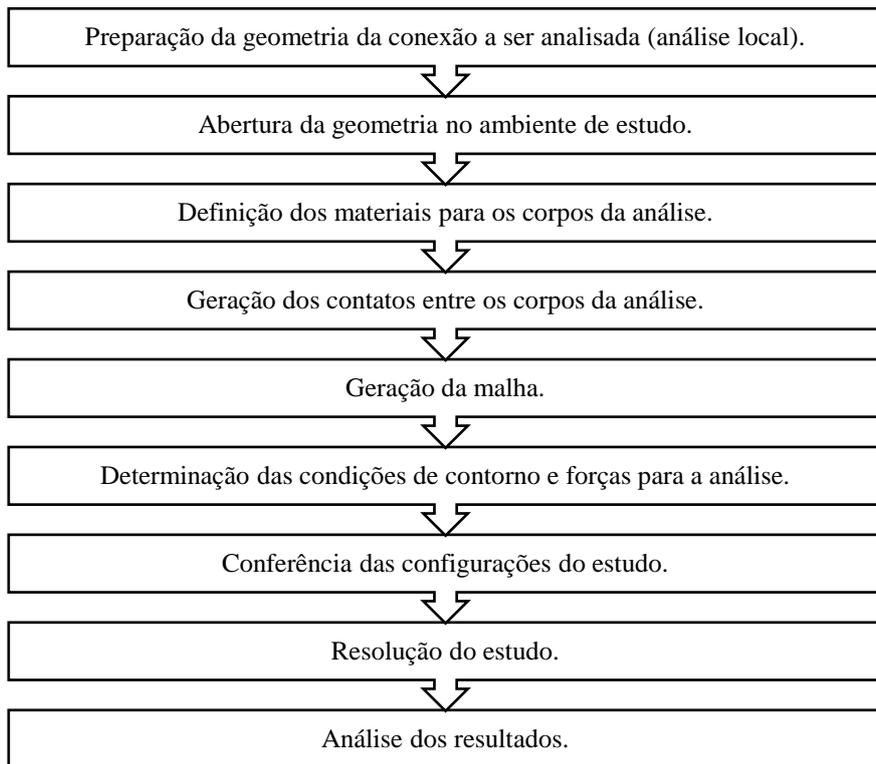
Figura 84. A estratégia adotada para o MEF 2 - Engenheiro II.



Fonte: Autoria própria.

Após obter essas respostas, procedeu-se ao recorte e isolamento da conexão mais demandada da estrutura completa, e os deslocamentos obtidos na análise global foram aplicados a esta conexão específica para determinar as tensões no adesivo. Esta fase do estudo foi denominada análise local, e a metodologia empregada é minuciosamente descrita na Figura 85.

Figura 85. Estratégia para as análises locais em MEF 1 e MEF 2 - Engenheiros I e II.



Fonte: Autoria própria.

## **Produção Técnica e Científica**

PEREIRA, Petrucio Leal et al. **COMPARATIVE ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF SIMPLE LAP JOINT USING DIFFERENT NUMERICAL METHODS**. Conferência Luso-Brasileira de Adesão e Adesivos – Clba 2022. São Carlos, 2022.

PEREIRA, Petrucio Leal *et al.* **BIBLIOMETRIC ANALYSIS FOR SIMULATING THE BEHAVIOR OF ADHESIVES USING THE MESHLESS METHOD**. VIII International Symposium On Innovation And Technology. Salvador, 2022.

PEREIRA, Petrucio Leal et al. **SURFACE PREPARATION FOR APPLICATION OF STRUCTURAL ADHESIVES – AN OVERVIEW**. VIII International Symposium On Innovation And Technology. Salvador, 2022.

## Comparative analysis of the behavior of simple lap joint using different numerical methods

Petrucio Leal Pereira<sup>1</sup>, Valter Estevão Beal<sup>1</sup>, Juan Carlos Romero Albino<sup>1</sup>  
petrucio.pereira@fieb.org.br, valtereb@fieb.org.br, juan.albino@fieb.org.br

<sup>1</sup>*Department of Industrial Product Development, SENAI University Center  
CIMATEC., Salvador, Bahia, Brazil*

The demand for tools, materials and methods to optimize engineering projects is a constant challenge, since faster results and the elimination of routes that demand long periods can result in higher costs and less competitiveness in the market. In the 19th century, the first reports of the use of natural rubbers for bonding materials appeared. [1]. From that period to the present day, adhesives have evolved and gained numerous applications, since they are unions that allow the preservation of the integrity of the base materials, allowing the union of different materials and a more uniform distribution of tension than riveting, screwing, or welding [2], [3]. The aeronautical, naval, and automobile industries were the main responsible for the evolution of adhesive joints[4], because adhesives allow adding the following characteristics to projects: lower weight, greater stiffness, greater attenuation of vibration, and noise [5] and a fast production [6].

A good practice for the development of a project or product is to raise the level of technological maturity to minimize the associated risks and fill gaps that may exist between the basic stages of research and commercialization [7]. For this reason, when it is intended to carry out an analysis of the behavior of an adhesive part, it is appropriate to carry out experimental tests. However, it is known that most engineering problems are not reproduced experimentally, as the prototyping process can be time-consuming and expensive, and not all relevant information can be measured experimentally [8]. In this way, the use of numerical methods is indicated, as it allows investigating the effects of geometric changes in the adhesive and adherents, seeking to optimize the design of the adhesive part [9],[11].

From the point of view of numerical methods, the finite element method (FEM) requires care in preparing the mesh, since it is difficult to ensure a connection between nodes without generating distortions in the mesh, which can lead to inaccurate results. [12]. In this context, preparing the mesh of a traditional finite element model can require much pre-processing time due to the nodes being connected by elements and it must be ensured that the discretized model obeys the conditions of equilibrium and compatibility between the elements. [13].

Meshless methods (MM) emerged to eliminate some problems associated with MEF, such as the need to simplify the geometry, mesh generation, and the subsequent implicit process [13]. Thus, the MM can optimize the simulation process, promoting a reduction in the time required to reach satisfactory results for decision-making during the initial phases of a project, minimizing costs and associated risks.

Given the above, the objective of this work is to investigate the accuracy of the simulation of a simple lap joint using the SimSolid software, (which works based on the MM [14]), from a comparative study between the behavior of the bonded joint in real and numerical scale by finite element and meshless methods.

The research methodology considers performing the adhesive characterization test Scotch-Weld™ DP420 of 3M, following the ASTM D1002-10 standard [15], at universal test machine model EMIC DL 2000 and elastic limit extraction. Subsequently, the shear test of the adhesive joint is carried out following the ASTM D1002-10 standard [15], also on the universal testing machine. Next, the simulation of the simple overlapping joint in shear is generated using the software Ansys (finite element method) and SimSolid (meshless method). Finally, a comparative analysis is made between the numerical and experimental models due to the displacement of the joint when pulled by a force compatible with the elastic limit of the adhesive.

Until now, the mechanical characterization tests of the adhesive Scotch-Weld™ DP420 have already been carried out, in which it was possible to obtain the stress-strain curve and the elastic limit of the adhesive. The next steps will be developed according to the described methodology.

## REFERENCES

1. W. C. Wake, “Theories of adhesion and uses of adhesives: a review,” *Polymer (Guildf)*, vol. 19, no. 3, pp. 291–308, Mar. 1978, doi: 10.1016/0032-3861(78)90223-9.
2. R. D. Adams and W. C. Wake, *Structural Adhesive Joints in Engineering*. Springer Netherlands, 1984. doi: 10.1007/978-94-009-5616-2.
3. S. Ebnesajjad and A. H. Lanck, *Adhesives technology handbook*. 2015, 2015.
4. Philippe. Cognard, “Adhesives and sealants: basic concepts and high tech bonding,” p. 492, 2005.
5. A. v. Pocius, *Adhesion and Adhesives Technology*, 7th ed. München: Hanser, 2021. doi: 10.3139/9781569908501.009.
6. R. F. P. Resende et al., “Meshless approach to material plasticity in adhesive joints,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 33, no. C, pp. 126–137, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.PROSTR.2021.10.017.
7. E. Rasmussen and R. Sørheim, “How governments seek to bridge the financing gap for university spin-offs: proof-of-concept, pre-seed, and seed funding,” <http://dx.doi.org/10.1080/09537325.2012.705119>, vol. 24, no. 7, pp. 663–678, Aug. 2012, doi: 10.1080/09537325.2012.705119.
8. H. Wang and Q. H. Qin, *Methods of fundamental solutions in solid mechanics*. Elsevier, 2019. doi: 10.1016/C2018-0-03684-1.
9. R. D. Adams and n. a. Peppiatt, “Stress analysis of adhesive-bonded lap joints:,” <http://dx.doi.org/10.1243/03093247V093185>, vol. 9, no. 3, pp. 185–196, Jul. 2007, doi: 10.1243/03093247V093185.
10. A. D. Crocombe, “Global yielding as a failure criterion for bonded joints,” *Int J Adhes Adhes*, vol. 9, no. 3, pp. 145–153, Jul. 1989, doi: 10.1016/0143-7496(89)90110-3.
11. T. M. Roberts, “Shear and Normal Stresses in Adhesive Joints,” *J Eng Mech*, vol. 115, no. 11, pp. 2460–2479, Nov. 1989, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1989)115:11(2460).
12. J. Belinha, “Meshless Methods in Biomechanics - Bone Tissue Remodelling Analysis,” p. 320, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-06400-0.
13. B. D. de Castro, F. D. C. Magalhães, and J. C. Campos Rubio, “Numerical analysis of damage mechanisms for 3D-printed sandwich structures using a meshless method,” *Model Simul Mat Sci Eng*, vol. 30, no. 5, p. 055003, May 2022, doi: 10.1088/1361-651X/AC6CFC.
14. V. Apanovitch, “The Method of external finite element approximations”, Minsk, 1991.
15. ASTM, “ASTM D1002-10,” 2019. Accessed: Sep. 14, 2022. [Online]. Available: <https://www.astm.org/d1002-10r19.html>

### **BIBLIOMETRIC ANALYSIS FOR SIMULATING THE BEHAVIOR OF ADHESIVES USING THE MESHLESS METHOD**

*Petrucio Leal Pereira<sup>1</sup>, Valter Estevão Beal<sup>2</sup>, Juan Carlos Romero Albino<sup>a</sup>, Rodrigo Santiago Coelho<sup>a</sup>, Jade Spinola Ávila<sup>b</sup>*

<sup>a</sup>, SENAI CIMATEC University, Brazil,

<sup>b</sup>, Federal University of Bahia, Brazil.

**Abstract:** Structural adhesives have great power in replacing mechanical fasteners. Coupled with this, it is necessary to know the behavior of the adhesively bonded parts; therefore, the Meshless method can be an alternative to predict their behavior. To understand the academic production scenario on the subject, a bibliometric analysis was proposed. The results of the bibliometric analysis show that there is a disparity between when analyzing only the isolated bases and the merged database. In addition, it was possible to locate from the bibliometric analysis, especially the annual production on the theme, the primary productive authors and the most relevant Journal.

**Keywords:** Meshless method, Structural adhesive, Bibliometrics, Circular economy.

### **ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA PARA SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS ADESIVOS PELO MÉTODO MESHLESS**

**Resumo:** Os adesivos estruturais possuem grande potência na substituição de fixadores mecânicos, portanto é necessário conhecer o comportamento das peças adesivadas. Diante desse contexto, o método Meshless pode ser uma alternativa para prever o seu comportamento. Com objetivo de mapear o cenário da produção acadêmica sobre o tema, foi proposto uma análise bibliométrica. A partir da análise bibliométrica foi possível verificar a produção anual sobre o tema, os principais e os Journal mais relevantes.

**Palavras-chave:** Método Meshless, Adesivo estrutural, bibliometria, economia circular.

## 1. INTRODUCTION

Currently, the structural adhesives market is dominated by epoxy and polyurethane chemicals, which form terofixed resins when crosslinking their polymer networks, due to their high strength and fast application times [1]. The epoxy market is projected to be worth an estimated \$21.87 billion by 2031 [2].

Adhesives can be a viable alternative for replacing mechanical fasteners, for example, some aircraft manufacturers often install tens of thousands of redundant fasteners in an attempt to ensure safety in critical applications, however, also adding tremendous complexity, time and cost while significantly reducing aircraft performance [3]. Adhesives are increasingly being applied because they allow reducing the number of waste generated, optimize the cost and manufacturing time, and reduce the weight of the parts contributing to optimization with the energy expenditure, contributing to the circular economy.

The circular economy (CE) is defined as an economic model that aims to use resources efficiently by reducing waste, costs and raw materials, and promoting closed product and material cycles to promote sustainability and ensure socioeconomic benefits [4], thus, it is considered as a solution to a number of challenges such as waste generation, resource scarcity and sustainable economic benefits [5].

Numerical modeling of adhesive joints has been heavily developed over time. Today there are many variations of adhesives designed, specifically to meet the challenges of creating strong and durable, but also flexible joints for bonding composites, plastics and metals [6]. Therefore, it is necessary to investigate the behavior of adhesive bonds. The first analytical models, were proposed in 1938 by Volkersen in 1938 by Goland and Reissner (1944), whereas the finite element model applied to adhesives were proposed in 1998 by Penedo [7].

Meshless methods, on the other hand, initially appeared to solve astrophysical problems, but nowadays there are still few commercial softwares. However, they are able to eliminate the problems associated with the finite element method (FEM), such as meshing and processing time [7], [8]. Because it is an unusual method, a bibliometric review is suggested to assist the authors in prospecting adherent works. For, it is observed the difficulty of the authors to map publications specifically related to their research, select them according to specific criteria, treat the data obtained and then use the main references in the development of the project [9]. Thus, the use of bibliometric analysis tools is proposed.

Bibliometrics refers to a complex scientific mapping that is difficult to perform because it comprises multiple steps and uses several tools. Bibliometric analysis is capable of assessing the relevance of publications through indicators and guiding the author in the selection of references that are more adherent to the topic of interest in a quantitative way. Therefore, this methodology aims to develop a systematic, transparent and reproducible review process based on the statistical measurement of science, scientists or scientific activity [10].

[11], propose an open-source tool called bibliometrix. In this tool it is possible to perform comprehensive bibliometric analysis of scientific mapping, developed in the R

language. This tool is flexible and can be quickly updated and integrated with other statistical R packages, so it is constantly changing, like bibliometrics. Therefore, from bibliometric analysis it is possible to synthesize the findings of previous research to effectively use the existing knowledge base and advance a particular line of research. The proposed article aims to evaluate and compare the academic production of works developed from the analysis of the joints of parts by structural adhesives via numerical simulation using the Meshless method, strengthening and presenting a new technology that stimulates and promotes the development of a circular economy.

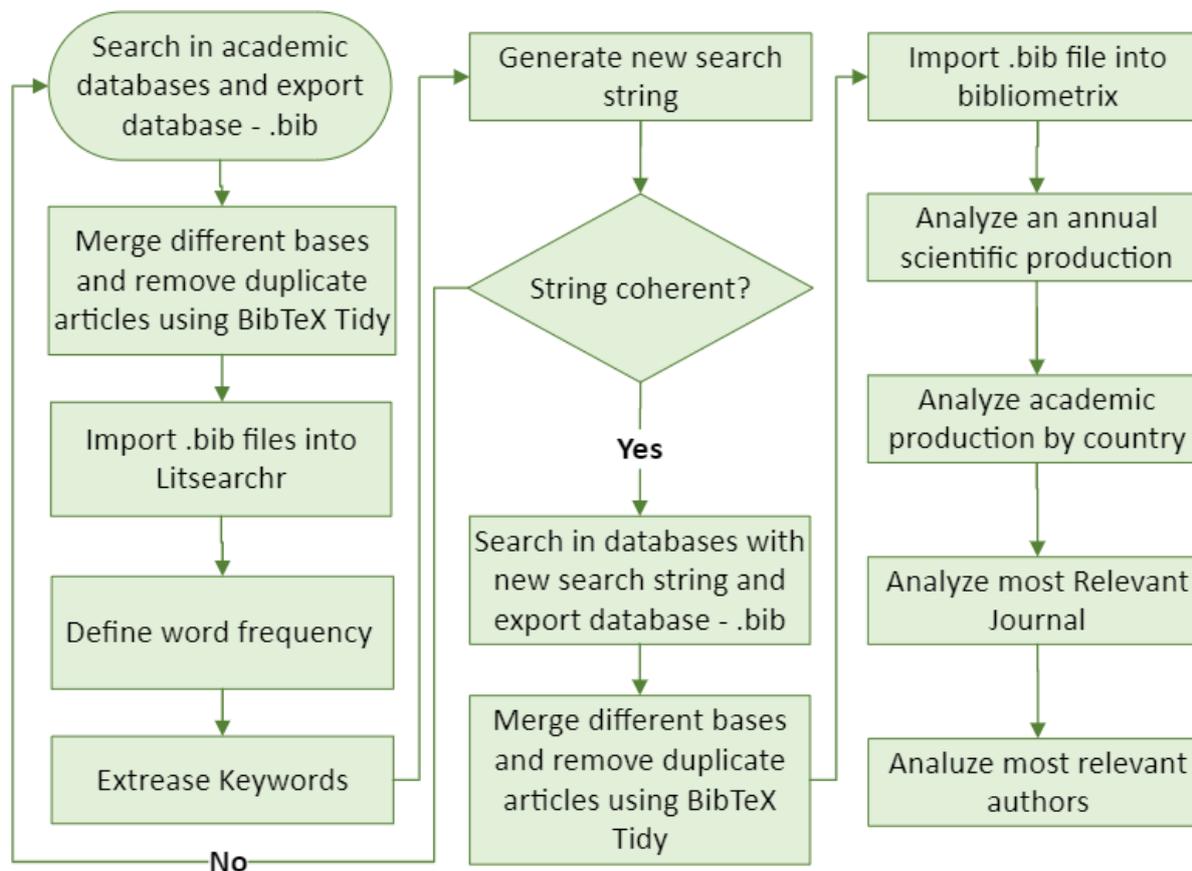
## 2. METHODOLOGY

The search strategy developed in this paper was adapted from the methodology developed by [12]. He proposed to use the Litsearchr tool, developed by [13], to develop a more assertive search string based on the development using text-mining and keyword co-occurrence networks to identify important terms to include in a search strategy. The other tool used by [12] was Bibliometrix, proposed by [11], which performs a bibliometric analysis based on data extracted from academic databases. The BibTeX Tidyessa tool developed by [14] was also used. In this way, a data matrices for co-citation, coupling, scientific collaboration analysis and co-word analysis can be assembled.

The methodology suggested and developed in this article has as its main objective to expand and optimize the process of research and analysis of the results obtained. Thus, it is possible to develop a mapping of the main focal points, main authors, countries of origin of the publications, and the most relevant journals on the theme.

Figure 1 shows a step-by-step flowchart of the methodology developed, in which the search bases for collecting articles were Scopus and Web of Science, both available at the CAPES PERIODICOS Portal, and most steps were implemented in R

Figure 1. Flowchart of the methodology developed to create the parameters for searching and analyzing the bibliometric data.



Soucer: Adapted from [12]

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

Initially, to perform the search process, the string: ("structural adhesives " AND "meshless") was created, generating a total of 11 documents, which were exported in .bib format. Using the litsearchr tool developed by [13] it was possible to measure the interaction strength of the words and create groups with the terms extracted and provided by the tool. After this step, a new script was created, ("adhesive joints" OR "adhesively bonded" OR "bonded joints" OR "structural adhesive" OR "structural adhesives") AND ("meshless method" OR meshless). Thus, a new search was performed in the databases, totaling 25 documents in the Scopus search base and 18 in the Web of Science. This implementation of the keywords did not result in a significant increase in the number of documents found. This can be explained because it is a theme that has been explored with more emphasis in the last 3 years, as seen in Figure 2.

Figure 2. Número de artigos produzidos por ano.



Sourcer: Adapted from [15], [16]

### 3.1. Bibliometric analysis

From the expansion of the number of documents generated, it was possible to evaluate the most productive authors, development and growth of the research theme, the most relevant sources, and the most productive countries.

Table 1 presents data related to the publications identified in the Scopus, WOS and merged databases. The number of publications retrieved from Scopus was 39% higher than from WOS. The merged database also showed a disparity to the sum of Scopus and WOS, as 36% of the records were duplicate publications. Both platforms carry the beginning of the publication period as the year 2001. The number of author keywords and Keyword plus was more than double in Scopus.

Table 1. Overview results

	Scopus	WOS	Merged
Documents	23	18	26
Sources (journal, article, conference, proceeding)	15	11	18
Authors	29	26	36
Keywords plus (ID)	166	72	194
Author keywords (DE)	65	76	86
Period	2001-2022	2001-2022	2001-2022
Average citations by documents	5,92	6,79	6,39

Sourcer: Adapted from [15], [16]

Table 2 shows the 10 most relevant journals for both databases. The International Journal of Adhesion And Adhesives presents a higher number of published articles on the subject. However, the journal Composite Structures has a higher impact factor and citation score according to Scopus and presents the A1 classification, according to the Sucupira Portal.

Table 2. Main journal

Sources	Articles	Cite Score	Impact Factor	Classification
International journal of adhesion and adhesives	4	5,6	3,85	A2
Engineering analysis with boundary elements	3	5,0	3,25	A2
Procedia structural integrity	3	1,9	1,60	A2
Composite structures	2	9,7	6,60	A1
The journal of adhesion	2	4,9	2,92	B1
Journal of the brazilian society of mechanical sciences and engineering	2	3,6	2,22	B1

Soucer: Adapted from [15], [16]

Table 3 highlights the 4 most productive authors, a ranking based on the number of publications, number of citations and h-factor. The first ranking criterion is the number of publications, but if two or more authors have the same number of publications, the second criterion is the number of citations and lastly the h-factor. All authors are Portuguese. It is worth noting that in the last 5 years the Portuguese represent 100% of the articles published on the simulation of adhesive parts using the Meshless method.

Table 3. Main Authors

		Authors			
		Luís D.C.Ramalho	Raul D.S.G.Campilho	Jorge Belinha	Isidro J.Sánchez-Arce
Scopus	Articles	17	17	17	13
	N° Citations	98	56	49	44
	h-index	36	44	27	3
WOS	Articles	12	11	9	7
	N° Citations	18	14	14	6
	h-index	32	33	26	2

Soucer: Adapted from [15], [16]

#### 4. CONCLUSION

These types of analysis allow researchers to gather statistical information in order to optimize their academic search process and locate more adherent works. Thus, it was possible to verify the trend of academic discussions about the simulation of adhesive parts using the meshless method; to establish the main Journal on the subject; the authors with the highest degree of expertise on the subject, as well as the most influential articles. In addition, it was possible to demonstrate that there are some differences between Scopus and WOS, confirming the importance of broadening the search.

#### 5. REFERENCES

- <sup>1</sup>K. R. Mulcahy, A. F. R. Kilpatrick, G. D. J. Harper, A. Walton, and A. P. Abbott, “Debondable adhesives and their use in recycling” **Green Chemistry**, vol. 24, no. 1. Royal Society of Chemistry, pp. 36–61, Jan. 07, 2022. doi: 10.1039/d1gc03306a.
- <sup>2</sup>Coatings World, “Epoxy Resins Market” **Elsevier**, Jun. 2022. doi: 10.1016/J.FOPOW.2022.05.039.
- <sup>3</sup>F. L. Palmieri *et al.*, “Latent cure epoxy resins for reliable joints in secondary-bonded composite structures”. **Composites Part B: Engineering**, vol. 231, p. 109603, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2021.109603.
- <sup>4</sup>A. Murray, K. Skene, and K. Haynes, “The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context”. **Journal of Business Ethics** 2015 140:3, vol. 140, no. 3, pp. 369–380, May 2015, doi: 10.1007/S10551-015-2693-2.
- <sup>5</sup>M. Lieder and A. Rashid, “Towards circular economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing industry”. **Journal of Cleaner Production**, vol. 115, pp. 36–51, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.12.042.
- <sup>6</sup>J. Martin, “Methyl methacrylate (MMA) adhesives – A trending procedure in the marine industry”. **Reinforced Plastics**, vol. 64, no. 4, pp. 204–207, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.repl.2019.10.006.
- <sup>7</sup>R. F. P. Resende *et al.*, “Meshless approach to material plasticity in adhesive joints”. **Procedia Structural Integrity**, 2021, vol. 33, no. C, pp. 126–137. doi: 10.1016/j.prostr.2021.10.017.

- <sup>8</sup>L. D. C. Ramalho, I. J. Sánchez-Arce, R. D. S. G. Campilho, J. A. O. P. Belinha, and F. J. G. Silva, “Strength prediction and stress analysis of adhesively bonded composite joints using meshless methods”. *Procedia Manufacturing*, 2020, vol. 51, pp. 904–911. doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.127.
- <sup>9</sup>I. L. Medeiros, A. Vieira, G. Braviano, and B. S. Gonçalves, “Systematic Review and Bibliometrics facilitated by a Canvas for information visualization”. *InfoDesign - Brazilian Journal of Information Design*, vol. 12, no. 1, pp. 93–110, 2015, [Online]. Available: <https://www.infodesign.org.br/infodesign/article/view/341>
- <sup>10</sup>A. Pritchard, “Statistical bibliography or bibliometrics”. *Journal of Documentation*, 1969.
- <sup>11</sup>M. Aria and C. Cuccurullo, “Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis” *Journal of Informetrics*, vol. 11, no. 4, pp. 959–975, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.joi.2017.08.007.
- <sup>12</sup>M. Reis and A. Q. do Vale, “Método BiLi - Uma otimização para revisão bibliográfica e literária”. *GitHub*, <https://github.com/Brazilian-Institute-of-Robotics/bir-mini-bili-method>, 2021.
- <sup>13</sup>E. M. Grames, A. N. Stillman, M. W. Tingley, and C. S. Elphick, “An automated approach to identifying search terms for systematic reviews using keyword co-occurrence networks”. *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 10, no. 10, pp. 1645–1654, Oct. 2019, doi: 10.1111/2041-210X.13268.
- <sup>14</sup>P. West, P. “Cleaner and Formatter for BibTeX”. *GitHub* 2021. <https://github.com/FlamingTempura/bibtex-tidy> (accessed Jun. 20, 2022).
- <sup>15</sup>Scopus, “Scopus - Document search”. *SCOPUS*, 2022. <https://www-scopus.ez10.periodicos.capes.gov.br/search/form.uri?display=basic#basic> (accessed Jun. 19, 2022).
- <sup>16</sup>Web of Science, “Pesquisa de documento - Coleção principal da Web of Science”. *Web of Science*, Jul. 20, 2022. <https://www-webofscience.ez10.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/basic-search> (accessed Jun. 19, 2022).

## SURFACE PREPARATION FOR APPLICATION OF STRUCTURAL ADHESIVES – AN OVERVIEW

*Gustavo Alcântara<sup>a,b</sup>, Gabriel Aelo<sup>a,c</sup>, Pedro Meirelles<sup>a,d</sup>, Andressa Reis<sup>a,c</sup>, Valter Estevão Beal<sup>a,b</sup>, Petrucio Leal Pereira<sup>a,b</sup>, João Ricardo Lima Oliveira<sup>a,b</sup>*

<sup>a</sup> *Industrial Product development, SENAI CIMATEC*

<sup>b</sup> *SENAI CIMATEC, Brazil,*

<sup>c</sup> *Federal Institute of Education, Science and Technology of Bahia, Brazil*

<sup>d</sup> *Federal University of Bahia, Brazil*

**Abstract:** The use of structural adhesives has increased in recent years as an alternative to intrusive bonding methods. In order for an adhesive joint to be successfully executed, it is necessary to prepare the surface of the substrate, which can be done by different methods. The objective of this work was to make an overview of the main existing surface preparation methods for adhesive bonding and the range of parameters of interest, such as roughness and wettability, that can be obtained.

**Keywords:** structural adhesives, adhesive joint, roughness and wettability, surface preparation methods.

## PREPARAÇÃO DE SUPERFÍCIES PARA APLICAÇÃO DE ADESIVOS ESTRUTURAIS - OVERVIEW

**Resumo:** O uso de adesivos estruturais vem aumentando nos últimos anos como alternativa para métodos de união intrusivos. Para que uma junta adesivada seja executada com sucesso é necessário a correta preparação da superfície do substrato, que pode ser feita por métodos variados. O objetivo deste trabalho foi fazer um apanhado geral dos principais métodos de preparação de superfície para colagem adesiva existentes e a faixa de parâmetros de interesse, como rugosidade e molhabilidade, que podem ser obtidos.

**Palavras-chave:** Adesivos estruturais, junta adesivada, métodos de preparação de superfície, rugosidade e molhabilidade.

## 1. INTRODUCTION

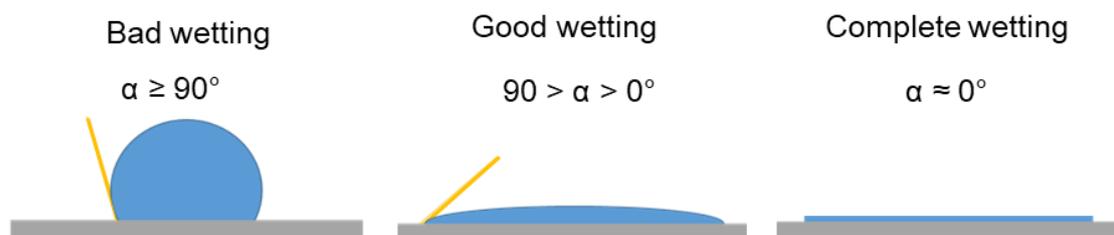
The use of structural adhesives has increasingly replaced conventional mechanical fastening systems (bolts, welds, and rivets). The acceptance of adhesives in the industry comes from advantages such as joining thick and/or thin shaped materials, similar and dissimilar materials, resisting fatigue, insulating against heat transfer and electrical conductance, minimizing electrochemical corrosion, uniform distribution of stress, good vibration absorption and hot work avoidance [1], [2].

However, adhesive bonding requires careful surface preparation due to the low surface energy of polymers. Also, the environmental conditions can affect the joint quality [3]. For that reason, surface preparation is crucial to ensure good adhesion between the adhesive and the substrate, avoiding premature failure [3].

While the internal strength of the adhesive and the adherent are characterized and controlled, the interface between them is the result of a combination of mechanical, chemical, and physical interactions and its properties can be strongly affected by contaminants [3].

Surface cleaning and surface preparation are both important steps of an adhesion process, being crucial for the quality of the interaction of the surface with the adhesive as discussed by [3]. The adhesion capability is measured by a wide range of parameters for the characterization of the substrate surface that controls the interaction of substances such as roughness  $R_a$  or  $R_z$ , wettability and surface energy [4]. Wettability is a parameter that controls the capability of adhesion of a surface by analyzing the contact angle formed by a droplet of distilled water. It characterizes the level of interactions of a substance and the capability of adhesion of the treated surface [5]. The surface wettability can be measured considering the contact angle shown in Figure 1. A desirable output when analyzing surface wettability is that the degrees get lower than  $90^\circ$  preferably as close to  $0^\circ$  as possible [3],[5].

Figure 1. Example of wettability degrees



Source: [3]

On different literature, there is an optimum surface roughness for maximum strength in steel and aluminum joints [6]. Examination of the fracture surface when applied loads, made by SEM - Scanning electron microscopy, showed evidence of adhesive deformation after failure [6]. Surface roughness is linked also with wettability. The contact angle can increase continuously with higher surface roughness [7],[8]. For lower roughness values, the wettability is decreased as the surface energy is reduced and the result is a lower interaction between substrate and adhesive [7],[8]. A lower

interaction between substrate and adhesive leads to interfacial failure instead of cohesive failure of adhesive [6].

Despite the higher contact angle, therefore lower wettability, the shear strength of treated surface joints tends to improve compared to the non-abraded adherend joints [9]. This implies that wettability does not interfere with supported shear loads meaning it cannot be explained only by increased roughness characteristics, such as mechanical interlocking, surface texture, and increased bonding area [6].

Even though surface roughness is an important parameter for joint strength, the proper selection of adherent-adhesive material combination should not be ignored for maximum performance of adhesively bonded joints. In addition, some specimens with similar average roughness values but altered morphology can show further improvement in the initial adhesion strength. The porous morphologies of grit blasted, and etched surfaces can show superior adhesion performance and appear to be decisive for triggering possible mechanical interlocking. Which results from the formation of a micro-composite interphase zone due to penetration of the adhesive into the surficial pores. [10]

## 2. ANALYSIS OF SURFACE PREPARATION METHODS

Certifying that the adhesion of the structural adhesive is correct is an important step to grant a safe and reliable use of systems that need high payload so, for this, is necessary to choose a surface preparation method that can change surfaces characteristics in an assertive and controllable way.

To find the ideal surface preparation method among the existing methods, there was an overview of the performance over different substrates while using different control parameters for obtaining an analysis of the surface roughness and wettability judging the quality of the adhesion through strength tests.

### 2.1. Milling

The process of milling is categorized as the condition of fabrication, but even in this process, the surface roughness can vary depending on rotations per minute (rpm) and the speed of the toll in mm per second for the removal of the substrate [11]. The variation of the parameters of milling was observed by [11] as presented, at each condition on a substrate of Ti-6Al-4V, and the surface roughness ( $R_a$ ) were observed, as presented at Table 1.

Table 1. Milling roughness

Milling	Roughness $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Wettability (degrees)
v=10mm/min and 4000rpm	0.135	98.3°
v=40mm/min and 1000rpm	0.173	92.7°
v=60mm/min and 500rpm	0.546	94.7°

Source: [11]

### 2.2. Polishing

The process of polishing or sanding is a common procedure for preparing the surface for adhesion. It has a diverse variation on sandpaper grades, which usually are used in sequel with different grades. Other than the sandpaper grades the process can be controlled by the pressure applied and the speed of grinding (rpm) [11]. In [11] research it can be seen an increase in roughness and a lowering in wettability as the grade of the sandpaper (data in Table 2).

Table 2. Polishing roughness

Sandpaper	Roughness $R_a$ ( $\mu m$ )	Wettability (degrees)
P600	0.162	83°
P320	0.187	73.7°
P220	0.446	66°

Source: [11]

In [12] is shown the performance of the process using a disk sander, on a surface of ASTM A36 and achieved the best performance in tests using a tensile strength, following ASTM D 4541-02, using the lower grit size as presented at Table 3.

Table 3. Disk sander Roughness

Surface preparation	Surf. Profile $R_a$ ( $\mu m$ )	Tensile strength (MPa)
Disk sander (36)	6.6	9.6
Disk sander (60)	4.3	5.5
Disk sander (80)	2.6	5.9

Source: [12]

### 2.3. Blasting

Blasting treatments are commonly used with a vast range of blasting components such as steel shots, steel grit, aluminum cut wire, zinc cut wire, brown corundum, glass beads, baking soda, or plastic soda abrasive, each one has different proposes for applications [13]. With the objective to prepare the surface for adhesion changing the surface profile on a smaller scale and removal of oxides for adhesion proposes studies with glass beads and soda abrasives, such as the ones shown by [11],[14],[15],[16],[17].

The control over the effectiveness of the change in the surface is based on the distance of blasting, the pressure of the jet, and the size, hardness, and speed of the particle. The faster and bigger the size of the particle, bigger changes occur in the substrate worked directly to the energy disposed of by the blast [13],[14].

The effect of this treatment on a substrate of ASTM A36 in the surface roughness parameter and the performance of adhesion of an epoxy resin culminated in the characteristics presented in Table 4.

Table 4. Blast characteristics

Surface preparation	Surface Profile $R_a$ ( $\mu m$ )	Tensile strength (MPa)
Garnet (16-40)	23.9	13.6
Garnet (30-60)	20.9	14.7

Garnet (80)	22.1	14.3
Garnet (120)	16.5	12.7

Source: [15]

The data presents an optimal performance at the garnet size of 30-80 and shows an influence of the roughness of the surface in the performance of the adhesive but more parameters need to be analyzed for better judgment.

#### 2.4. Dry Ice Blasting

Dry ice blasting treatment is based on the difference of dilatation from materials present on the substrate surface removing rust and paint while changing the surface characteristics such as surface roughness [18],[19]. The pellets are at temperatures of  $-78,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  so, using this treatment needs precautions because of the risk of surface fracture [18],[19]. The parameters of control are the ice pellet size (IPS), speed of the pellet jet pressure, and distance of jet [18],[19]. A study, made by [18], analyzed the performance of a surface of AlMg4,5Mn0,4 in adhesive interactions of 3 different Two-components using dry ice blasting varying control parameters and then submitting the treated surface to a shear strength test. In more detail, the surface was mapped before the shear test and showed the performance presented at Table 5. There is also a parameter of wettability that can be obtained of  $87.3^{\circ}$ , in Aluminum Surfaces.

Table 5. Surface characteristics of dry ice treated surface

$v$ (m/min)	IPS(mm)	$R_a \pm s$ ( $\mu\text{m}$ )
0.1	0.5	$0.43 \pm 0.15$
0.5	0.5	$0.42 \pm 0.11$
1.0	0.5	$0.41 \pm 0.11$
0.5	0.1	$0.43 \pm 0.07$
1.0	0.1	$0.46 \pm 0.10$

Source: [18]

#### 2.5. Laser Ablation

Laser ablation is a new process introduced in the procedures of surface cleaning or preparations of steel substrates, which usually are composed of chemical or mechanical treatments [3]. This process uses irradiation for changing the interface substrate by heating the undesirable substances while changing the surface characteristics [20]. In some cases, for preventing the heating process of the surface the laser is pulsed at high frequencies. Some studies made by [20],[21], and [22] show the performance of laser ablation in different scenarios such as in the removal of micro biofouling and performance in adhesion in flat, dimple, groove, and grid patterns.

When analyzing the process of preparation of the surface for adhesion the laser energy density is the control parameter, as well as the diameter of the laser head [22]. The process using laser influence between  $0,17$  to  $5,71\text{ J/mm}^2$  in surfaces of AA 6082 T6 and AISI 304 was mapped by [22] in parameters of roughness and performance on lap shear strength test and the data is presented at Table 6.

Table 6. Laser-cleaned surface characteristics

Density (J/mm <sup>2</sup> )	Diameter (μm)	Substrate	Roughness Ra (μm)
0.14	50	AA 6082 T6	0.98
0.51	50		4.24
0.51	100		2.60
1.14	50		5.18
5.71	50		11.78
0.14	50	AISI 304	1.14
0.51	50		0.94
0.51	100		1.31
1.14	50		1.81
5.71	50		7.54

Source: [22]

After cleaning the substrate, [22] submitted the treated substrate to a shear strength test and all energy densities tested had a better performance than the usual ones such as degreasing and grit blasting.

In the case of laser cleaning the best performance, with a cohesive failure mode, was with the energy densities of 0,51 and 1,14 J/mm<sup>2</sup> that had the best performance, with shear strength values varying from 41.61 to 46.02 MPa, showing of the best substrate/adhesive interaction with a roughness of 0.94 to 1.81 μm at a steel substrate.

### 3. DISCUSSION

The surface characterization, such as  $R_a$ , has great importance on adhesion conditions so it is very relevant that the treatment used not only removes impurities (rust, biofouling, etc.) but also changes these values. The change of surface characteristics is dependent on the control parameters of the treatment and substrate of work. After analyzing those characteristics each treatment has an  $R_a$  achieved derived from each condition the surface was exposed.

The surface generated by milling is considered a surface with poor wetting, which is not ideal for adhesion. With the increase in the velocity of the tool, this parameter is even worse, as shown in Table 1.

As pointed out by the characterization of wetting of the surface, the treatment by alkaline etching and acid cleaning was the most efficient in the adhesion in comparison to the substrate cleaned by degreasing, while also presenting a lesser variation of the data. It was seen that the time of attack changes the surface profile for a rougher as time increases.

In comparison between surface treatments of steel substrate, it was noted that polishing had a better performance than laser ablation in achieving a lower surface roughness. But as this isn't the only relevant parameter, for a better comparison it should be done more test studies of each treatment using the same substrate and adhesive for better evaluation of this procedure.

Although the authors use different control parameter for qualification of adhesive bonding, after obtaining an adequate surface roughness the principal value is the wettability degree as can be seen at Table 7 that compiles the best results from each test the treatment that had the best result was the laser ablation judging by nanometric surface roughness and one of the lower wettability obtained.

Table 7. Treatment performance overview

Treatment	Wettability (degree)	Roughness ( $\mu\text{m}$ )
Milling	92.7	0.173
Polishing	66	0.446
Blasting	19.7	20.9
Dry Ice	87.3	0.41
Laser Ablation	25	0.94

#### 4. REFERENCES

- <sup>1</sup> EBNESAJJAD, SINA. **Adhesives technology handbook**. [s.l.] William Andrew Pub, 2008.
- <sup>2</sup> WEITZENBÖCK, J. R. Introduction to using adhesives in marine and offshore engineering. In: **Adhesives in Marine Engineering**. [s.l.] Elsevier Inc., 2012. p. 1–16.
- <sup>3</sup> DA SILVA, L. F. M.; EL-ZEIN, M. S.; MARTINS, P. **Advanced Joining Processes: Welding, Plastic Deformation, and Adhesion**. [s.l.] Elsevier, 2020.
- <sup>4</sup> **Surface roughness** | KRÜSS Scientific. Disponível em: <<https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/surface-roughness>>. Accessed in: 20 jul. 2022.
- <sup>5</sup> **Contact angle** | KRÜSS Scientific. Disponível em: <<https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/contact-angle>>. Accessed in: 20 jul. 2022.
- <sup>6</sup> GHUMATKAR, A. et al. Influence of adherend surface roughness on the adhesive bond strength. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 13, n. 13, p. 2356–2370, 2016.
- <sup>7</sup> ZAMANI ZAKARIA, A. et al. Effects of aluminum surface treatments on the interfacial fracture toughness of carbon-fiber aluminum laminates. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 172, p. 139–151, 1 Mar. 2017.
- <sup>8</sup> POCIUS, A. **Adhesion in Biological Systems**. [s.l.: s.n.].
- <sup>9</sup> ZHANG, D.; HUANG, Y. Influence of surface roughness and bondline thickness on the bonding performance of epoxy adhesive joints on mild steel substrates. **Progress in Organic Coatings**, v. 153, p. 106135, 1 Apr. 2021.
- <sup>10</sup> VAN DAM, J. P. B. et al. Effect of surface roughness and chemistry on the adhesion and durability of a steel-epoxy adhesive interface. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 96, 1 Jan. 2020.

- <sup>11</sup> MELENTIEV, R.; FANG, F.; NARALA, S. K. R. Influence of different pretreatments on Ti-6Al-4V surface integrity and scratch-resistance of epoxy coating: Analysis of topography, microstructure, chemistry and wettability. **Surface and Coatings Technology**, v. 404, 25 Dec. 2020.
- <sup>12</sup> ISLAM, M. S.; TONG, L.; FALZON, P. J. Influence of metal surface preparation on its surface profile, contact angle, surface energy and adhesion with glass fibre prepreg. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 51, p. 32–41, Jun. 2014.
- <sup>13</sup> PIZZI, A.; MITTAL, K. Handbook of Adhesive Technology, Third Edition. [s.d.].
- <sup>14</sup> SINGH, G. et al. On investigating the soda-lime shot blasting of AZ31 alloy: Effects on surface roughness, material removal rate, corrosion resistance, and bioactivity. **Journal of Magnesium and Alloys**, v. 9, n. 4, p. 1272–1284, 15 Jul. 2021.
- <sup>15</sup> ISLAM, M. S.; TONG, L.; FALZON, P. J. Influence of metal surface preparation on its surface profile, contact angle, surface energy and adhesion with glass fibre prepreg. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 51, p. 32–41, Jun. 2014.
- <sup>16</sup> HARRIS, A. F.; BEEVERS, A. **The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion** **International Journal of Adhesion & Adhesives**. [s.l.: s.n.].
- <sup>17</sup> ADEM, A. M.; AZMERAW, H. E. The manufacturing practices and parameters optimization on abrasive jet machining for surface preparation of mild steels. **Results in Engineering**, p. 100457, jun. 2022.
- <sup>18</sup> ELBING, F. et al. Dry ice blasting as pretreatment of aluminum surfaces to improve the adhesive strength of aluminum bonding joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 23, n. 1, p. 69–79, 2003.
- <sup>19</sup> DONG, S. et al. **Study on the mechanism of adhesion improvement using dry-ice blasting for plasma-sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings**. Journal of Thermal Spray Technology. **Anais...**mar. 2013.
- <sup>20</sup> TIAN, Z. et al. Nanosecond pulsed fiber laser cleaning of natural marine micro-biofoulings from the surface of aluminum alloy. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, 20 Jan. 2020.
- <sup>21</sup> FENG, Z. et al. Effect of laser texturing on the surface characteristics and bonding property of 30CrMnSiA steel adhesive joints. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 47, p. 219–228, 1 Nov. 2019.
- <sup>22</sup> MORONI, F.; MUSIARI, F.; FAVI, C. Effect of the surface morphology over the fatigue performance of metallic single lap-shear joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 97, 1 Mar. 2020.