

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
PROJETO E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO
- MESTRADO PROFISSIONAL

Área de concentração: Projeto e Processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado

ADESIVOS ESTRUTURAIS COMO ALTERNATIVA PARA
UNIÕES MECÂNICAS: ANÁLISE E VALIDAÇÃO

João Henrique da Silva Ribeiro

Passo Fundo

2022



CIP – Catalogação na Publicação

R484a Ribeiro, João Henrique da Silva
Adesivos estruturais como alternativa para uniões
mecânicas [recurso eletrônico]: análise e validação /
João Henrique da Silva Ribeiro. – 2022.
7 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Agenor Dias de Meira Júnior.
Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de
Fabricação) – Universidade de Passo Fundo, 2022.

1. Processos de fabricação. 2. Método dos elementos
finitos. 3. Uniões adesivadas. 4. Atmosfera explosiva.
I. Meira Júnior, Agenor Dias de, orientador. II. Título.

CDU: 621

Catalogação: Bibliotecária Jucelei Rodrigues Domingues - CRB 10/1569

João Henrique da Silva Ribeiro

**ADESIVOS ESTRUTURAIS COMO ALTERNATIVA PARA UNIÕES
MECÂNICAS: ANÁLISE E VALIDAÇÃO**

Orientador: Prof. Dr. Agenor Dias de Meira Júnior

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo

2022

João Henrique da Silva Ribeiro

**ADESIVOS ESTRUTURAIS COMO ALTERNATIVA PARA UNIÕES
MECÂNICAS: ANÁLISE E VALIDAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 09 de maio de 2022

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor Agenor Dias de Meira Júnior
Orientador

Professor Doutor Marcelo Hemkemeier
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Gustavo Prates Mezzomo
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

Agradeço a Universidade de Passo Fundo, pela bolsa,
pelo incentivo e por toda a estrutura de apoio à pesquisa,
tanto para o nosso município, como para nossa região.
Agradeço a Danubia pelo apoio incondicional, mesmo nas horas mais difíceis.
Aos meus pais pelas oportunidades oferecidas.
E acima de tudo, a Deus, por tudo.

“Se eu vi mais longe foi por estar de pé sobre os ombros de gigantes”.
– Isaac Newton

RESUMO

Para realizar alterações em áreas com atmosfera explosiva não é possível a utilização de processos com geração de energia térmica ou a utilização de ferramentas elétricas convencionais. Com base nessa premissa, esta pesquisa busca validar a adesivação estrutural de uniões mecânicas entre estruturas metálicas nesses espaços, buscando trazer uma solução para as alterações estruturais em diversos setores da indústria química. Para a obtenção desse objetivo, este trabalho realiza um estudo bibliográfico sobre todos os temas pertinentes para a aplicação de adesivos estruturais nas uniões adesivadas, envolvendo pesquisa sobre os adesivos estruturais, como também das cargas geradas nas aplicações, nos modelos de cálculo para as uniões e possíveis limitações. O próximo ponto da pesquisa foi a realização de ensaios mecânicos de uniões adesivadas, de acordo com as normas pertinentes para cada tipo de carregamento, com o intuito de obter as características da união gerada pelo adesivo selecionado. Esses dados embasam pontos já esperados, como por exemplo, um baixo valor de resistência mecânica para descascamento, e também adicionam oportunidades de aplicação, como a alta resistência mecânica para tração, efeito que não era esperado. Com base nos dados levantados em ensaios, ficha técnica e revisão bibliográfica, foi possível realizar simulações numéricas em modelos de estruturas adesivadas que representam aplicações práticas de suportes para tubulações. Nestas simulações é analisado o comportamento sobre carregamento estático de uniões adesivadas, como também é calculado a carga máxima suportada em um modelo real de aplicação, a qual foi de aproximadamente 90 kN. Já os três modelos com carregamento estático apresentaram resultados satisfatórios, onde a tensão encontrada no adesivo é significativamente inferior à tensão de escoamento obtida nos ensaios de tração. Assim se torna possível um melhor entendimento do comportamento do material para a aplicação. Também é validada a utilização do método, com algumas restrições, as quais são devidamente apresentadas.

Palavras-chave: Uniões adesivadas; Adesivos estruturais; Atmosfera explosiva; Suportes de tubulação; Elementos finitos;

ABSTRACT

To carry out alterations in areas with explosive atmospheres, it is not possible to use processes with thermal energy generation or the use of conventional electric tools, in this way this research seeks to validate the structural bonding of mechanical joints between new and existing structures in these spaces, seeking to bring an alternative solution for structural alterations in several sectors of the chemical industry. To achieve this objective, this work carries out a bibliographic study on all relevant topics for the application of structural adhesives in these joints, involving research on structural adhesives, as well as the loads generated in these applications, calculation models for these joints and possible limitations. The next point of the research was to carry out mechanical tests of adhesive joints, according to the relevant standards for each type of loading, in order to obtain the characteristics of the union generated by the selected adhesive. These data support points already expected, such as low value of mechanical strength for peeling, and also add application opportunities, such as high mechanical strength for traction, an effect that was not expected.

Based on the data collected in tests, technical data and literature review, it was possible to perform numerical simulations in models of adhesive structures that represent practical applications of supports for pipes. In these simulations, the behavior under static loading of adhesive joints is analyzed, as well as the maximum load supported in a real application model, which was approximately 90 kN. On the other hand, the three models with static loading showed satisfactory results, where the tension found in the adhesive is significantly lower than the yield stress obtained in the tensile tests. In this way a better understanding of the behavior of the material for the application becomes possible, the use of the method is also validated, with some restrictions, which are duly presented.

Key-words: Adhesive unions; Structural adhesives; Explosive atmosphere; Pipe supports; Finite elements;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Concentração de tensão ocasionada devido à furos	20
Figura 2: Molhamento da superfície pelo adesivo.....	26
Figura 3: Efeito da espessura do adesivo sobre a resistência mecânica	29
Figura 4: Tenacidade à fratura versus módulo de cisalhamento.....	30
Figura 5: Resistência à tração versus módulo de cisalhamento.....	30
Figura 6: Principais tipos de uniões adesivadas	32
Figura 7: Principais carregamentos nocivos à juntas adesivadas	33
Figura 8: Modos de falhas em uniões adesivadas.....	34
Figura 9: Malha utilizada por Bjorkund e Hoglind (2007) para análise de união adesivada ...	37
Figura 10: Foto de tubulações de óleo térmico em uma indústria de biodiesel.....	39
Figura 11: Suporte de tubulação semimóvel	40
Figura 12: Suporte de mola para tubulação	41
Figura 13: Exemplos de suportes com fixação total.....	42
Figura 14: Exemplos de suportes guias	43
Figura 15: Exemplo de suporte batente	44
Figura 16: Corpo de prova para ensaio estático conforme ASTM D 1002	46
Figura 17: Primeira etapa da fabricação dos corpos de prova segundo ASTM D 1876.....	47
Figura 18: Corpo de prova pronto para ensaio, seguindo norma ASTM D 1876.....	48
Figura 19: Corpo de prova para ensaio de tração de acordo com ASTM D 897.....	49
Figura 20: Corpo de prova para ensaio de fadiga conforme ASTM D 3166.....	49
Figura 21: Fluxograma do desenvolvimento das atividades	52
Figura 22: Máquina de Ensaio Universal Schenk.....	54
Figura 23: Máquina Servo Pulser Shimadzu	55
Figura 24: Comparativo entre uniões adesivadas com substratos em aço.....	57
Figura 25: Vista frontal do primeiro modelo analisado.....	61
Figura 26: Tubulações alocadas no primeiro modelo analisado.....	61
Figura 27: Vista frontal do segundo modelo analisado	62
Figura 28: Tubulações alocadas no segundo modelo analisado	62
Figura 29: Vista frontal do terceiro modelo analisado	63
Figura 30: Tubulações alocadas no terceiro modelo analisado	63
Figura 31: Primeira estrutura analisada através do software	67
Figura 32: Momentos fletores resultantes na primeira Ftool. estrutura analisada.....	75

Figura 33: Análise, via MEF, no primeiro modelo, utilizando o software SolidWorks.....	68
Figura 34: Deslocamento máximo, no primeiro modelo calculado, através do método dos elementos finitos.....	68
Figura 35: Segunda estrutura analisada através do software Ftool.....	69
Figura 36: Momentos fletores resultantes na segunda estrutura analisada.....	70
Figura 37: Análise, via MEF, no segundo modelo, utilizando o software SolidWorks	70
Figura 38: Deslocamento máximo, no segundo modelo calculado, através do método dos elementos finitos.....	71
Figura 39: Concentrações de tensão no segundo modelo analisado.....	71
Figura 40: Terceira estrutura analisada através do software Ftool	72
Figura 41: Momentos fletores resultantes na terceira estrutura analisada.....	73
Figura 42: Análise, via MEF, no terceiro modelo, utilizando o software SolidWorks	74
Figura 43: Deslocamento máximo, no terceiro modelo calculado, através do método dos elementos finitos.....	74
Figura 44: Primeiro modelo de estrutura adesivada estudado.....	75
Figura 45: Segundo modelo de estrutura adesivada estudado.....	76
Figura 46: Terceiro modelo de estrutura adesivada estudado	76
Figura 47: Corpos de prova fabricados para ensaio de cisalhamento.....	79
Figura 48: Resultados obtidos no ensaio de cisalhamento	80
Figura 49: Corpos de prova fabricados para ensaio de arrancamento	81
Figura 50: Resultados obtidos no ensaio de arrancamento.....	82
Figura 51: a) corpos de prova ensaiados na segunda tentativa. B) corpos de prova ensaiados na primeira tentativa. C) resultados dos ensaios. D) Primeira tentativa de realização do ensaio.....	83
Figura 52: Resultados obtidos no ensaio de tração.....	84
Figura 53:A) Corpo de prova em ensaio. B) Detalhe da fixação do corpo de prova. C) Obtenção de dados	85
Figura 54: Modelo 3D do corpo de prova de tração.....	88
Figura 55: Detalhe da malha utilizada para simulação de corpo de prova de tração.....	88
Figura 56: Materiais utilizados para análise do corpo de prova de tração.....	88
Figura 57: Condições de contorno para simulação de corpo de prova de tração.....	89
Figura 58: Gráfico força versus tempo para simulação do corpo de prova de tração.....	89
Figura 59: Gráfico deformação versus tempo para simulação do corpo de prova de tração....	90
Figura 60: Gráfico tensão versus deformação para simulação do corpo de prova de tração....	90

Figura 61: Malha e modelo utilizados para simulação do ensaio de cisalhamento	91
Figura 62: Gráfico força versus tempo para simulação de corpo de prova de cisalhamento ...	92
Figura 63: Gráfico força versus deslocamento para simulação de corpo de prova de cisalhamento	92
Figura 64: Gráfico tensão de cisalhamento versus tempo para simulação do corpo de prova de cisalhamento	93
Figura 65: Distribuição da tensão ao longo do adesivo do corpo de prova de cisalhamento ...	93
Figura 66: Condições de contorno para simulação de carga necessária para falha	94
Figura 67: Tensão de Von Mises com as propriedades do material guiadas pelo modelo numérico	95
Figura 68: Tensão de Von Mises em vista tridimensional para propriedades obtidas através do modelo numérico	96
Figura 69: Tensão de Von Mises no adesivo superior com propriedades obtidas através do modelo numérico	96
Figura 70: Tensão de Von Mises ao longo do tempo no adesivo central	97
Figura 71 e 72: Tensão de Von Mises no adesivo esquerdo com propriedades obtidas através do modelo numérico	97
Figura 73: Tensão de Von Mises ao longo do tempo no adesivo do lado direito.....	98
Figura 74: Tensão de Von Mises ao longo do tempo no adesivo do lado esquerdo.....	98
Figura 75: Deslocamento ao longo do tempo para o nó central da viga horizontal menor do pórtico	99
Figura 76: Gráfico tensão de Von Mises versus força.....	100
Figura 77: Gráfico tensão de Von Mises versus tempo para o adesivo central.....	100
Figura 78: Carregamento utilizado na simulação do primeiro modelo	101
Figura 79: Tensão de Von Mises com ponto de corte em 1 MPa para o primeiro modelo analisado	102
Figura 80: Tensões de Von Mises no adesivo superior	102
Figura 81: Variação da Tensão de Von Mises ao longo do tempo de aplicação da carga.....	103
Figura 82 e 83: Tensões de Von Mises no adesivo esquerdo, com ponto de corte de 1 MPa	104
Figura 84: Variação da tensão de Von Mises ao longo do tempo para o adesivo do lado esquerdo.....	104
Figura 85: Variação da tensão de Von Mises ao longo do tempo para o adesivo do lado direito	105

Figura 86: A) Malha gerada na segunda estrutura analisada. B) Malha discretizada na região do adesivo para o segundo modelo analisado	105
Figura 87: Tensão de Von Mises calculada no segundo modelo analisado	106
Figura 88: Deslocamento total do segundo modelo analisado	106
Figura 89: Tensão ao longo dos adesivos no segundo modelo analisado.....	107
Figura 90: A) Malha gerada na terceira estrutura analisada. B) Malha discretizada na região do adesivo para o terceiro modelo analisado	108
Figura 91: Tensão de Von Mises calculada no terceiro modelo analisado.....	108
Figura 92: Deslocamento total do terceiro modelo analisado	109
Figura 93: Tensão ao longo do adesivo superior no terceiro modelo analisado.....	109
Figura 94: Tensão ao longo do adesivo lateral no terceiro modelo analisado.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Evolução dos adesivos modernos ao longo dos anos	19
Tabela 2: Comparação das características produtivas dos processos de soldagem e adesivação.....	21
Tabela 3: Comparação entre uniões soldadas e adesivadas.....	22
Tabela 4: Características dos vários tipos de adesivos	23
Tabela 5: Vantagens e limitações dos adesivos estruturais mais empregados	24
Tabela 6: Propriedades dos principais grupos de adesivos estruturais	25
Tabela 7: Propriedade de adesivos estruturais frequentemente utilizados para metais	31
Tabela 8: Queda da resistência mecânica em função da temperatura	46
Tabela 9: Fases do projeto mecânico.....	51
Tabela 10: Composição química do aço ASTM A36.....	56
Tabela 11: Propriedades mecânicas do aço ASTM A36	56
Tabela 12: Propriedades do adesivo Sikadur 32.....	58
Tabela 13: Cargas geradas pela força peso na Simulação 01	66
Tabela 14: Cargas geradas pela força peso na Simulação 02	69
Tabela 15: Cargas geradas pela força peso na Simulação 03	72
Tabela 16: Resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento.....	80
Tabela 17: Resultados obtidos nos ensaios de arrancamento	81
Tabela 18: Resultados obtidos nos ensaios de tração	84
Tabela 19: Grupos para ensaio e cargas aplicadas.....	86
Tabela 20: Resultados dos ensaios de fadiga.....	86

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivo	17
1.3	Objetivos específicos.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Revisão histórica.....	18
2.2	Vantagens e desvantagens.....	19
2.2.1	Vantagens de uniões adesivadas.....	20
2.2.2	Desvantagens de uniões adesivadas	21
2.2.3	Comparativo com o processo de soldagem	21
2.3	Tipos de adesivos	22
2.4	Teoria da adesão	25
2.4.1	Adsorção física	26
2.4.2	Ligação química	27
2.4.3	Difusão	27
2.4.4	Eletrostática	27
2.4.5	Intertravamento mecânico	27
2.4.6	Teoria da camada de interface	27
2.5	Espessura da camada de adesivo	28
2.6	Seleção de adesivos	29
2.7	Preparação de superfícies	31
2.8	<i>Design</i> de uniões adesivadas	32
2.9	Tipos de carregamento.....	33
2.10	Falha em uniões adesivadas.....	33
2.11	Elementos finitos.....	34
2.12	Atmosfera explosiva	38
2.13	Suportes de tubulação	38
2.13.1	Suportes destinados a sustentar os pesos.....	39
2.13.2	Suportes destinados a limitar os movimentos dos tubos	42
2.14	Cargas atuantes em suportes de tubulação	44
2.14.1	Cargas estáticas	44
2.14.2	Cargas dinâmicas.....	45

2.15	Efeitos da Temperatura sobre uniões adesivadas	45
2.16	Ensaio experimental	46
2.16.1	Corpo de prova para ensaio de resistência ao cisalhamento.....	46
2.16.2	Corpo de prova para ensaio de resistência ao descascamento.....	47
2.16.3	Corpo de prova para ensaio de resistência à tração	48
2.16.4	Corpo de prova para ensaio de fadiga	49
2.17	Patentes.....	50
2.18	Metodologia de trabalho	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
3.1	Metodologia de trabalho	52
3.2	Identificação da necessidade.....	53
3.3	Pesquisa de suporte	53
3.3.1	Ensaio experimental	53
3.3.2	Materiais	55
3.3.2.1	<i>O substrato</i>	<i>55</i>
3.3.2.2	<i>O adesivo.....</i>	<i>56</i>
3.3.2.3	<i>Espessura do adesivo utilizado</i>	<i>58</i>
3.4	Especificação das tarefas necessárias	59
3.5	Síntese	59
3.5.1	Simulações numéricas	60
3.5.1.1	<i>Primeiro modelo para simulação.....</i>	<i>60</i>
3.5.1.2	<i>Segundo Modelo para Simulação.....</i>	<i>61</i>
3.5.1.3	<i>Terceiro Modelo para Simulação.....</i>	<i>62</i>
3.6	Análise	64
3.7	Seleção	64
3.8	Modelagem e simulações	65
3.8.1	Primeiro modelo para simulação	65
3.8.2	Segundo modelo para simulação	69
3.8.3	Terceiro Modelo para Simulação	71
3.9	Simulação numérica dos adesivos sob os carregamentos	75
3.10	Patente	77
3.10.1	Estado da arte	77
3.10.2	Reivindicação	78
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	79

4.1	Resultados dos ensaios de cisalhamento	79
4.2	Resultado dos ensaios de arrancamento.....	81
4.3	Resultado dos ensaios de tração	83
4.4	Resultados dos ensaios de fadiga.....	85
4.5	Simulação numérica de ensaio de tração segundo norma D 897-01	87
4.6	Simulação numérica de ensaio de cisalhamento segundo norma ASTM D 1002.....	91
4.7	Análise de colapso e carga necessária para a falha	94
4.8	Resultado do primeiro modelo de simulação	101
4.9	Resultado do Segundo Modelo de Simulação	105
4.10	Resultado do Terceiro Modelo de Simulação	107
5	CONCLUSÕES	111
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	112
6	REFERÊNCIAS	113
	ANEXOS	118

1 INTRODUÇÃO

A indústria química é vital para a economia moderna, sendo uma importante produtora de matérias primas e também de produtos acabados, produzindo produtos químicos orgânicos e inorgânicos, os quais são utilizados em diversos setores da economia e da sociedade.

De acordo com o relatório anual de 2020 da Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM, 2020) atualmente há 961 fábricas de produtos químicos no Brasil, tendo este setor um faturamento líquido de 101,7 bilhões de dólares no ano do relatório, com o principal destaque para a fabricação de produtos químicos de uso industrial e também para a fabricação de produtos farmacêuticos. Atualmente a indústria química representa 2,3% do PIB brasileiro, sendo a terceira maior participação no PIB industrial.

Em um cenário competitivo, a indústria química brasileira, de acordo com a ABIQUIM, é a sexta maior do mundo. Com constante crescimento, Antunes; Galera, Rubinstein (2011, p. 5) apontam que os principais desafios para o crescimento da indústria atualmente são a qualificação de recursos humanos, a organização da estrutura da indústria atual, matérias primas competitivas e infraestrutura logística.

Alguns setores da indústria química possuem unidades produtivas onde a utilização de produtos inflamáveis é essencial para o processo, como por exemplo o setor petroquímico, ou unidades de extração de óleo vegetal. Nestes ambientes há a formação de uma atmosfera explosiva, onde há mistura de substâncias inflamáveis com ar atmosférico. Nestas áreas há procedimentos especiais para operação e manutenção, também há equipamentos elétricos projetados especificamente para esta aplicação, fatores que agregam um alto custo a implantação e manutenção destas unidades fabris.

Como este ambiente traz ar e substâncias que podem caracterizar um combustível, é de suma importância haver o controle de outro comburente, a fonte de energia, ou de ignição. Desta forma nestas unidades é extremamente proibido a utilização de equipamentos elétricos convencionais, ou processos de fabricação que inerentemente estejam ligados a produção de calor, como por exemplo, os processos de soldagem.

Com estes fatores em vista, os processos de manutenção ou ampliação das unidades fabris podem ser feitos utilizando equipamentos que não impactem nestas premissas, ou então, durante paradas pré-programadas da unidade, onde o processo produtivo é desligado, todas as substâncias de caráter inflamável são removidas e somente após isto, é possível iniciar as atividades. Esta segunda situação é a mais utilizada hoje, a qual apresenta o impacto negativo

de haver perdas de fabricação durante todo o processo de remoção destas substâncias, além claro, do período para realizar as alterações.

As intervenções realizadas no interior de uma unidade fabril química podem ser de diversas formas, envolvendo manutenções, substituições de equipamentos ou ampliações. Entre este último grupo há a necessidade de adição de componentes mecânicos.

Nesse trabalho realiza-se um estudo sobre a utilização de adesivos estruturais como solução para realizar uniões estruturais em ambientes com atmosferas explosivas. As uniões adesivadas dispensariam processos convencionais, como soldagem ou utilização de uniões parafusadas, de forma a poder ser feito com a unidade fabril operante, dispensando paradas de produção.

1.1 Justificativa

Ampliações e melhorias em unidades em atmosfera explosiva usualmente só podem ser executadas durante as paradas fabris pré-programadas, algo que pode levar meses, ou até mesmo anos, para ocorrer. Esta demora para a execução dos serviços impacta diretamente no lucro das companhias, tendo em vista que a nova capacidade demorará mais para ser executada.

Com base nisso, há espaço para processos alternativos, os quais poderiam ser executados durante o regime normal de operação da unidade. Baseado nestas premissas, surge a intenção de avaliar adesivos estruturais como solução para uniões mecânicas de alterações estruturais.

Adesivos estruturais já possuem uma ampla aplicação em diversas indústrias, podendo ser citados a indústria aeronáutica, espacial e automobilística. Desta maneira, há um respaldo maior para o estudo, tendo em vista a validação da utilização em outros segmentos. Estes materiais dispensam a utilização de ferramentas elétricas para aplicação, bem como não geram calor significativo durante o processo de cura, podendo ser utilizados durante a operação das unidades fabris com atmosfera explosiva.

A validação dos adesivos como elementos de união para estruturas permitiria, por exemplo, confeccionar e instalar suportes de tubulações novos em estruturas já existentes, sendo possível pré-fabricar os perfis fora da unidade, e apenas uni-los a unidade através da adesivação. Esta operação então seria feita sem interrupção do funcionamento da unidade industrial, podendo trazer melhorias sem o ônus de baixa produção.

1.2 Objetivo

O objetivo geral do trabalho é avaliar a empregabilidade e os limites de utilização para uniões adesivadas empregadas para suportes de tubulação. Esta dissertação foca em uniões compostas por substratos de aço, com adesivo epóxi Sikadur 32, sendo a espessura do mesmo, variável com um limite máximo de 1 mm.

1.3 Objetivos específicos

Para o atendimento do objetivo principal, é necessário desenvolver uma sequência de objetivos específicos.

- Realizar um estudo sobre adesivos estruturais e os tipos de esforços que estes podem suportar.
- Selecionar um adesivo estrutural para uniões adesivadas para suporte de tubulações.
- Realizar ensaios de tração e fadiga em corpos de prova com o adesivo selecionado.
- Elaborar um levantamento bibliográfico sobre os carregamentos em uniões adesivadas e os ensaios necessários para avaliar cada caso de carregamento.
- Realizar Análise Estática utilizando o método dos elementos finitos dos suportes de fixação de tubulação selecionados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado o embasamento teórico sobre os principais temas necessários para o entendimento do trabalho. Assim é apresentado um estudo dos seguintes temas: revisão histórica, vantagens e desvantagens de uniões adesivadas, tipos de adesivos, teoria da adesão, espessura da camada de adesivo, seleção de adesivos, preparação de superfícies, *design* de uniões adesivadas, tipos de carregamento, falhas em uniões adesivadas, elementos finitos, atmosfera explosiva, suportes de tubulação, cargas atuantes em suportes de tubulação, efeitos da temperatura sobre uniões adesivadas. Estes são os principais tópicos para o desenvolvimento teórico e prático do trabalho, os quais auxiliam no entendimento geral dos capítulos seguintes.

2.1 Revisão histórica

De acordo com Petrie (2007, p. 4) adesivo pode ser definido como uma substância capaz de segurar pelo menos duas superfícies juntas de uma maneira forte e permanente. Estas substâncias vêm sendo empregadas há milhares de anos, com as mais diversas finalidades. Esteves (p. 3, 1990) afirma que os primeiros registros de utilização datam de 3300 anos atrás, no Egito antigo, onde figuras descrevem a colagem de peças de caça em panóplias de madeira de figueiras, aparecendo representados na gravura o pote contendo a cola e respectivo pincel. Teixeira (2000, p. 6) também adiciona que estas colas eram feitas a base de gelatina, caseína, albumina, ovo, grude, balsâmos e resinas extraídas de diferentes árvores.

Outro adesivo amplamente utilizado na antiguidade foi o betume, o qual de acordo com Esteves (1990, p. 3) era utilizado na vedação de embarcações romanas que navegavam pelo mediterrâneo. O betume também é citado na bíblia, o qual supostamente teria sido a argamassa utilizada para a construção da Torre de Babel.

Diversos outros adesivos de base animal ou vegetal foram utilizados ao longo da história, mas segundo Petrie (2007, p. 10) a era dos adesivos modernos teve início na década de 1910, com o desenvolvimento dos adesivos de fenol formaldeído para a indústria de madeira compensada. Já nas décadas de 1940 e 1950 houve crescimento significativo no desenvolvimento de adesivos estruturais, principalmente para a indústria aeronáutica militar.

Koppe (2014, p. 18) aponta que atualmente pode-se observar uma progressiva utilização dos adesivos em diversas áreas como indústria têxtil, calçadista, automotiva, implementos rodoviários e principalmente na indústria aeronáutica e aeroespacial.

A evolução dos adesivos considerados modernos pode ser melhor vista através da Tabela 1.

Tabela 1: Evolução dos adesivos modernos ao longo dos anos

Década aproximada da disponibilidade comercial	Adesivo ou selante
Pré 1910	Cola de ossos de animais Cola de peixe Colas vegetais
1910	Fenol formaldeído Cola de caseína
1920	Éster de celulose Resina alquídica Borracha ciclizada em adesivos Policloropreno (Neoprene) Adesivos de soja
1930	Formaldeído de Ureia Fitas sensíveis à pressão Filmes adesivos de resina fenólica Colas de madeira com acetato de polivinila
1940	Nitrilo fenólico Borracha clorada Melamina formaldeído Vinil fenólico Acrílico Poliuretanos
1950	Epóxis Cianoacrilatos Anaeróbicos Ligas epóxi
1960	Poliimida Polibenzimidazol Poliquinóxalina
1970	Acrílico de segunda geração Acrílico sensível a pressão Poliuretanos estruturais
1980	Endurecedores para resinas termofixas Epóxis à base de água Adesivos de contato à base de água Hot melts formáveis e espumados
1990	Epóxi modificado com poliuretano Hot melts curáveis Sistemas de cura por luz e radiação UV

Fonte: Petrie (2007, p. 11).

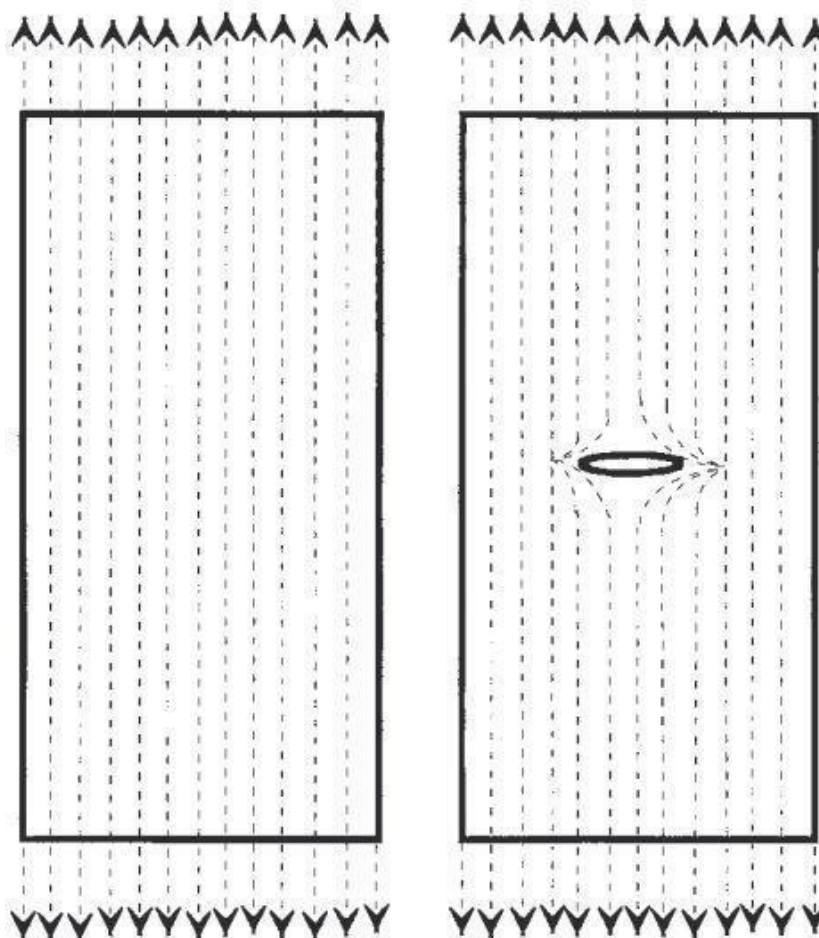
2.2 Vantagens e desvantagens

Uniões adesivadas possuem certas vantagens e desvantagens quando comparadas com uniões mecânicas convencionais, como uniões soldadas, parafusadas ou rebitadas. Estes fatores devem ser considerados quando projetadas uniões adesivadas.

2.2.1 Vantagens de uniões adesivadas

Campbell (2006, p. 370) cita que uniões adesivadas possuem uma melhor distribuição da tensão, eliminando concentradores de tensão causados por furações, o que também proporciona uma melhor vida útil em fadiga. Essa distribuição é melhor exemplificada na Figura 1.

Figura 1: Concentração de tensão ocasionada devido à furos



Fonte: Pocius (2012, p. 3).

Floor (2014, p. 25) também cita que as uniões adesivadas possuem a capacidade de evitar corrosão galvânica, há a possibilidade de realizar a união entre vários tipos de materiais diferentes, possibilitam a utilização de pequenas tolerâncias, não há um aumento significativo de peso no corpo e também possibilitam configurações complexas de juntas.

2.2.2 Desvantagens de uniões adesivadas

As principais desvantagens, de acordo com Campbell (2006, p. 371), são a dependência do preparo da superfície de aplicação, a qual influenciará significativamente a resistência mecânica, e também o fato de a junta adesivada ser uma união permanente, sendo de difícil desmontagem, podendo ocasionar danos aos substratos quando desmontada.

Floor (2014, p. 29) também cita que entre as desvantagens está a influência do ambiente na durabilidade do adesivo e a necessidade de armazenamento especial em alguns casos.

2.2.3 Comparativo com o processo de soldagem

Pocius (2012, p. 5) traz duas tabelas comparando as características produtivas e as uniões produzidas pelo processo de soldagem e através da adesivação. Estes comparativos constam nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2: Comparação das características produtivas dos processos de soldagem e adesivação

Processo de soldagem	União adesivada
Pouca ou nenhuma preparação de substrato é necessária.	A preparação de superfície aderente é muitas vezes necessária.
O tratamento térmico pós soldagem às vezes é necessário.	A pós cura é muitas vezes vantajosa.
O equipamento de soldagem é caro, pesado e demanda alta potência elétrica.	O equipamento só é necessário às vezes e pode ser tão simples quanto um forno.
Fios, hastes e pontas de soldagem são baratos (exceto para alumínio).	Os adesivos são moderadamente caros, dependendo do tipo de adesivo selecionado.
A taxa de produção pode ser rápida.	A taxa de produção pode ser rápida, mas também pode ser lenta dependendo do tipo de adesivo.
Testes não destrutivos são aplicáveis, mas são caros.	Testes não destrutivos estão disponíveis, mas não revelam o limite de resistência à tração da junta.
O soldador deve remover os materiais sensíveis ao calor e / ou materiais inflamáveis para longe do processo de soldagem.	Dependendo das condições de cura, não há necessidade de remover materiais sensíveis ao calor da área de colagem.

Fonte: Pocius (2012, p. 5).

Tabela 3: Comparação entre uniões soldadas e adesivadas

Junta soldada	Junta adesivada
Permanente	Permanente (com preparação de superfície adequada).
Tensão em pontos específicos.	Distribuição de tensão predominantemente uniforme.
As juntas muitas vezes precisam de acabamento para a estética.	Sem marcas nas superfícies.
Útil apenas para materiais idênticos.	Materiais diferentes são facilmente unidos.
Resistência a altas temperaturas.	Resistência à temperatura de baixa à moderada.
Baixa resistência à fadiga.	Excelente resistência à fadiga.

Fonte: Pocius (2012, p. 5).

2.3 Tipos de adesivos

Há vários tipos e grupos de adesivos, classificados a partir de seu uso, composição química e modo de aplicação. Um adesivo estrutural, por exemplo, normalmente é utilizado para aplicações de alta responsabilidade (quando o adesivo é o responsável único pela união). A expressão “estrutural primário” descreve adesivos de altíssima responsabilidade, como os utilizados na indústria aeronáutica e naval, e “estrutural secundário”, outras aplicações, adotando-se, arbitrariamente, um valor de resistência de 6,8 MPa (1000 psi) para diferenciar os dois tipos. Mendes (2005, p. 38).

Na presente dissertação, será adotada a divisão em dois grupos, sintéticos e naturais, onde devido à importância para o estudo em questão, apenas o primeiro grupo será abordado, o qual é subdividido em dois grupos, os termofixos e os termoplásticos.

De acordo com Countryman, Blomquist e Gillespie (1978, p. 78) as resinas termofixas durante a utilização são convertidas para um estado duro, infundível e insolúvel devido a reações químicas causadas pela utilização de catalisadores e/ou calor, o que torna a reação não reversível quando a cura do adesivo é obtida. Mendes (p. 38, 2005) também cita que essas resinas são polímeros de alto peso molecular, que formam substâncias rígidas e com alta resistência mecânica, tendo normalmente um alto módulo de elasticidade, não suportando combustão e tendo uma boa resistência química.

Já as resinas termoplásticas, conforme Countryman, Blomquist e Gillespie (1978, p. 78) são resinas fornecidas já totalmente reagidas quimicamente, sendo que sua aplicação envolve apenas alterações físicas, como formação de filmes. Mendes (2005, p. 40) cita que estas não são tidas como bons adesivos, principalmente pelo fato de sua dureza possuir alta sensibilidade

à mudanças de temperatura, podendo apresentar um grande endurecimento em temperaturas baixas, ou amolecer em temperaturas elevadas.

Mendes (2005, p. 42) também traz classificações complementares, a qual engloba tantos adesivos termofixos como termoplásticos, a qual consta na Tabela 4.

Tabela 4: Características dos vários tipos de adesivos

Tipos de adesivos	Características
Estrutural	<ul style="list-style-type: none"> ● Juntas podem ser submetidas a grandes taxas de carga máxima de falha de carregamento no ambiente de serviço. ● A maioria dos materiais são termofixos. ● Sistemas compostos de um ou dois componentes. ● Cura do adesivo em temperatura alta ou ambiente. ● Larga escala de custo. ● Diversas famílias químicas com variação quanto à resistência e flexibilidade.
Cola Quente (Hot Melt)	<ul style="list-style-type: none"> ● 100% termoplástico sólido. ● Molda-se em líquido de baixa viscosidade quando aplicado em superfícies. ● Ajuste rápido, sem cura. ● Viscosidade ao moldar-se é importante propriedade. ● Diferentes formulações permitem sensibilidade ou não à pressão. ● Compostos com diferentes aditivos para garantir a adesividade de contato (tack) e a capacidade de molhamento.
Adesivo Sensível a Pressão (ASP)	<ul style="list-style-type: none"> ● Mantém substratos unidos, quando aplicada leve pressão à temperatura ambiente. ● Disponível com base de solvente orgânico, base d'água ou sistema de cola quente a bastão (hot melt). ● Algumas formulações requerem composição consistente (base de borracha) a fim de alcançar “pega adesiva”, visto que outros (poliacrílicos) não necessitam. ● Disponíveis em filmes ou fitas, com (forma mais comum) ou sem suporte, na forma de substrato direto. ● Principalmente utilizados com fitas ou etiquetas.
Base D'água	<ul style="list-style-type: none"> ● Inclusive os adesivos dissolvidos ou dispersos (látex) em água. ● Em substratos porosos, a água é absorvida ou evaporada a fim de permitir a colagem. ● Em substratos não porosos a água deve ser removida previamente a fim de permitir a colagem. ● Alguns substratos são colados em função da reativação da secagem do filme adesivo sob temperatura ou pressão. ● Muitos são baseados em adesivos naturais (animal ou vegetal). ● Não são sensíveis à pressão (maioria), porém, auxiliam a aplicação.
Ultra Violeta (UV) Feixe de Elétrons (FE)	<ul style="list-style-type: none"> ● 100% líquidos reativos à cura, transformando-se em sólidos. ● Um dos substratos deve ser transparente aos raios ultravioletas (UV), exceto quando adesivos de duas fases são utilizados. ● Em algumas formulações de adesivos curáveis a UV, o mecanismo da segunda cura ocorre, quando introduzido calor ou umidade ou quando eliminado o oxigênio (cura anaeróbica). ● Nos adesivos curados a feixes de elétrons (FE), a densidade do material afeta a penetração dos raios e o resultado final.

Fonte: Mendes (p. 43, 2005).

Mendes (2005, p. 45) também cita que a maioria dos adesivos estruturais são polímeros termofixos, sendo utilizados apenas alguns termoplásticos, o que se deve há diversos fatores, como o primeiro grupo apresentar boa resistência ao calor, boa resistência química, são de fácil modelação, entre outras características. Ainda de acordo com Mendes (p. 45, 2005) é possível citar as principais famílias químicas de adesivos estruturais como: Epóxis, Poliuretanos, Acrílicos modificados, Cianoacrilatos e Anaeróbicos, sendo que as características destas famílias químicas são apresentadas nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5: Vantagens e limitações dos adesivos estruturais mais empregados

Tipos de adesivos estruturais	Vantagens	Limitações
Epóxi	<ul style="list-style-type: none"> ● Grande força de união. ● Boa resistência aos solventes. ● Alta capacidade de preencher espaços. ● Boa resistência em altas temperaturas. ● Diversificação em formulações. ● Relativo baixo custo. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Reação exotérmica. ● Sistema de dois componentes, requer cuidados na proporção e na homogeneização da mistura. ● Formulação com um componente requer armazenamento refrigerado e elevada temperatura de cura (ativador). ● Pequeno tempo de utilização para processamento (perda material).
Poliuretano	<ul style="list-style-type: none"> ● Variação no tempo de cura. ● Grande resistência. ● Excelente flexibilidade mesmo em baixas temperaturas. ● Um ou dois componentes, cura em diversas temperaturas. ● Custo razoável. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Material sensível à umidade, curado ou não curado. ● Limitada resistência em alta temperatura com ou sem umidade. ● Pequeno tempo de utilização para processamento (perda material). ● Requer equipamento especial para homogeneização e liberação do adesivo.
Acrílico modificado	<ul style="list-style-type: none"> ● Boa flexibilidade. ● Boa resistência ao cisalhamento e arrancamento. ● Não requer homogeneização. ● Age em superfície contaminada (óleo). ● Cura à temperatura ambiente. ● Custo moderado. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Baixa resistência em altas temperaturas. ● Cura mais lenta quando comparado a outros grupos. ● Tóxico e inflamável, exalando forte odor. ● Requer equipamento especial para liberação do adesivo.
Cianoacrilato	<ul style="list-style-type: none"> ● Cura rápida à temperatura ambiente. ● Um componente. ● Alta força de tração. ● Grande período de validade. ● Boa aderência ao metal. ● Aplicação diretamente da embalagem. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Alto custo. ● Baixa durabilidade em algumas superfícies. ● Resistência a solventes limitada. ● Baixa resistência em alta temperatura. ● Perigo na aplicação, agride a pele.
Anaeróbico	<ul style="list-style-type: none"> ● Cura rápida à temperatura ambiente. ● Boa resistência aos solventes. ● Não requer homogeneizações. ● Período de validade indefinido. ● Alta resistência para alguns substratos. ● Não tóxico, custo moderado. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Não recomendado para superfícies permeáveis. ● Não cura ao ar como um filete úmido. ● Limitado espaçamento entre as peças (não atua em grandes espaçamentos).

Fonte: Mendes (p. 46, 2005).

Tabela 6: Propriedades dos principais grupos de adesivos estruturais

Propriedades dos Adesivos Estruturais	Epóxi	Poliuretano	Acrílico modificado	Cianoacrilato	Anaeróbico
Substrato Colado	Maioria	Mais liso, não poroso	Mais liso, não poroso	Metal ou plástico não poroso	Metal, vidro ou termofixo
Faixa temperatura de serviço (°C)	-55 a 121	-157 a 79	-73 a 121	-55 a 79	-55 a 149
Resistência ao impacto	Baixa	Excelente	Boa	Baixa	Regular
Tensão de cisalhamento (MPa)	15,4	15,4	25,9	18,9	17,5
Resistência de arrancamento (N/m)	< 525	14.000	5.250	< 525	1.750
Cura aquecida ou homogeneização requerida	Sim	Sim	Não	Não	Não
Resistência à solvente	Excelente	Boa	Boa	Boa	Excelente
Resistência à umidade	Excelente	Regular	Boa	Baixa	Boa
Limitação ao espaçamento entre as partes a serem unidas (mm)	Nenhum	Nenhum	0,762	0,254	0,635
Odor exalado	Suave	Suave	Forte	Moderado	Suave
Toxicidade	Moderada	Moderada	Moderada	Baixa	Baixa
Flamabilidade	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Baixa

Fonte: Mendes (p. 47, 2005).

2.4 Teoria da adesão

Adesão, de acordo com Fernandes (2011, p. 19) é compreendida pela resistência direta entre dois materiais que se combinam quimicamente, de maneira a tratar-se de uma ligação intramolecular dos compostos envolvidos, seja por reações químicas ou físicas.

Existem diferentes teorias que explicam os fenômenos de adesão, tratando-se de um assunto bastante vasto. A cada uma destas teorias são associados resultados experimentais, verificando-se a existência por vezes de observações contraditórias, indicando que os fenômenos de adesão não dependem em separado de uma só teoria, mas da associação de mais

do que uma, não permitindo atribuir a uma das teorias um caráter de generalidade na explicação destes fenômenos. (ESTEVEES, 1990, p. 28)

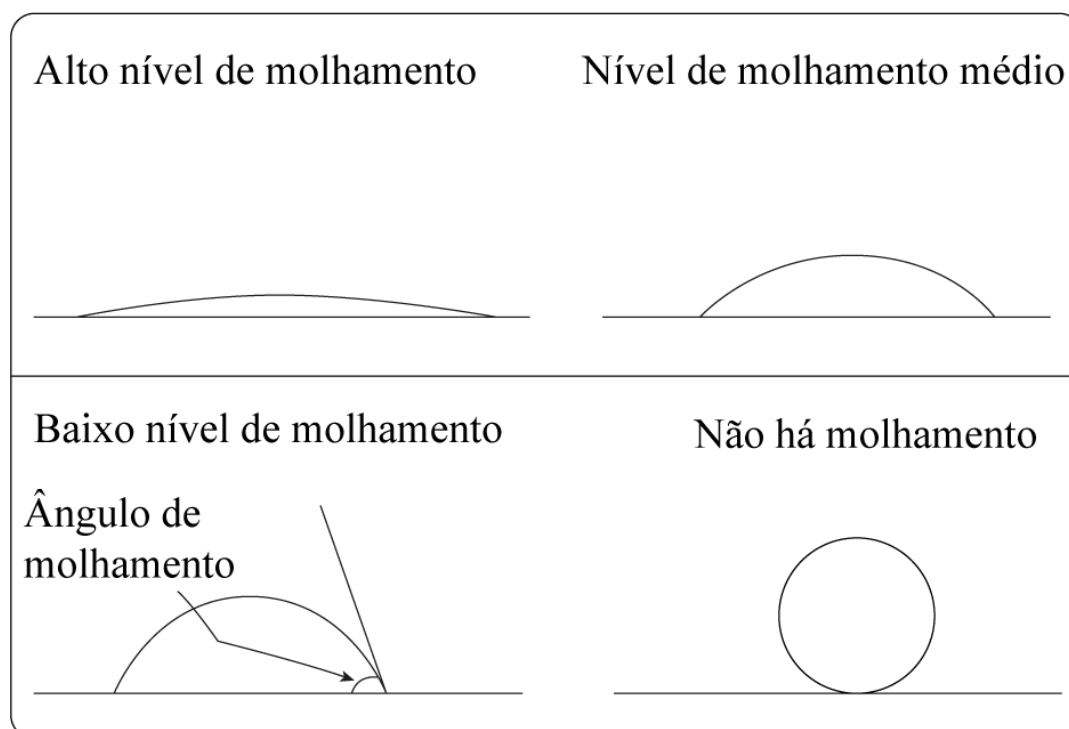
Ainda não há uma clareza total sobre o funcionamento dos mecanismos de adesão, de forma que existem diversas teorias sobre como ocorre a adesão. De acordo com Comyn (1997, p. 4), há seis principais teorias que são: adsorção física, ligação química, difusão, eletrostática, intertravamento mecânico e fragilidade nas camadas de interface.

2.4.1 Adsorção física

Segundo Boyes (1998, p. 7) esta teoria propõe que os materiais irão aderir graças às forças interatômicas e intermoleculares, as quais são geradas pelos átomos nas superfícies do adesivo e do aderente. De acordo com Quini (2011, p. 24) na adsorção há a atuação das forças secundárias de Van der Waals, de forma que para haja esta, é necessário que as superfícies não estejam a mais de 50 nanômetros de distância, devendo haver, portanto, um contato molecular bem próximo. Ainda de acordo com Boyes (1998, p. 7) esta é a teoria mais aceita.

Koppe (2014, p. 31) traz que o fenômeno que origina este contato é chamado de molhamento, e que um molhamento eficiente é caracterizado por uma maior superfície de contato entre o adesivo e o substrato, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2: Molhamento da superfície pelo adesivo



Fonte: Koppe (2014, p. 32).

2.4.2 Ligação química

A teoria das ligações química aponta para as ligações covalente, iônica e pontes de hidrogênio nas superfícies do adesivo e do aderente, as quais também são chamadas de forças primárias. Estas ligações, conforme Pizzi e Mittal (2003, p. 71), são dependentes da reatividade das superfícies do adesivo e aderente.

2.4.3 Difusão

O conceito fundamental da teoria da difusão, de acordo com Quini (2001, p. 27) é que o adesivo atua por interdifusão de moléculas com o substrato, de maneira que ela é aplicável quando ambos os materiais são de origem polimérica. Comyn (1997, p. 9) também acrescenta que tal fenômeno só irá ocorrer se as cadeias dos polímeros forem móveis, ou seja, devem estar acima da temperatura de vitrificação.

2.4.4 Eletrostática

Esta teoria propõe que forças eletrostáticas ocorrem na forma de uma interface entre o adesivo e o substrato, atuando como uma resistência à separação, conforme Quini (2001, p. 26), a qual pode ser confirmada pela ocorrência de descargas elétricas quando um adesivo sofre a remoção do substrato.

2.4.5 Intertravamento mecânico

As superfícies adesivadas, assim como qualquer outra, não serão totalmente lisas, possuindo um grau de rugosidade, de forma que o adesivo pode ser capaz de preencher estas micro cavidades, aumentando a área de contato. De acordo com Quini (2011, p. 26) este efeito irá formar uma ancoragem, onde a resistência da junta será uma soma da adesão ocorrida devido às interações primárias e secundárias, com o efeito da ancoragem mecânica ocorrido.

2.4.6 Teoria da camada de interface

Esta teoria é aplicada quando há falhas coesivas, aquela que ocorre entre as camadas próximas à interface do adesivo e do substrato. Conforme Quini (2011, p. 27) esta camada com

menor resistência pode ser gerada devido ao adesivo, substrato, ambiente ou uma combinação dos três fatores, a qual pode ocorrer como decorrência de impurezas concentradas próximas à área de colagem, tanto físicas como químicas.

Comyn (1997, p. 10) afirma que nem todos os contaminantes irão ter este efeito, podendo alguns serem dissolvidos pelo próprio adesivo, o que se torna uma vantagem dos adesivos acrílicos em comparação aos adesivos epóxis, devido à habilidade do primeiro dissolver óleos e graxas.

2.5 Espessura da camada de adesivo

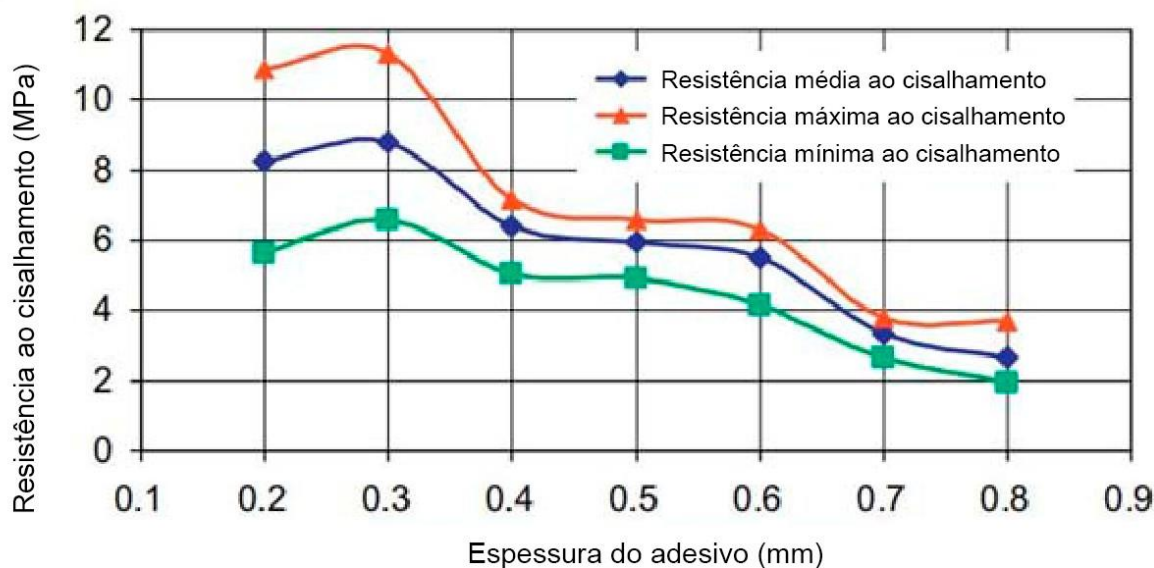
A espessura do adesivo é um dos parâmetros mais significativos em uniões adesivadas. Recentemente, muitos estudos experimentais mostraram que a resistência mecânica das uniões adesivadas é substancialmente influenciada pela espessura do adesivo. (XU; WEI, 2013, p. 158).

Desta forma é possível citar os estudos realizados por Liao; Huang; Sawa (2013) e Arenas et al (2010) os quais concluem que a resistência mecânica da união será inversamente proporcional à espessura da camada de adesivo. De acordo com Adams e Peppiatt (1974, p. 185) isto ocorre devido à três fatores: maiores concentrações de tensões, maior probabilidade da presença de defeitos internos e a taxa de deformação inferior.

Koppe (2014, p. 38) afirma que existem diversas formas de controlar a espessura da camada de adesivo, como por exemplo, com a utilização de dispositivos mecânicos que definem a espessura ou a introdução de pequenas esferas de vidro que garantem uma determinada espessura a junta.

A Figura 3 traz uma análise demonstrando os efeitos da espessura do adesivo, onde é possível notar a queda da resistência ao cisalhamento conforme há o aumento da espessura da camada de adesivo. A Figura 3 contempla uma amostra com espessura entre 0,2 e 0,8 mm, onde, a resistência média ao cisalhamento varia de aproximadamente 8 MPa para aproximadamente 3 MPa, totalizando uma variação de 62,5%. Espessuras maiores que a apresentada na figura podem ser aplicadas, porém irão implicar em uma queda ainda maior na resistência ao cisalhamento.

Figura 3: Efeito da espessura do adesivo sobre a resistência mecânica



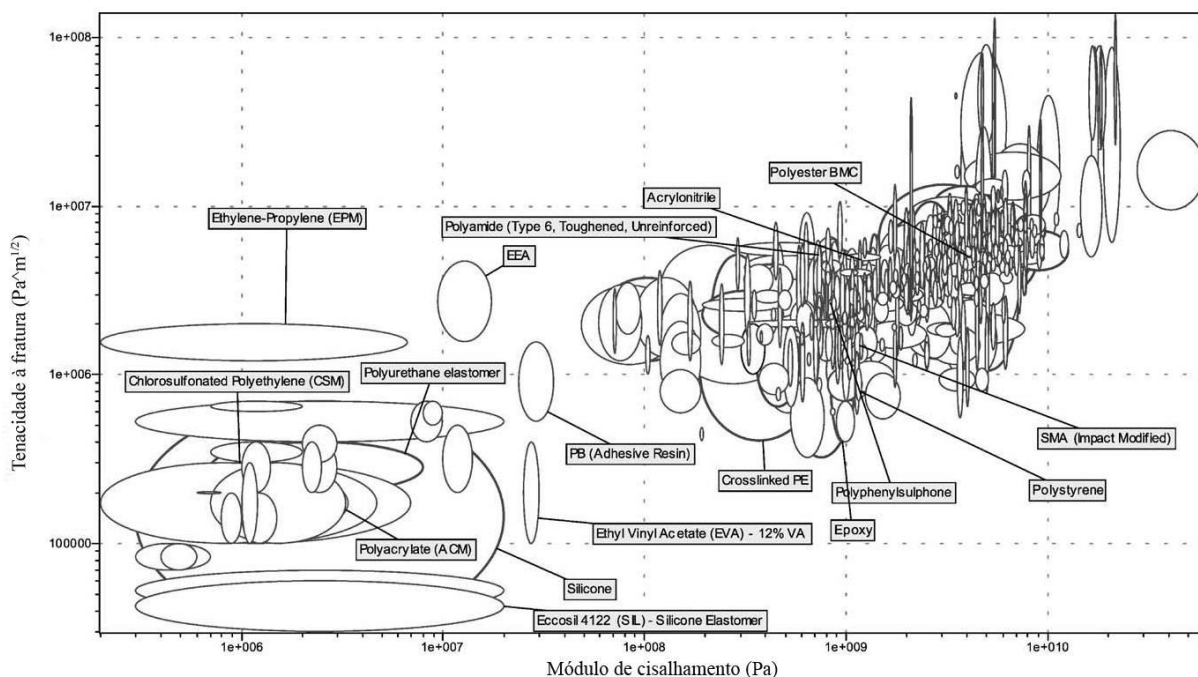
Fonte: Arenas et al (2010, p. 163).

2.6 Seleção de adesivos

A seleção de adesivos estruturais é um processo complexo, no qual devem ser avaliados vários aspectos da aplicação, como tipo de superfície à ser aplicado, exposição à corrosão (umidade, salinidade, dentre outras), temperaturas de trabalho (principalmente fora do intervalo entre -30°C e 90°C), a complexidade da conexão, custo, propriedades mecânicas e durabilidade em fadiga. (PIEKARCZYK; GREC, 2012, p. 315).

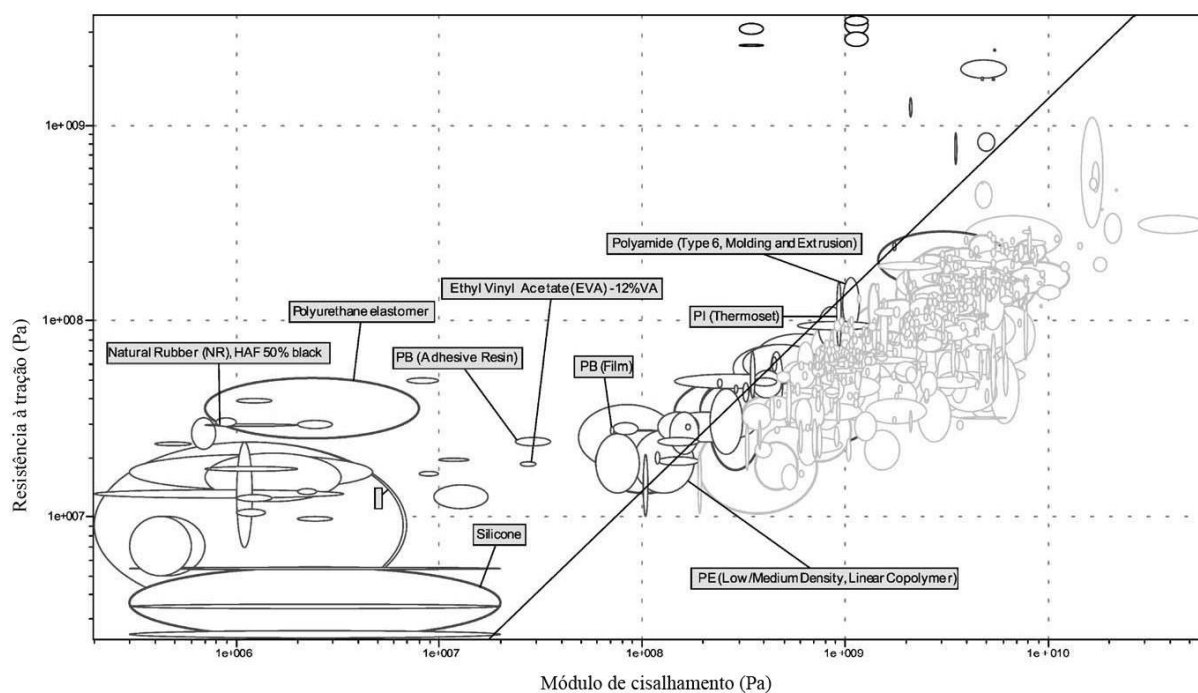
Há gráficos para auxiliar na comparação entre propriedades dos adesivos, os quais são uma ferramenta para evitar uma grande análise de dados e restringir os materiais a serem estudados (SUÁREZ et al, 2003, p. 219), sendo que para a presente dissertação, os gráficos apresentados nas Figuras 4 e 5 são de maior importância. No gráfico apresentado na Figura 4 há a comparação entre a tenacidade e a resistência ao cisalhamento de cada família de adesivos, sendo possível, de forma rápida, avaliar o grupo com as características desejáveis. Já o gráfico da Figura 5 traz a comparação entre a resistência à tração e a resistência ao cisalhamento de cada grupo de adesivos, da mesma maneira que a Figura 4, torna-se fácil a análise entre grupos. Estes dois gráficos abordam as propriedades mecânicas dos adesivos, as quais são as propriedades de principal interesse para a aplicação deste trabalho. Suárez et al (2003, p. 223) traz outros gráficos com diversas outras propriedades, como temperatura de vitrificação e coeficiente de expansão térmica, os quais apresentam menor relevância para esta dissertação, de forma a não serem apresentados aqui.

Figura 4: Tenacidade à fratura versus módulo de cisalhamento



Fonte: Suárez et al, (2003, p. 222).

Figura 5: Resistência à tração versus módulo de cisalhamento



Fonte: Suárez et al (2003, p. 222).

Adesivos destinados à união de metais são suscetíveis à aplicação sob óxidos metálicos formados nos substratos, de forma que esses devem ser compatíveis com a água retida nesses. O metal base possui grande influência nas propriedades desses óxidos, assim, certos metais

possuirão superfícies que interagirão de forma mais efetiva com adesivos específicos (PETRIE, 2007, p. 430).

A Tabela 7 traz as propriedades dos adesivos estruturais mais usuais, a qual se faz útil para uma análise preliminar. (PETRIE, 2007, p. 430). Através desta pode haver o direcionamento para seleção do tipo de adesivo, de acordo com as características apresentadas.

Tabela 7: Propriedade de adesivos estruturais frequentemente utilizados para metais

Adesivo	Temperatura de serviço (°F)		Resistência ao cisalhamento (lb/in. ²)	Resistência ao descascamento	Resistência ao impacto	Resistência à clivagem	Resistência à solventes	Resistência à umidade	Tipo de ligação
	Max.	Min.							
			3.000-5.000	Pobre	Pobre	Bom	Bom	Bom	Rígido
Epóxi amina	150	-50	2.000-4.000	Mediano	Bom	Bom	Bom	Mediano	Resistente e moderadamente flexível
Epóxi poliamida	150	-60	3.000-5.000	Pobre	Mediano	Bom	Bom	Bom	Rígido
Epóxi anidrido	300	-60	3.200	Pobre	Pobre	Bom	Bom	Bom	Rígido
Epoxy fenólico	350	-423	6.500	Muito Bom	Bom	Mediano	Bom	Pobre	Resistente
Epóxi náilon	180	-423	3.000	Bom	Mediano	Mediano	Bom	Bom	Flexível
Epóxi polissulfeto	150	-100	3.000	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Resistente e moderadamente flexível
Nitrilo fenólico	300	-100	2.000-5.000	Muito Bom	Bom	Mediano	Mediano	Bom	Resistente e moderadamente flexível
Vinil fenólico	225	-60	3.000	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Resistente e moderadamente flexível
Neoprene fenólico	200	-70	3.000	Pobre	Pobre	Bom	Bom	Bom	Resistente e moderadamente flexível
Poli-ímida	600	-423	3.000	Pobre	Pobre	Bom	Bom	Mediano	Rígido
Polibenzimidazol	500	-423	2.000-3.000	Pobre	Pobre	Bom	Bom	Bom	Rígido
Poliuretano	150	-423	5.000	Bom	Bom	Bom	Mediano	Pobre	Flexível
Diéster de ácido acrilato	200	-60	2.000-4.000	Pobre	Mediano	Bom	Pobre	Pobre	Rígido
Cianoacrilato	150	-60	2.000	Pobre	Pobre	Bom	Pobre	Pobre	Rígido
Fenoxi	180	-70	2.500	Mediano	Bom	Bom	Pobre	Bom	Resistente e moderadamente flexível
Acrílico termoendurecível	250	-60	3.000-4.000	Pobre	Pobre	Bom	Bom	Bom	Rígido

Fonte: Petrie (2007, p. 431).

2.7 Preparação de superfícies

De acordo com Altidis (2013, p. 21) um dos fatores críticos no processo de adesão é a limpeza das superfícies a serem aderidas. A existência de impurezas nas superfícies interfere diretamente na resistência e vida útil da junta, sendo de extrema importância a escolha correta do melhor método de limpeza.

Marques (2009, p. 34) afirma que há dois métodos de limpeza, a química e a mecânica, sendo que a primeira constitui da utilização de meios químicos como solventes, ácidos e detergentes, que limpam a superfície. Já a limpeza mecânica é caracterizada pela utilização de meios abrasivos para efetuar a limpeza da superfície.

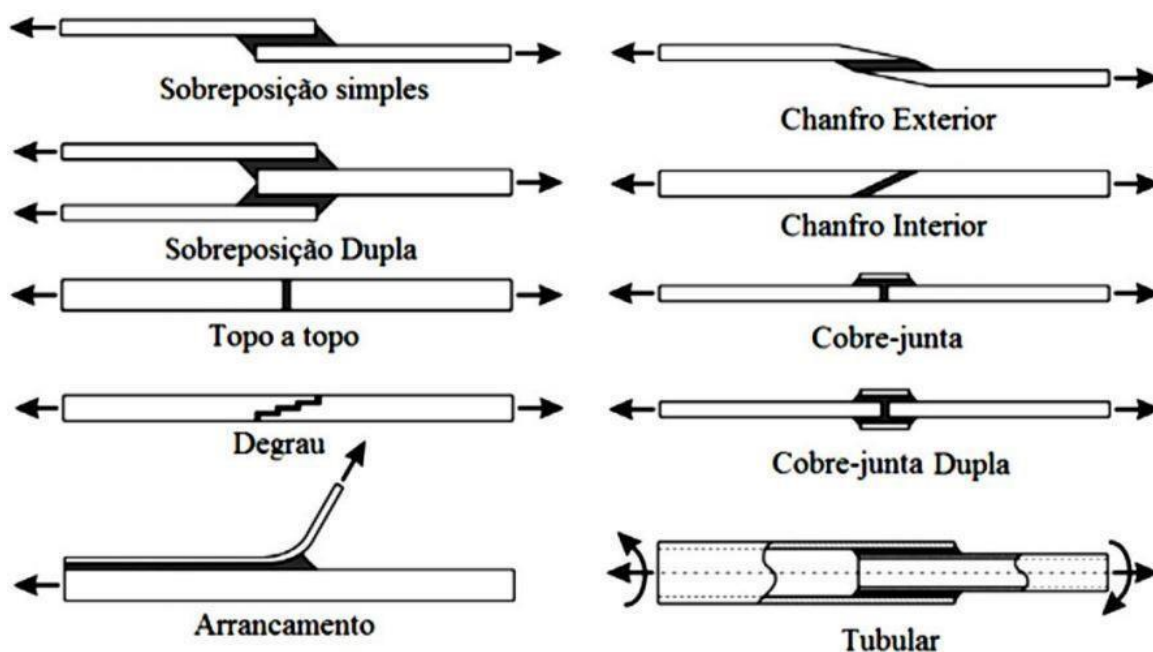
Marques et al (2009, p. 24) afirma que estes processos oferecem uma gama de benefícios, incluindo limpeza de contaminantes e óxidos no geral, aumento da rugosidade superficial, melhorando o intertravamento mecânico do adesivo. De forma geral, os fenômenos

gerados são o aumento da área de contato do adesivo com o substrato e a melhoria da compatibilidade química entre o substrato e o adesivo, os quais por sua vez melhoram a resistência mecânica da junta e também a tornam menos sensível ao envelhecimento.

2.8 Design de uniões adesivadas

Há diversos *designs* de uniões adesivadas, também conhecidas como juntas de sobreposição, de forma que Oliva (2016, p. 7) afirma que a configuração da junta será caracterizada pelo adesivo utilizado, a quantidade de elementos na união, no tipo de elemento fixado e ainda na combinação de diversos fixadores. A Figura 6 apresenta os principais tipos de sobreposições. Sendo destes os mais usuais a sobreposição simples e a sobreposição dupla, devido a maior facilidade de fabricação. Também é possível notar na Figura 6 que a maioria das geometrias submete o adesivo a cargas de cisalhamento, a qual é a mais recomendada na bibliografia. Ainda há opção de união onde o adesivo é submetido a tração, e a arrancamento, sendo este último não indicado, devido à baixa resistência mecânica apresentada.

Figura 6: Principais tipos de uniões adesivadas



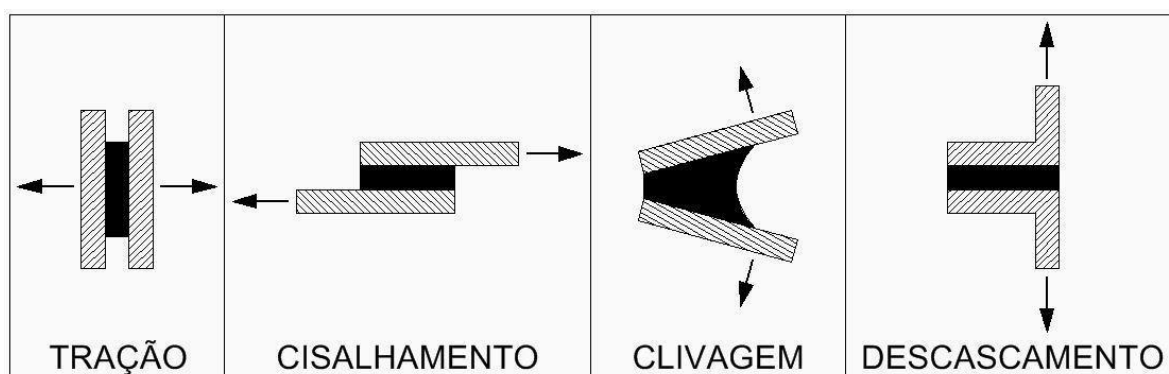
Fonte: Ribeiro (2015, p. 12).

2.9 Tipos de carregamento

As principais solicitações atuantes sobre juntas adesivadas, de acordo com Santos (2007, p. 35) são clivagem (ou “*peeling*”), descascamento (ou arrancamento), compressão, tração e cisalhamento.

Mendes (2005, p. 25), afirma que esforços de compressão, em juntas adesivadas, não apresentam riscos, e contribuem favorecendo a união dos componentes. Mendes (2005, p. 26), também afirma que a resistência ao cisalhamento é muito maior que as resistências à tração, à clivagem e ao descascamento, de forma que para obter a máxima resistência da junta adesivada deve-se optar por configurações onde o carregamento atue sob cisalhamento. Estes últimos quatro carregamentos podem ser vistos na Figura 7.

Figura 7: Principais carregamentos nocivos à juntas adesivadas



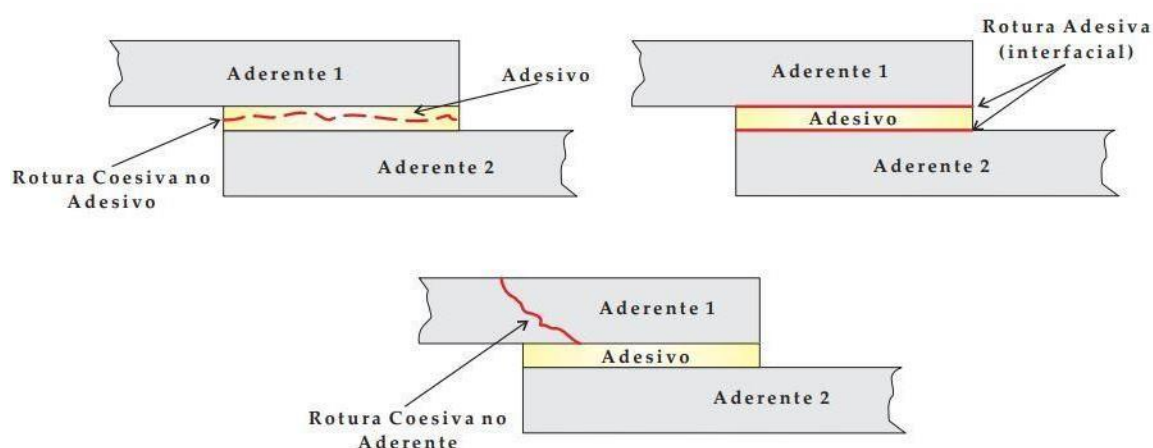
Fonte: do autor, 2022.

2.10 Falha em uniões adesivadas

O entendimento do modo de falha de uma junta é imprescindível para o projeto de uma união, e isto também se aplica à utilização de adesivos. De forma que de acordo com Esteves (2010, p. 8), os três principais modos de falha são:

- Falha Coesiva no Adesivo: Ocorre quando há o rompimento na região interna do adesivo, indicando que a resistência mecânica deste é menor que a dos substratos, e também menor que a energia necessária para promover o descolamento.
- Falha Coesiva no Substrato: Ocorre quando há o rompimento de algum substrato, indicando que a resistência mecânica do material é menor do que a do adesivo.
- Falha Adesiva: Ocorre quando há o descolamento do adesivo e do substrato, indicando problemas na adesão da junta.

Figura 8: Modos de falhas em uniões adesivadas



Fonte: Esteves (2010, p. 9).

2.11 Elementos finitos

O método dos elementos finitos é um dos métodos mais poderosos para resolver equações diferenciais parciais que se aplicam à formas complexas. Este método se baseia na divisão de uma geometria complexa em diversas formas mais simples, tornando o problema matematicamente muito mais fácil de ser abordado. (ROSS, 2011, p. 1)

O método dos elementos finitos surgiu em 1956, embora um método semelhante baseado em diferenças finitas variacionais tenha sido apresentado por Courant uma década antes. Desde então um enorme esforço tem sido feito no desenvolvimento do método dos elementos finitos, de modo que hoje, além de ser aplicado em estruturas e vibrações, o método pode ser utilizado para transferência de calor, fluxos de fluidos, acústica, entre outros. (ROSS, 2011, p. 1)

De acordo com Grotto (2021, p. 55), para um maior entendimento desse método de análise, devem se definir alguns conceitos básicos, que, ainda conforme Grotto (2021, p. 55) são:

- Nó: ponto onde há a conexão dos elementos, também está diretamente associado aos graus de liberdade.
- Elemento: unidade de discretização (divisão) da estrutura, podendo estar associado a linhas, áreas ou volumes, de acordo com o nível de análise.
- Malha: o conjunto total de elementos.
- Graus de liberdade: são todos os movimentos possíveis de um nó.

- Cargas nodais: as cargas devem sempre, diretamente ou de forma equivalente, estar aplicadas nos nós. Desta maneira são convertidas em cargas nodais pelo *software*.
- Deslocamentos nodais: são as incógnitas em um problema de análise estrutural para cálculo de tensões.
- Rigidez: é a força requerida para produzir um deslocamento unitário para a translação de um grau de liberdade.

O método dos elementos finitos é um método aproximado de cálculos de sistema contínuos, ou seja, um método de solução de equações diferenciais. A estrutura avaliada é subdividida (discretizada) em números finitos de partes (os elementos), conectadas entre si por pontos que são conhecidos como nós, formando assim uma malha. Na análise estrutural os parâmetros são os deslocamentos nodais, que são incógnitas do problema. Em elementos sólidos de geometria tridimensional (projeto mecânico), a geração da malha é um dos fatores mais importantes e é gerada sob o volume do modelo sólido geométrico construído previamente (ALVES FILHO, 2013).

A configuração da malha é de extrema importância para a análise de elementos finitos, pois esta determinará o tipo de elemento e o tamanho do mesmo, e conseqüentemente a quantidade de elementos, de nós e de graus de liberdade para a análise. De acordo com Koutromanos (2018, p. 319) o refinamento de uma malha, ou seja, a utilização de mais elementos, com tamanhos menores, geralmente proporciona uma maior precisão.

Koutromanos (2018, p. 319) ainda afirma que há dois tipos de refinamento, o refinamento do tipo “p”, onde é mantido o mesmo número de elementos, porém estes são substituídos por elementos mais complexos, com um maior número de nós. Já o outro tipo de refinamento, trata-se do refinamento do tipo “h”, onde a geometria do elemento é constante, sendo alterada a quantidade de elementos em regiões específicas.

Alves Filho (2000, p. 26) afirma que a relação geral linear entre todas as forças externas e todos os deslocamentos nodais é melhor expressa em notação matricial, sendo representada na Equação 1.

$$\{F\} = [K] * \{U\} \quad (1)$$

Onde $\{F\}$ é a matriz com as cargas nodais, $[K]$ é a matriz de rigidez da estrutura, e $\{U\}$ é a matriz com os deslocamentos nodais.

Grotto (2021, p. 58) aponta que a análise estrutural pelo método dos elementos finitos resolve um problema de engenharia com apoio de software, porém para a correta aplicação

desta ferramenta, deve haver um entendimento claro do problema físico, de forma a resolução ser proposta pela combinação dos conhecimentos de teóricos de elementos finitos juntamente com a aplicação de recursos computacionais CAE (Computer Aided Engineering).

Conforme afirma Meira Júnior (2010, p. 220), problemas são considerados dinâmicos quando forças de inércia e de amortecimento não podem ser desconsideradas. São problemas em que as estruturas estão sob a ação de excitações dinâmicas e as respostas obtidas estão em funções do tempo. Os métodos de integração temporal direta (também denominados simplesmente de métodos diretos) consistem em solucionar a Equação (2) em tempos discretos.

$$[M] \cdot [\ddot{U}] + [C] \cdot [\dot{U}] + [K] \cdot [U] = \{F(t)\} \quad (2)$$

Onde $[M]$ é a matriz de massa da estrutura, $[\ddot{U}]$ é a matriz das acelerações nodais, $[C]$ é a matriz de amortecimento da estrutura, $[\dot{U}]$ é a matriz das velocidades nodais, $[K]$ é a matriz de rigidez da estrutura, $[U]$ é a matriz dos deslocamentos nodais e $\{F(t)\}$ é a matriz das forças nodais variáveis com o tempo.

Grotto (2021, p. 71) aponta que a resolução de problemas não lineares só é possível com a utilização de soluções numéricas, onde os métodos explícitos são os mais utilizados.

Os termos implícito e explícito, de acordo com Meira Júnior (2010, p. 225), se referem aos algoritmos de tempo de integração. Onde, na análise explícita, as forças internas e externas são somadas para cada ponto nodal, a aceleração nodal é calculada dividindo esta força pela massa nodal, de forma que a solução é obtida pela integração dessa aceleração em função do tempo.

Meira Júnior (2010, p. 225) ainda afirma que a análise explícita é adequada para simulações dinâmicas, como por exemplo, situações que analisem impacto, porém, esta torna-se demorada para eventos de longa duração ou análises estáticas.

No método implícito, de acordo com Grotto (2021, p. 71), uma matriz de rigidez global é calculada, invertida, e aplicada ao balanço de forças para obter um incremento de deslocamento, sendo que a principal vantagem desse método é a escolha do intervalo de tempo, que pode ser realizada pelo usuário. Já como desvantagem, Grotto (2021, p. 71) aponta o alto custo computacional para execução.

Na bibliografia há diversas aplicações do método dos elementos finitos, juntamente com softwares CAE, para analisar uniões adesivadas.

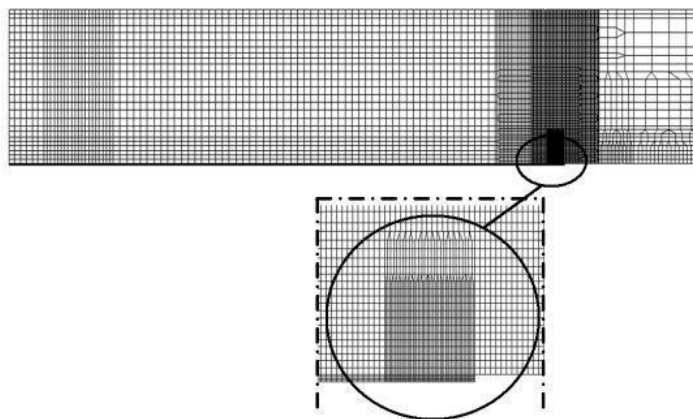
Zachariah (2006, p. 14) aponta que há três maneiras principais para analisar um uma união adesivada via CAE. A primeira maneira é analisar adesivo e substratos como modelos sólidos, o que de acordo com o autor, pode requerer maior poder de processamento.

A segunda maneira, de acordo com Zachariah (2006, p. 14) é chamada de contato amarrado, o qual é um contato entre duas superfícies, que funciona normalmente sobre cargas compressivas, porém sob tração, é programado para gerar uma separação das superfícies sob um critério de falha pré-estabelecido. Porém, nem todos os softwares CAE permitem este tipo de interação, havendo esta limitação na aplicação deste método.

O terceiro método de simulação de uniões adesivadas, conforme Zachariah (2006, p. 15), é chamado como linha de conexões rígidas. Neste método o autor recomenda utilizar ligações rígidas entre substratos e adesivos, ao longo da sobreposição da união. Também há a recomendação de considerar os substratos como superfícies e o adesivo como um material sólido.

Björklund, Höglind, (2007) realizaram um estudo sobre vigas unidas através de adesivação estrutural. Neste trabalho, Björklund, Höglind, (2007, p. 61) realizaram uma análise bi-dimensional, com discretização da malha apenas na região do adesivo. Nesta análise os autores utilizaram a malha quadrilátera bi-quadrática com 8 nós para o adesivo e o substrato, sendo o tamanho mínimo do elemento de $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$ nas regiões discretizadas do adesivo. A malha gerada pelos autores para a análise pode ser vista na Figura 9.

Figura 9: Malha utilizada por Bjorkund e Hoglind (2007) para análise de união adesivada



Fonte: Björklund, Höglind, (2007, p. 61).

Ausiello et al (2002, p. 296) realizaram simulações, via software CAE, utilizando uma malha composta por elementos quadriláteros de oito nós e tetraédricos de quatro nós.

García et al (2011, p. 190) realizou a simulação, através de elementos finitos, de uniões adesivadas, e comparou com os resultados obtidos de ensaios. Para estas simulações, os autores simplificaram o problema à uma condição de tensão plana, desconsiderando efeitos de cisalhamento no adesivo. Os autores também utilizaram contatos rígidos entre o adesivo e os

substratos. Desta forma, os autores obtiveram os mesmos resultados tanto nos ensaios realizados, como na simulação.

Uniões adesivadas podem ser simuladas de muitas maneiras diferentes, cada uma com suas particularidades, não havendo ainda um método global para definição da malha, ou das condições de contorno. Desta forma He (2011, p. 262) afirma que concomitantemente às simulações através do método dos elementos finitos, é muito importante validar o comportamento do adesivo com ensaios experimentais.

2.12 Atmosfera explosiva

A presença de produtos inflamáveis na indústria de processo (química, petroquímica e de petróleo) é inerente à sua atividade. Como consequência, a instalação elétrica e eletrônica nesses locais necessita ter tratamento especial, uma vez que os níveis de energia presentes em suas partes e equipamentos superam em muito, na grande maioria dos casos, aqueles mínimos necessários para iniciar um incêndio ou uma explosão. (JORDÃO, 2018, p. 13)

A norma IEC 60079-10-1 define como atmosfera explosiva aquela que envolve uma mistura de substâncias inflamáveis (na forma de gás, vapor, névoa, poeira ou fibra) com o ar em condições atmosféricas, onde a combustão se propaga através da mistura após a ignição. Nestas áreas, encontradas em diversas instalações, cuidados especiais devem ser tomados para construção, instalação e utilização de equipamentos elétricos, tendo em vista que superaquecimentos e faíscas podem gerar explosões. (ALVES, 2019, p. 102)

Nestas áreas todos os equipamentos elétricos instalados devem ser projetados especificamente para essa aplicação, seguindo as normas vigentes, sendo que no Brasil a principal norma para essa aplicação é a NBR 9518. Também é importante salientar que todas as ferramentas elétricas utilizadas neste ambiente devem respeitar a classificação própria do ambiente. Também devido ao alto risco do ambiente, processos como de soldagem, onde há uma fonte de ignição direta, não são permissíveis de serem executados nestes locais.

2.13 Suportes de tubulação

Suportes de tubulação, de acordo com Telles (2001, p. 143), são os dispositivos destinados a suportar os pesos e os demais esforços exercidos pelos tubos ou sobre os tubos, transmitindo esses esforços diretamente ao solo, às estruturas vizinhas, a equipamentos ou, ainda, a outros tubos próximos.

A Figura 10 mostra duas tubulações apoiadas em suportes típicos.

Figura 10: Foto de tubulações de óleo térmico em uma indústria de biodiesel



Fonte: do autor, 2022.

Telles (2001, p. 143) traz ainda duas classificações para suportes de tubulações, as quais são complementares, sendo que a primeira classificação se refere à característica do suporte possuir movimentação, já o segundo grupo é definido pelas restrições impostas aos movimentos das tubulações. Desta forma estas são apresentadas nos capítulos 2.13.1 e 2.13.2.

2.13.1 Suportes destinados a sustentar os pesos

- Fixos

São constituídos na maioria das vezes por estruturas metálicas, ou de concreto, fixas, apoiadas (diretamente ao solo, ou alguma estrutura de base) ou pendurados (transmitindo carga para cima). Estes suportes costumam ser empregados quando há a necessidade de suportar vários tubos próximos, sendo que estas estruturas constituem as pontes de tubos (*pipe racks*). Este tipo de suporte também pode ser utilizado para qualquer arranjo de travamento de

tubulação, pois o mesmo só restringe a tubulação no eixo Y. Um exemplo deste tipo de suporte pode ser visto na Figura 10, onde a estrutura metálica não sofre deslocamentos consideráveis em relação ao suporte da tubulação. O apoio da mesma atua apenas em um eixo, sendo direcionado para suportar a carga peso do sistema. A tubulação fica livre para deslocamento nos demais eixos.

- Semimóveis

Estes suportes geralmente são constituídos por abraçadeiras individuais fixadas em estruturas pré-existentes, de forma a suportar somente uma tubulação. O nome deste suporte vem do fato do mesmo restringir totalmente o movimento da tubulação em apenas uma direção (eixo Y), enquanto ela aceita pequenos deslocamentos nos outros eixos. Um exemplo de suporte semimóvel pode ser visto na Figura 11, onde o suporte restringe os movimentos no sentido vertical, porém permite pequenos deslocamentos no demais eixos. Esta restrição parcial deve ser especialmente analisada em casos onde há altas temperaturas na tubulação, gerando grande deslocamentos.

Figura 11: Suporte de tubulação semimóvel



Fonte: <https://www.walraven.com/en/about-walraven/news/rooftop-support-systems/>.

- Móveis

Estes são caracterizados principalmente pelos suportes de mola e suportes de contrapeso, os quais são responsáveis por alinhar e compensar alterações geométricas na tubulação devido à dilatação térmica da mesma. Este último grupo é o menos utilizado, tendo aplicações bem específicas. Este tipo de suporte só é aplicado em tubulações com grandes diâmetros e submetidas a altas temperaturas, onde a dilatação térmica pode representar um risco estrutural. Um exemplo deste grupo pode ser visto na Figura 12, onde o suporte de mola fixado no piso funciona como uma força contrária ao deslocamento da tubulação, controlando o deslocamento, e conseqüentemente, as tensões geradas pelo mesmo.

Figura 12: Suporte de mola para tubulação



Fonte: <https://bruckebuild.com/en/produkty/promyishlennyye-oporyi-lisega%C2%AE-dlya-krepleniya-truboprovodov1/pruzhinnyie-podveski,-pruzhinnyie-oporyi.html>

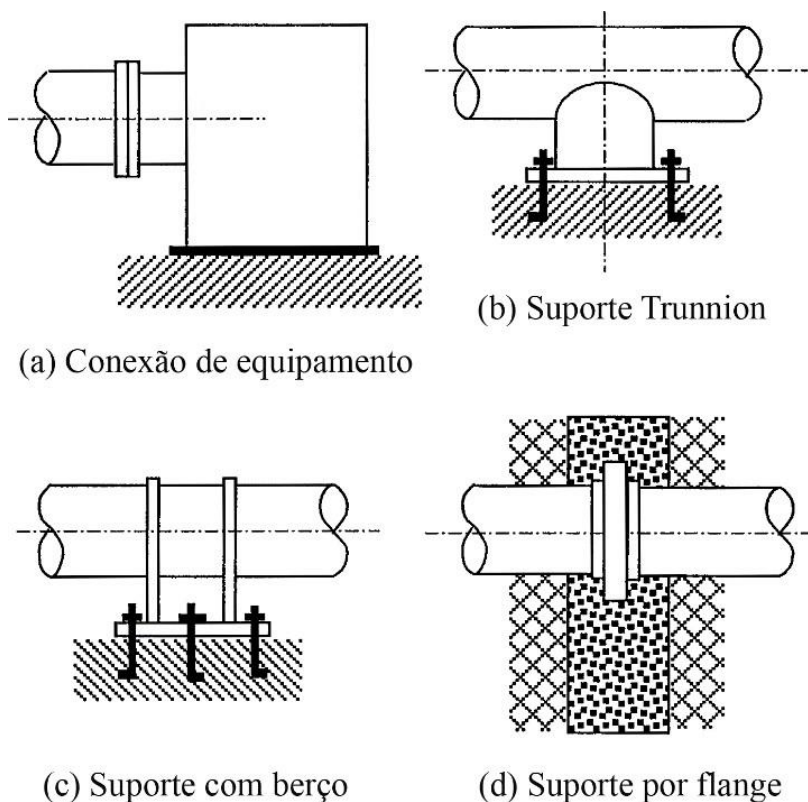
Já, a outra classificação adotada para suportes, em concordância com Telles (2001, p. 143), e a mais utilizada na bibliografia é:

2.13.2 Suportes destinados a limitar os movimentos dos tubos

- Dispositivos de fixação total (ancoragem)

De acordo com Peng e Peng (2009, p. 151) estes suportes fixam todos os seis graus de liberdade, sendo o principal tipo de suporte para análises de tensão. Também este tipo de suporte não permite nenhum deslocamento ou rotação no ponto utilizado, sendo considerado como havendo uma rigidez infinita em todos os seis graus de liberdade. Exemplos de fixação total podem ser vistos na Figura 13, onde é demonstrado quatro tipos de fixação onde há a restrição total à deslocamentos. A fixação total pode ocorrer na conexão da tubulação com o equipamento, caso mais usual, ou através de suportes projetados para este efeito.

Figura 13: Exemplos de suportes com fixação total



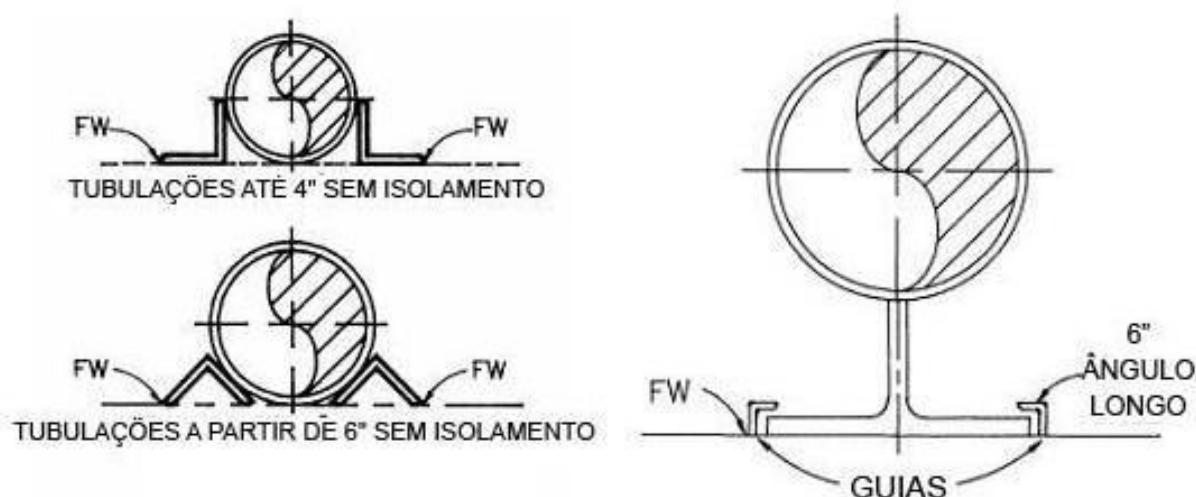
Fonte: Peng e Peng (2009, p. 152).

- Dispositivos que permitem apenas movimentos em uma direção (guias)

Conforme Parish e Rhea (2002, p. 198) quando não há a necessidade de restrição total, é usual a utilização de guias, as quais permitem o movimento da tubulação apenas ao eixo axial da mesma, de forma a garantir o espaçamento adequado entre tubos e evitar os deslocamentos

laterais. Desta forma há a restrição de quatro eixos de liberdade. A Figura 14 ilustra suportes com deslocamento apenas no sentido axial da tubulação. Estes suportes permitem o deslocamento axial gerado por dilatações, porém restringem os deslocamentos que podem ser ocasionados nos demais direções. Estes são indicados para tubulações que não possuem grandes tensões devido à dilatação.

Figura 14: Exemplos de suportes guias

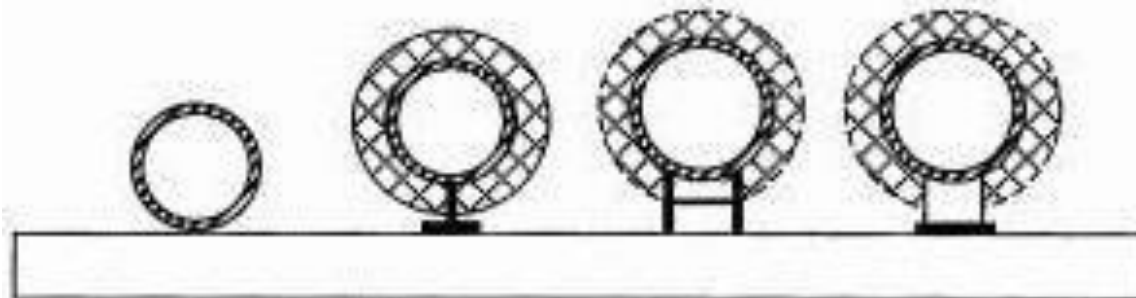


Fonte: Parisher e Rhea (2002, p 199).

- Dispositivos que impedem o movimento em um sentido (batentes)

Estes dispositivos de sustentação, de acordo com Peng e Peng (2009, p. 152) são utilizados para a suportaçã das cargas no eixo vertical, sendo responsáveis por sustentar apenas o peso da tubulaçã, sã tambẽm os suportes mais simples empregados. A Figura 15 traz quatro exemplos de batentes para tubulaçã, sendo que o mais simples, na verdade, ẽ o prõprio tubo apoiado na estrutura de suporte. Este sistema de sustentaçã não interfere em deslocamentos axiais ou radiais, de forma que a tubulaçã fica livre para toda a deformaçã gerada por dilatações. Por esta razã, a utilizaçã destes batentes ẽ indicada apenas para quando os valores de dilataçã linear dos tubos são praticamente nulos.

Figura 15: Exemplo de suporte batente



Fonte: Peng e Peng (2009, p. 153).

Na presente dissertação serão abordados apenas os suportes destinados a sustentar os pesos de caráter fixo, não sendo abordados suportes semimóveis ou moveis. Nestes haverá diversos tipos de dispositivos para limitar os movimentos de tubos, o que irá resultar em reações variadas no suporte. Esta decisão se dá pelo fato de os suportes fixos serem os mais utilizados, de maneira geral, caracterizando a maior demanda da indústria. Os suportes avaliados na dissertação podem ser vistos nas Figuras 25, 27 e 29.

2.14 Cargas atuantes em suportes de tubulação

“Do ponto de vista da Resistência dos Materiais, cada trecho de tubulação pode ser considerado como sendo um elemento estrutural, submetido a uma série de cargas e transmitindo outras tantas ao sistema de suportes e aos equipamentos ligados à tubulação”. (TELLES, 2006, p. 25)

As cargas transmitidas pelas tubulações aos suportes podem ser divididas em dois grupos: estáticas e dinâmicas.

2.14.1 Cargas estáticas

Este grupo é composto pelo somatório do peso da tubulação suportada, onde Telles (2001, p. 144) cita que deve ser considerado:

- O peso próprio do tubo, válvulas, e outros acessórios e conexões da rede de tubulações.
- Peso do fluido contido, onde este será o mais denso entre o fluido utilizado para teste hidrostático da tubulação (água) ou o fluido de operação da linha.

- Peso do isolamento térmico, quando houver.
- Sobrecargas diversas exercidas sobre a tubulação, tais como peso de outros tubos, pessoas, plataformas, estruturas apoiadas na tubulação.

Drake e Walter (2010, p. 244) por sua vez trazem como cargas estáticas adicionais o peso da neve e água da chuva que eventualmente poderiam acumular sobre estruturas, e também o carregamento gerado pelo vento. Como a presente dissertação irá trabalhar apenas com a alteração de suportes de tubulação em áreas industriais classificadas, o que, em sua grande maioria se dará em espaços cobertos, no interior de unidades produtivas, estas cargas geradas por condições climáticas, não serão consideradas neste trabalho.

Outra carga estática também apresentada por Drake e Walter (2010, p. 243) é a carga para a qual deve ser considerada quando houver construção em zonas sísmicas. Esta carga, de acordo com Peng e Peng (2009, p. 23) será uma força horizontal proporcional ao peso total da tubulação, onde a proporção será determinada pela classificação da zona sísmica.

2.14.2 Cargas dinâmicas

Segundo Telles (2006, p. 25) as cargas dinâmicas que atuam sobre as tubulações são divididas em duas categorias, a primeira é composta por ações dinâmicas provenientes do movimento do fluido na tubulação, tais como golpes de aríete, acelerações, impactos, etc. Já as demais cargas são causadas por vibrações nas tubulações, as quais podem ter diversos motivos como distúrbios flutuantes de pressão ou pulsações.

De acordo com Nayyar (1999, [s.p.]) vibrações podem causar severos danos à tubulação, também podendo causar falha por fadiga de curto prazo, ocorrendo após alguns dias de operação, ou até mesmo algumas horas. Deste modo, estas devem ser sempre evitadas.

2.15 Efeitos da Temperatura sobre uniões adesivadas

De acordo com Guo et al (2022, p. 1), os adesivos poliméricos, devido as suas características inerentes, não tem seu desempenho associado somente com a área colada, mas também são influenciados pelas características do ambiente, como por exemplo, a temperatura de trabalho.

Já Galvez et al (2020, p. 2) traz que a temperatura, combinada com a umidade, pode reduzir o ciclo de vida de uniões adesivadas, porém, em casos onde a temperatura é mais elevada, esta pode causar a degradação da união adesivada em um curto intervalo de tempo.

Vidal (2016) realizou ensaios comparando os efeitos da temperatura de trabalho sobre a resistência mecânica de uniões adesivadas, onde fica visível a queda da resistência mecânica em função do aumento da temperatura nos ensaios. Os resultados dos ensaios de Vidal, para uma taxa de deformação de 50 mm/min, podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8: Queda da resistência mecânica em função da temperatura

Temperatura (°C)	Tensão Máxima (MPa)
25	30,34 ± 10,25
50	22,00 ± 7,98
75	2,19 ± 0,19

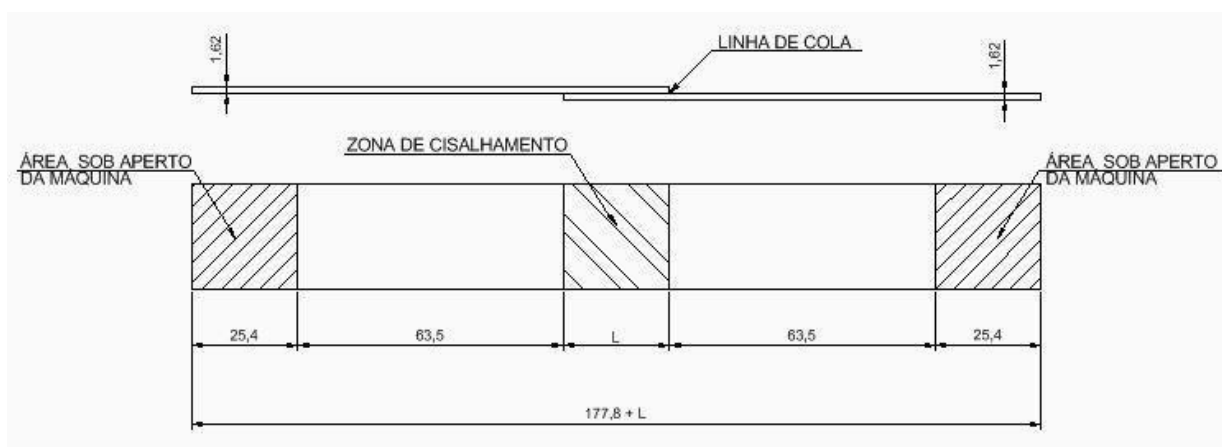
Fonte: Adaptado de Vidal, 2016, p. 37.

2.16 Ensaios experimentais

2.16.1 Corpo de prova para ensaio de resistência ao cisalhamento

O ensaio estático em corpos de prova adesivados, para determinação da resistência ao cisalhamento da junta é realizado seguindo a norma ASTM D 1002, a qual determina as dimensões do corpo de prova, conforme Figura 16, sendo as dimensões expressadas em milímetros.

Figura 16: Corpo de prova para ensaio estático conforme ASTM D 1002



Fonte: do autor, 2022.

É recomendado pela norma ASTM D 1002 (1999, p. 2) que a espessura das chapas seja de $1,62 \pm 0,125$ mm, o que acarretará em um comprimento de sobreposição de $12,7 \pm 0,25$ mm para a maioria dos metais. Já para espessuras diferentes, também de acordo com a norma ASTM D 1002 (1999, p. 2) o comprimento da união adesivada pode ser determinado pela Equação 3.

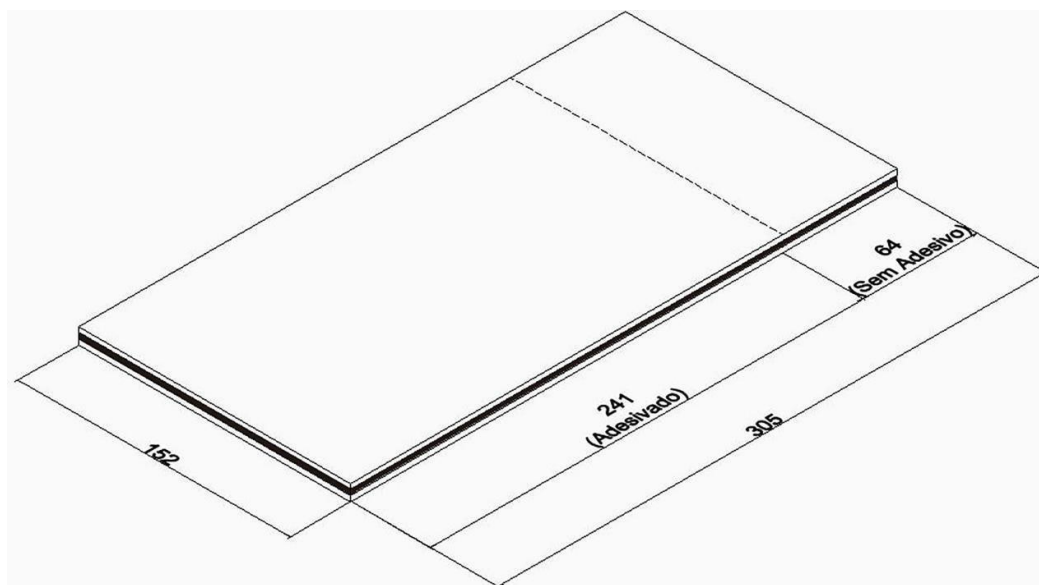
$$L = \frac{F_{ty}t}{c} \quad (3)$$

Onde L é o comprimento da sobreposição, F_{ty} é o limite de escoamento do metal e τ equivale à 150% do limite de resistência à tração estimado para a junta adesivada.

2.16.2 Corpo de prova para ensaio de resistência ao descascamento

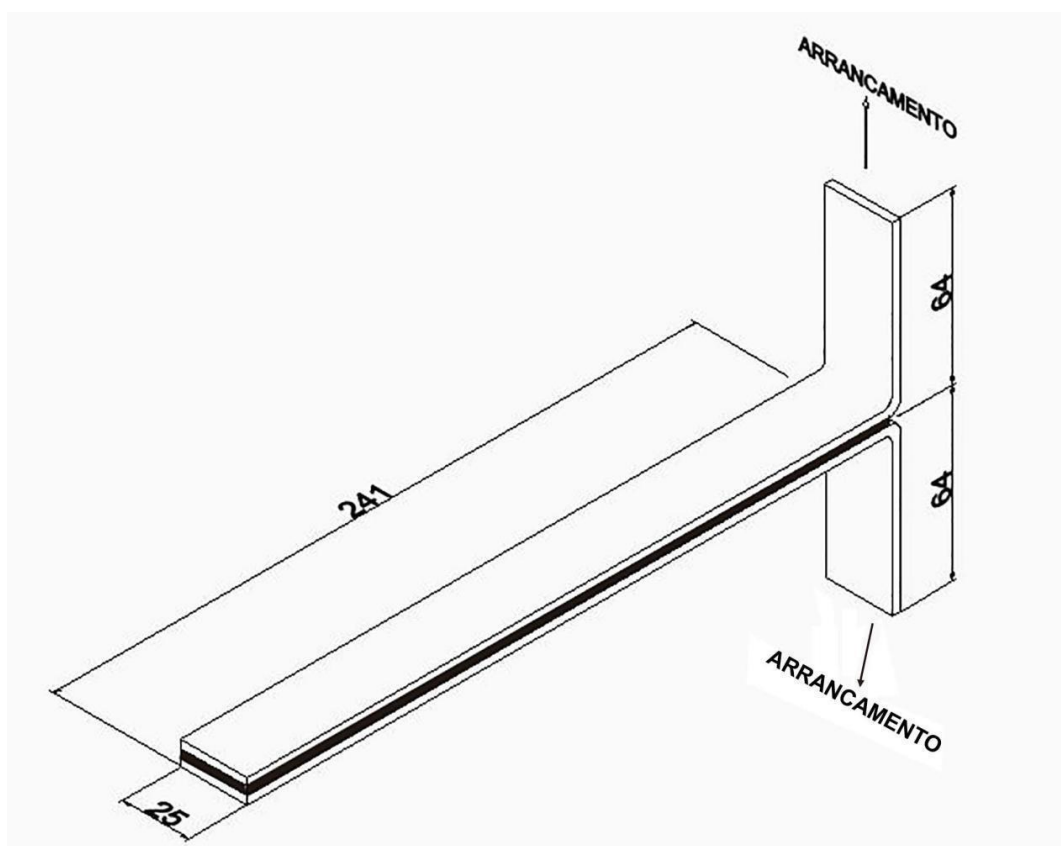
Para realização do ensaio de resistência do descascamento, os corpos de prova devem ser fabricados de acordo com a norma ASTM D 1876, sendo que de acordo com esta (2001, p. 2) deve ser fabricado primeiro um corpo de prova com dimensões maiores, o qual consta na Figura 17, e então este deve ser cortado e dividido em 6 corpos de prova, os quais serão testados, os mesmos são apresentados na Figura 18.

Figura 17: Primeira etapa da fabricação dos corpos de prova segundo ASTM D 1876



Fonte: do autor, 2022.

Figura 18: Corpo de prova pronto para ensaio, seguindo norma ASTM D 1876

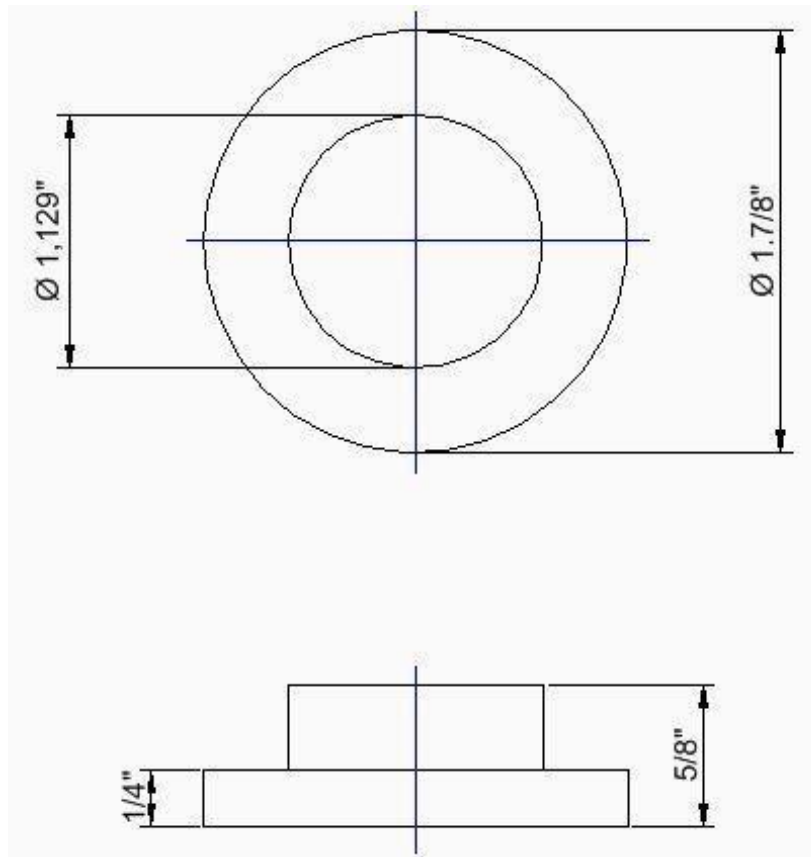


Fonte: do autor, 2022.

2.16.3 Corpo de prova para ensaio de resistência à tração

A fabricação dos corpos de prova para ensaio de tração deve ser feita de acordo com a norma ASTM D 897, a qual estabelece o corpo de prova conforme Figura 19.

Figura 19: Corpo de prova para ensaio de tração de acordo com ASTM D 897

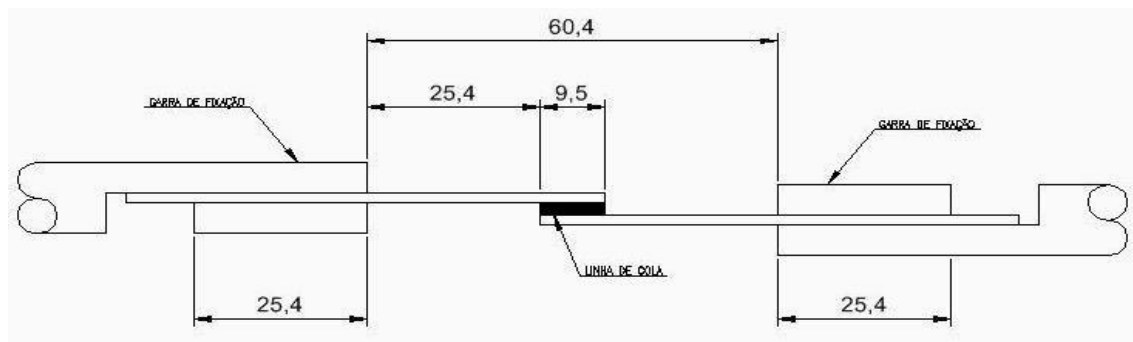


Fonte: do autor, 2022.

2.16.4 Corpo de prova para ensaio de fadiga

O ensaio de fadiga é realizado de acordo com a norma ASTM D 3166, a qual determina a utilização de corpos de prova parecidos com os corpos de prova do ensaio de cisalhamento. O corpo de prova para ensaio de fadiga é apresentado na Figura 20.

Figura 20: Corpo de prova para ensaio de fadiga conforme ASTM D 3166



Fonte: do autor, 2022.

2.17 Patentes

De acordo com Araújo (1981, p. 27) a patente é o direito que se concede a uma pessoa, através de um documento oficial chamado “Carta-Patente”, de uso exclusivo, com um período de tempo limitado, sobre algo que tenha inventado, criado ou aperfeiçoado. Já Magalhães (2020, p. 15) resume que uma patente é um documento concedido pelo Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), com vigência limitada de vinte anos, que garante a seu titular, exclusividade de uso, comercialização, importação e produção de uma determinada tecnologia em território nacional.

Araújo (1981, p. 27) traz que a patente é, de maneira geral, vista tão somente como proteção legal à propriedade industrial e como incentivo à capacidade criadora e ao espírito inovador no campo da técnica. Sua função, todavia, é muito mais ampla, pois, na realidade, constitui o instrumento através do qual o conhecimento tecnológico deixa de ser segredo para assumir o papel de bem econômico.

Magalhães (2020, p. 25) afirma que para se ter requisitos de mérito, a invenção deve propor-se a resolver um problema do estado da técnica, trazendo ganhos objetivos e palpáveis a um produto ou processo industrial.

É possível, ainda, propor uma alteração significativa à um produto ou processo, o que caracteriza um modelo de utilidade, este também gera direito intelectual a seu autor. Um modelo de utilidade possui vigência limitada em quinze anos. Como vantagem deste modelo, em relação à patente convencional, há o fato deste ser mais simples, tendo em vista de se tratar de uma melhoria significativa, não sendo necessário criar um produto, ou processo, totalmente novo. Já como pontos negativos há a menor vigência da propriedade intelectual e também a necessidade de haver um produto ou processo já existente que possa significativamente ser melhorado, de forma a ser dependente de outras patentes.

2.18 Metodologia de trabalho

De acordo com PMI (2017, p. 10) gerenciamento de projetos é a aplicação de conhecimentos, habilidades, ferramentas e técnicas às atividades do projeto a fim de cumprir seus requisitos, sendo que é feito através da aplicação e integração apropriadas dos processos de gerenciamento de projetos identificados para o projeto.

Para projetos mecânicos e de produtos há diversas metodologias em aplicação atualmente, sendo a mais famosa destas a metodologia de Pahl e Beitz (2005), também há variações com aplicações em campos específicos.

Norton (2013, p. 5) propõe uma metodologia baseada em dez fases, as quais guiam o projeto desde a fase de identificação da necessidade até a produção.

Tabela 9: Fases do projeto mecânico

Fase	Etapa
1	Identificação da necessidade
2	Pesquisa de suporte
3	Definição dos objetivos
4	Especificações de tarefas
5	Síntese
6	Análise
7	Seleção
8	Projeto detalhado
9	Protótipo e teste
10	Produção

Fonte: Norton (2013, p. 6).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

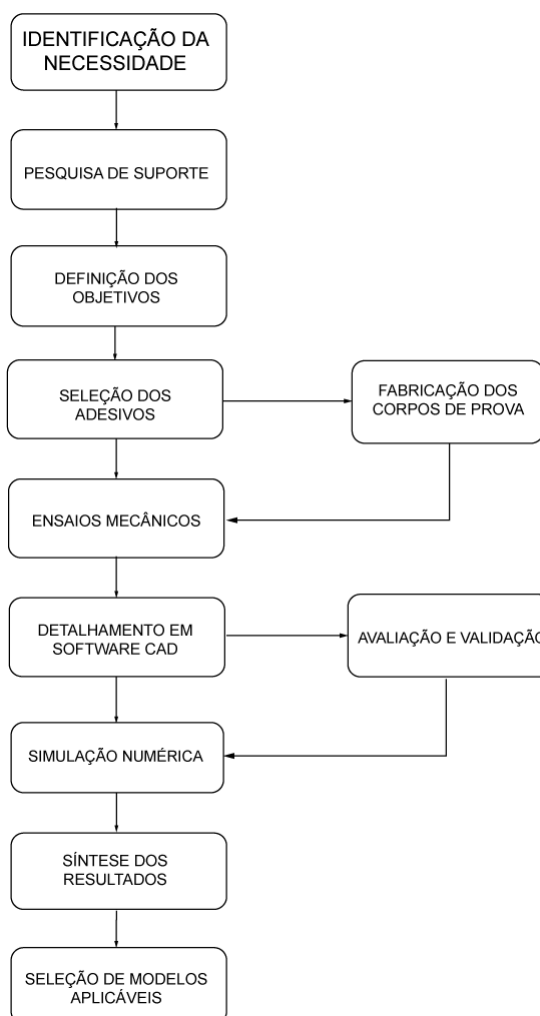
No capítulo anterior apresentou-se, através da revisão bibliográfica, o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento do trabalho. Neste capítulo apresenta-se o desenvolvimento da pesquisa, onde se inicia com a apresentação da metodologia adotada para o andamento da pesquisa e identificação e definição da necessidade que gerou a pesquisa.

A metodologia inicia no capítulo 3.1, e termina no capítulo 3.9, através da qual é desenvolvida toda a pesquisa desta dissertação. Cada capítulo traz a etapa correspondente da metodologia e a execução da mesma.

3.1 Metodologia de trabalho

A metodologia utilizada para a execução desta pesquisa é a proposta por Norton (2013), dividida em dez etapas, as quais podem ser vistas na Figura 21.

Figura 21: Fluxograma do desenvolvimento das atividades



Fonte: do autor, 2022.

3.2 Identificação da necessidade

A metodologia proposta por Norton (2013) foi adaptada para atender as necessidades de gerenciamento desta pesquisa. Desta forma a etapa de identificação da necessidade se deu antes mesmo do início da pesquisa, com a necessidade de um processo alternativo, capaz de ser executado em ambientes com risco de explosão, para uniões estruturais sendo observado através dos últimos anos, em diversas indústrias. Essa observação ocorreu dentro das indústrias de esmagamento de soja e transesterificação de biodiesel, as quais possuem atualmente diversas limitações de operações devido a presença de gases inerentes ao processo, nestes casos, respectivamente, hexano e metanol. Com uma economia cada vez mais competitiva, há uma maior necessidade de alterações nas unidades fabris, porém estas acabam sendo limitadas pelo período, geralmente anual, em que as plantas se encontram paradas, e sem nenhuma presença de gases que constituam atmosfera explosiva. A utilização da adesivação estrutural nesse cenário busca flexibilizar estes processos, sendo possível realizar alterações estruturais a qualquer hora, independente dos gases presentes na atmosfera do local, tendo em vista que este processo não gera calor ou necessita de uma fonte de energia, como ferramentas elétricas, que possa causar uma faísca ou outra falha que comprometa a segurança do local.

3.3 Pesquisa de suporte

A pesquisa de suporte se deu através de toda revisão bibliográfica desenvolvida ao longo desta dissertação, sendo que desta é possível citar assuntos vitais para o andamento do trabalho, os quais são: tipos de adesivo, teoria da adesão, espessura da camada de adesivo, seleção de adesivos, preparação de superfícies, carregamentos e falhas em uniões adesivadas, suportes de tubulação e elementos finitos. Através do estudo dos tópicos citados, foi possível suportar teoricamente os estudos e análises desenvolvidas. Esta etapa também delineou a fase três, definição dos objetivos.

3.3.1 Ensaio experimentais

Com o objetivo de avaliar as características mecânicas de uniões adesivadas, foram realizados ensaios para analisar as principais formas de carregamento a que estas juntas podem ser submetidas. Os ensaios utilizados foram ensaio de tração, ensaio de cisalhamento, ensaio de arrancamento e ensaio de fadiga.

Para a realização dos ensaios de tração, cisalhamento e arrancamento foi utilizada uma Máquina de Ensaio Universal Schenk com capacidade de 200kN, modelo UPM 200, Figura 22, a qual está localizada no Núcleo de Tecnologia Mecânica da Universidade de Passo Fundo. Já para os ensaios de fadiga foi utilizada uma Máquina Servo Pulser Shimadzu, Figura 23, com capacidade de 100kN, modelo EHF – EB 10 – 20L, também localizada no Núcleo de Tecnologia Mecânica da Universidade de Passo Fundo.

Figura 22: Máquina de Ensaio Universal Schenk



Fonte: do autor, 2022.

Figura 23: Máquina Servo Pulser Shimadzu



Fonte: do autor, 2022.

3.3.2 Materiais

A união adesiva é composta pelo adesivo, que é o material responsável pela união, e pelos substratos, que são os materiais unidos. Desta forma este capítulo traz os materiais utilizados nos ensaios e a justificativa da escolha dos mesmos.

3.3.2.1 O substrato

Os substratos utilizados foram de aço ASTM A 36. A escolha do material se deu devido a sua grande empregabilidade na indústria geral, sendo um material típico para fabricação de estruturas e suportes de tubulação. O mesmo é caracterizado por um aço de baixo carbono, sendo economicamente muito competitivo. As propriedades químicas e mecânicas deste aço são apresentadas nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10: Composição química do aço ASTM A36

Elemento	C	Mn	P	S	Si	Cu
Percentual	0,26	-	0,04	0,05	0,40	0,20

Fonte: ASTM A36 (2004).

Tabela 11: Propriedades mecânicas do aço ASTM A36

Propriedade	Valor
Tensão limite de resistência a tração	400 MPa
Tensão de Escoamento	250 MPa
Deformação específica final	20%

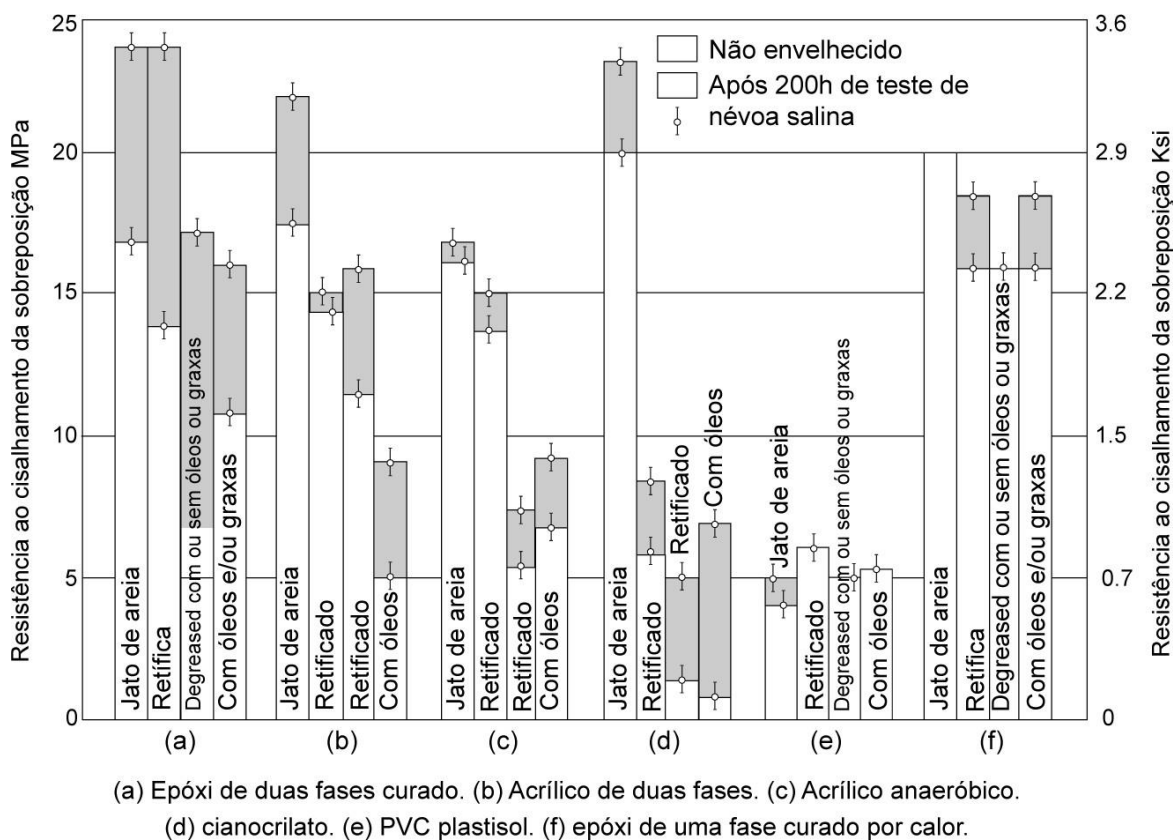
Fonte: ASTM A36, 2004.

3.3.2.2 O adesivo

A seleção de um adesivo estrutural não é uma tarefa simples, fato que ocorre por diversos motivos, como a alto número de produtos no mercado, a falta de informações técnicas, as diversas características que uma junta pode necessitar, entre outros. Porém, através da bibliografia é possível encontrar diversas situações de aplicação, as quais se tornaram a base para a seleção do adesivo.

Para a união de substratos de aço, diversos autores utilizaram adesivos a base de epóxi, e Petrie (2007, p. 613) traz um comparativo sobre adesivos de diversas bases químicas aplicados em substratos de aço, o qual consta na Figura 24. Como é possível ver neste gráfico, a maior resistência mecânica, para substratos de aço, se dá com a utilização de adesivos com base epóxi, composto por duas fases, com acabamento superficial grosseiro, ou mais fino, onde a resistência ao cisalhamento fica acima dos 25 MPa. Outros adesivos próximos a estes valores são os com base em acrílico ou cianocrilato, porém estes dois, de acordo com a Figura 24, são mais sensíveis ao acabamento superficial, necessitando uma maior rugosidade para garantir resistência ao cisalhamento. Também na Figura 24 é possível notar a queda da resistência mecânica devido à limpeza da superfície, que acontece na maioria dos grupos de adesivos.

Figura 24: Comparativo entre uniões adesivadas com substratos em aço



Fonte: Petrie (2007, p. 613).

Desta forma então, foi optado por um adesivo estrutural de base epóxi, sendo selecionado o adesivo Sikadur 32, da fabricante Sika. O mesmo possui uma alta tolerância à umidade, uma alta força de união e é indicado para unir diversos tipos de substratos como aços, concreto e cerâmicas.

Os adesivos da fabricante Sika já possuem uma grande empregabilidade dentro da indústria, sendo empregados principalmente como chumbador químico, para fixação de diversos tipos de estruturas. Por esse maior *know-how* do fabricante, foi optado por selecionar um adesivo neste catálogo. Outro ponto pertinente é a grande rede de distribuição deste material no Brasil, sendo um adesivo de fácil aquisição. A Tabela 11 traz as propriedades de uma junta adesivada entre substratos de aço e o adesivo Sikadur 32. (2019)

Como pode ser visto na Tabela 12, há as informações fornecidas pelo fabricante, onde nota-se uma considerável resistência à compressão, de até 80 MPa. Outro ponto importante deste adesivo é o fato de a cura não necessitar de uma alta temperatura, sendo que a mesma

ocorre a temperatura ambiente, com resultados já após um dia, tendo seu valor máximo após sete dias.

Tabela 12: Propriedades do adesivo Sikadur 32

Propriedade	Valor
Resistência à Compressão após 7 dias	80 MPa
Resistência à Compressão após 1 dia	60 MPa
Resistência à Flexão após 7 dias	50 MPa
Temperatura Mínima de Serviço	10°C
Temperatura Máxima de Serviço	60°C
Densidade	1,5 kg/l
Cura Inicial	24 horas
Cura Final	7 dias
Alongamento até a Ruptura	1.0 ± 0.1%
Módulo de Elasticidade em Tração	4000 N/mm ²
Módulo de Elasticidade em Compressão	3250 N/mm ²
Resistência à Tração	34 N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0,3

Fonte: Sikadur (2019).

3.3.2.3 Espessura do adesivo utilizado

De acordo com a norma ASTM D 1002 (1999, p. 4) a espessura média da camada de adesivo para ensaios deve ser de 0,001 in (0,025 mm), porém na aplicação este valor se torna de difícil obtenção, não concordando com a recomendação do fabricante.

De acordo com a especificação do produto, é recomendável utilizar camadas com até 1 mm de espessura. Estas camadas mais espessas impactam diretamente na redução da resistência mecânica da união, porém, essa se torna mais fácil de aplicar e controlar, sendo uma situação mais factível com a real utilização do material. Desta forma, foi optado por limitar a espessura da camada de adesivo, até o limite máximo de 1 mm, gerando assim, espessuras mais próximas do que se é esperado de uma aplicação real do material. Na bibliografia é possível citar as análises realizadas por Koppe (2014), e Szewczak et al. (2021) que também utilizam espessuras acima da recomendação da ASTM D 1002, sendo que o segundo utiliza espessuras acima de 1 mm.

3.4 Especificação das tarefas necessárias

A especificação das tarefas se dá com a definição de seis macro atividades, sendo estas a seleção do adesivo, fabricação dos corpos de prova, realização dos ensaios mecânicos, detalhamento em software CAD, avaliação e validação dos modelos escolhidos e simulação numérica.

Na primeira etapa, a seleção do adesivo é realizada através dos conhecimentos obtidos durante a realização da pesquisa de suporte. A seleção também se dá pela disponibilidade de produtos no mercado local.

A segunda tarefa, fabricação de corpos de prova, ocorre com a escolha dos ensaios que serão realizados. No presente trabalho foram realizados quatro ensaios mecânicos com uniões adesivadas, sendo estes os ensaios de tração, cisalhamento, arrancamento e fadiga. A fabricação dos corpos de prova se deu de acordo com as normas estudadas durante a etapa de pesquisa de suporte.

Após a conclusão da segunda tarefa, é possível iniciar a terceira, realização dos ensaios mecânicos, onde os ensaios são feitos de acordo com as mesmas normas que estabelecem a geometria dos corpos de prova.

A quarta tarefa consiste em estabelecer as estruturas que depois serão analisadas, e modelar estas em software CAD, através destes modelos será possível a realização da simulação numérica. A quinta tarefa ocorre concomitante com a quarta, pois durante a etapa de modelação das estruturas, também ocorre a avaliação e validação da utilização das mesmas. Este processo gera a definição e o modelo 3D definitivo para futura análise.

A sexta, e última tarefa, engloba a simulação numérica dos modelos selecionados, com dados obtidos durante os ensaios. Através desta etapa será possível então determinar, ou não, a utilização de uniões adesivadas para as situações escolhidas.

3.5 Síntese

Na etapa de síntese, fase cinco, a qual de acordo com Norton (2013, p. 6) é a etapa de concepção e invenção, é buscada então diversas configurações de suportes de tubulação, que possam atuar de maneiras distintas, com cargas distintas. Esta busca por configurações distintas tem a finalidade de testar a união em situações, buscando um maior escopo de utilização.

Esta etapa ocorre durante o modelamento 3D dos suportes, o qual auxilia na melhor forma construtiva. Os suportes analisados não somente devem sustentar a carga aplicada, mas

também direcioná-la da melhor maneira a união adesivada, sendo de extrema importância este último fator.

Outro ponto analisado durante a síntese foi a escolha do adesivo, onde mais de um foi selecionado para a solução do problema, porém, devido à indisponibilidade de fornecimento de alguns fabricantes, estes foram eliminados.

Também na síntese, com base na pesquisa de suporte, houve a seleção das normas necessárias para a realização dos ensaios. Estas foram definidas com base nos carregamentos aos quais a união poderia estar submetida, tração e cisalhamento, e carregamentos ao qual não poderia ser submetida, arrancamento, este último ensaio visa mostrar os baixos valores esperados. Há ainda o ensaio de fadiga, o qual tem como objetivo validar a utilização da união adesivada de forma cíclica.

3.5.1 Simulações numéricas

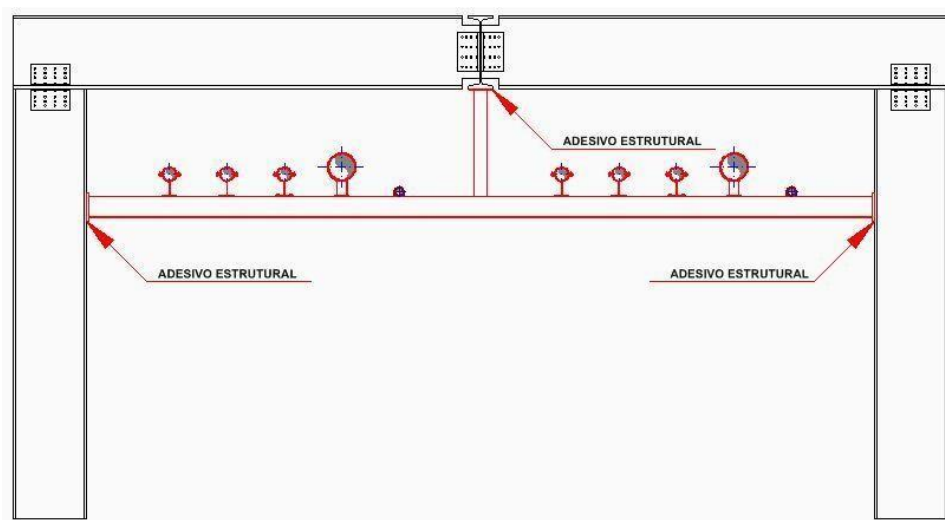
Para maior entendimento do comportamento e aplicação deste material, foram escolhidos três cenários diferentes, os quais podem ser facilmente encontradas em unidades industriais. Estes cenários são compostos por dois tipos de estruturas, a primeira se trata de uma estrutura já existente na unidade industrial, a qual irá ser aproveitada para suportar a carga de mais algumas tubulações adicionadas. Devido a característica de ser uma viga existente, a mesma não foi dimensionada, tendo em vista que este processo se daria em um momento muito antes da aplicação desta carga.

Já o segundo grupo, trata-se de estruturas especialmente concebidas para a aplicação desta carga, as quais serão adesivadas na estrutura já existente da unidade, sendo assim dimensionadas para a tubulação que deverá suportar.

3.5.1.1 Primeiro modelo para simulação

O primeiro modelo a ser analisado se trata de uma estrutura em formato de “pórtico”, onde as vigas laterais e superior são consideradas como estruturas já existentes, para as quais foi adotado um perfil W 610 x 174. A Figura 25 exemplifica em uma vista frontal o arranjo da estrutura metálica, onde as estruturas representadas na cor preta mostram as vigas existentes, e as estruturas na cor vermelha representam as vigas adicionadas através da adesivação estrutural. Na mesma figura é possível ver também as tubulações apoiadas na estrutura e os locais onde há a aplicação do adesivo.

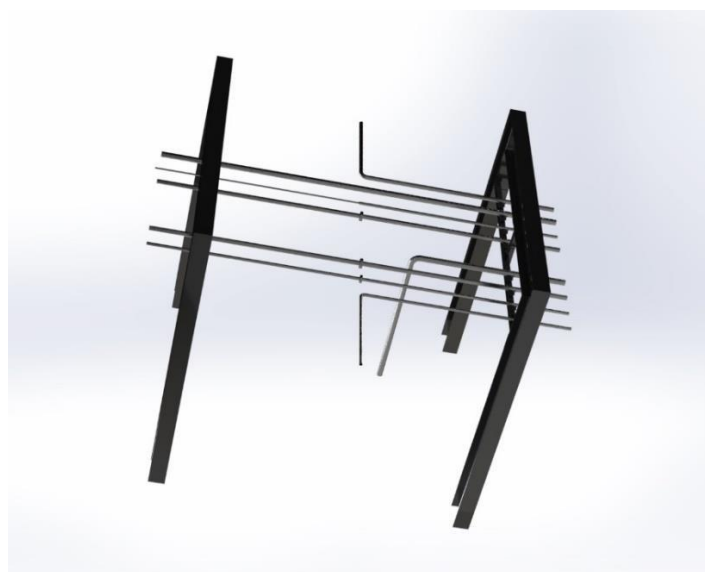
Figura 25: Vista frontal do primeiro modelo analisado



Fonte: do autor, 2022.

A Figura 26 exemplifica a sequência de suportes, e como ficariam estes suportes através da unidade industrial.

Figura 26: Tubulações alocadas no primeiro modelo analisado



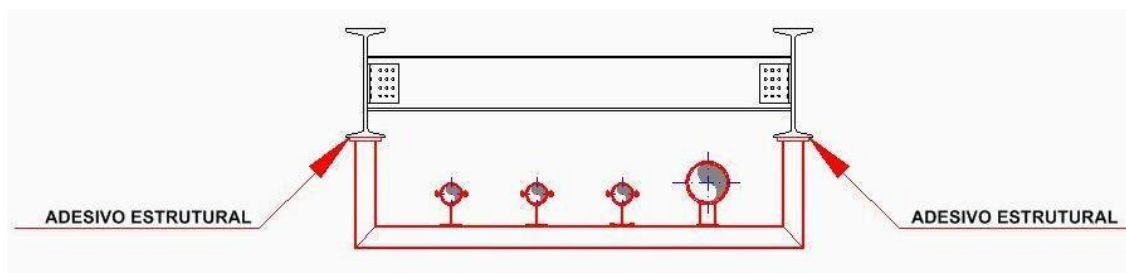
Fonte: do autor, 2022.

3.5.1.2 Segundo Modelo para Simulação

O segundo modelo a ser analisado se trata de uma estrutura em formato de “berço”, onde as vigas superiores são consideradas como estruturas já existentes, para as quais foram adotadas um perfil W 610 x 174. A Figura 27 exemplifica em uma vista frontal o arranjo da estrutura

metálica, onde a estrutura representada na cor preta mostra a viga existente, e as estruturas na cor vermelha representam as vigas adicionadas através da adesivação estrutural. Na mesma figura é possível ver também as tubulações apoiadas na estrutura e os locais onde há a aplicação do adesivo.

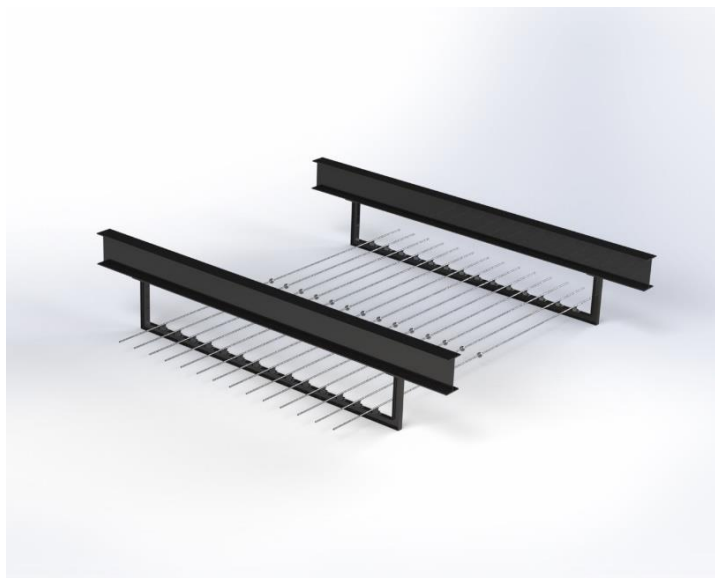
Figura 27: Vista frontal do segundo modelo analisado



Fonte: do autor, 2022.

A Figura 28 exemplifica a sequência de suportes, e como ficariam estes suportes através da unidade industrial.

Figura 28: Tubulações alocadas no segundo modelo analisado



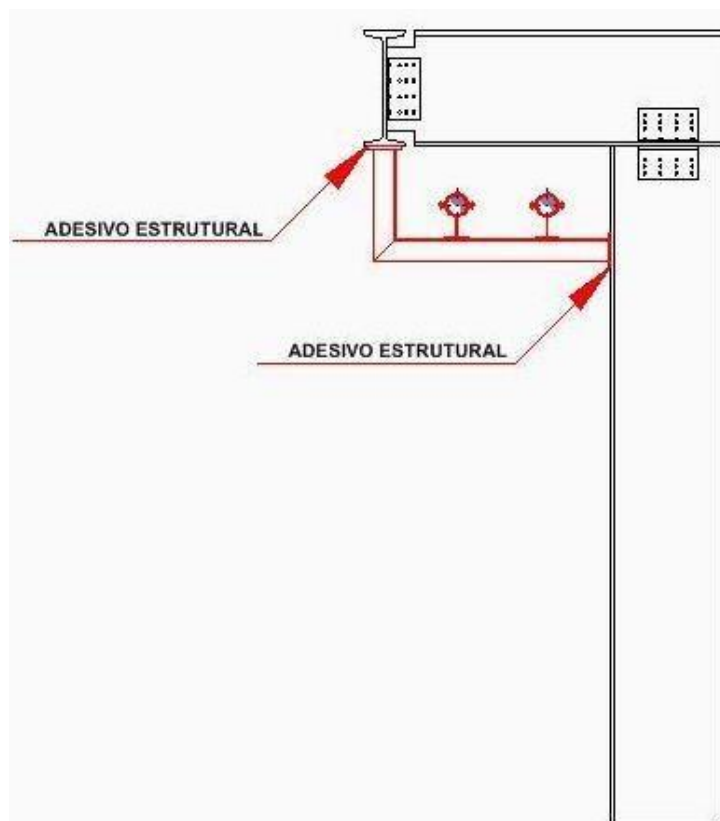
Fonte: do autor, 2022.

3.5.1.3 Terceiro Modelo para Simulação

O terceiro modelo a ser analisado se trata de uma estrutura em formato de “L”, onde as vigas superior e lateral são consideradas como estruturas já existentes, para as quais foram adotadas um perfil W 610 x 174. A Figura 29 exemplifica em uma vista frontal o arranjo da

estrutura metálica, onde a estrutura representada na cor preta mostra a viga existente, e as estruturas na cor vermelha representam as vigas adicionadas através da adesivação estrutural. Na mesma figura é possível ver também as tubulações apoiadas na estrutura e os locais onde há a aplicação do adesivo.

Figura 29: Vista frontal do terceiro modelo analisado



Fonte: do autor, 2022.

A Figura 30 exemplifica a sequência de suportes, e como ficariam estes suportes através da unidade industrial.

Figura 30: Tubulações alocadas no terceiro modelo analisado



Fonte: do autor, 2022.

3.6 Análise

Na etapa de análise, fase seis, ocorre o estudo dos modelos apresentados na parte de síntese, sendo os mesmos avaliados.

As estruturas apresentadas nas Figuras 25, 27 e 29 representam modelos típicos de suportes de tubulação, nos quais há a união de estruturas já existentes com elementos estruturais novos.

Desta forma, a Figura 25 apresenta um modelo de “pórtico”, onde há a aplicação de uma viga transversal para sustentação das tubulações. Visando evitar carregamentos indesejados, como arrancamento, é adicionado um suporte vertical no meio, o qual atua reduzindo significativamente o vão livre da viga, de forma a diminuir a flexão da mesma.

O segundo modelo analisado é apresentado na Figura 27, onde este se trata de uma estrutura em formato de “berço”. Neste modelo há a união de uma viga existente com três vigas novas, em formato de “U”. É interessante salientar que este modelo dispensa a necessidade de vigas laterais pré-existentes na estrutura, sendo um modelo independente das distâncias entre vigas verticais existentes.

Neste também há predileção por tensões de tração na região do adesivo, motivo pelo qual a forma foi escolhida.

O terceiro modelo analisado, apresentado na Figura 29, traz uma estrutura em formato de “L”, que se caracteriza por ter dimensões menores e por aproveitar as estruturas pré-existentes para utilizar menos material, devido à estas características, este tipo de arranjo fica limitado a suportar poucas tubulações. Vale dizer também que as uniões adesivadas foram definidas para haver carregamentos de tração e cisalhamento.

3.7 Seleção

Como forma de buscar um maior entendimento sobre a utilização de uniões adesivadas em suportes de tubulação, e também devido às várias formas que estes podem se apresentar, foi optado por trabalhar com os três modelos apresentados na etapa de síntese.

Desta forma, há uma maior investigação sobre a aplicabilidade do método, e também, eventuais limitações que este possa apresentar. Esta decisão também visa gerar um maior embasamento sobre o estudo.

3.8 Modelagem e simulações

Como esta metodologia se trata de um método iterativo, as etapas 8 e 9 ocorrem durante as primeiras sete etapas. A etapa 8, projeto detalhado, é realizada com a produção dos modelos CAD das estruturas simuladas, as quais podem ser alterados durante todo o estudo, conforme julgado necessário avaliar casos diferentes.

Já a etapa de protótipo e teste é realizada com a simulação dos modelos CAD, através do método de elementos finitos, etapa a qual também pode ser realizada de maneira iterativa, a fim de validar modelos.

Nesta etapa, de forma a embasar a utilização dos perfis selecionados para suportar as cargas, há também duas validações de cada estrutura, de forma a garantir que os perfis escolhidos não apresentaram problemas devido à tensão gerada.

A avaliação realizada é estática e linear. Não foram apresentados dimensionamentos utilizando a norma ABNT NBR 8800, ou procedimento similar, pois fogem ao objetivo deste trabalho que é avaliar o comportamento do adesivo. No entanto, mesmo utilizando os menores perfis de catálogo do fabricante, os valores de tensões e deslocamento são muito baixos.

3.8.1 Primeiro modelo para simulação

A análise da estrutura destas novas estruturas foi realizada através de uma análise matricial utilizando o software Ftool, e há a complementação dos resultados com a análise de elementos finitos do software SolidWorks. As Figuras 28 e 29 trazem, respectivamente, a análise matricial e de elementos finitos realizadas para destes perfis.

Neste modelo foram aplicadas oito cargas geradas pela força peso de oito tubulações, as quais podem ser vistas na Tabela 13. Estas cargas são compostas pelo peso do próprio tubo, acessórios e o fluido que ocupa o interior dos tubos, sendo típicas linhas de processo e utilidades em indústrias químicas.

Para o levantamento das cargas foram considerados as situações mais críticas. Devido a isto, os fluidos que possuem densidade menor do que 1000 kg/m^3 foram substituídos no cálculo, por água, tendo em vista que todas as tubulações após a instalação deverão ser submetidas a teste hidrostático, o qual pode representar o momento de maior carga na vida da estrutura.

De acordo com as recomendações de Nayyar (1999, [s.p.]), cargas dinâmicas são nocivas a tubulações, podendo causar rápidas falhas por fadiga, desta forma, as mesmas devem ser evitadas. Levando em conta este aspecto nocivo ao sistema, e a falta de embasamento

necessário para a análise sobre o adesivo, as cargas dinâmicas foram desconsideradas no presente estudo.

Tabela 13: Cargas geradas pela força peso na Simulação 01

Carga Peso	Componentes	Massa (kg)	Massa Total (kg)	Carga (N)
P1	6 m tubo 2" SCH 80	32,58	46,24	453,60
	1 Curva RL	0,68		
	Água	12,98		
P2	6 m tubo 2" SCH 40	32,58	61,58	604,10
	2 Flanges Slip On 2"	4,6		
	Ácido Fosfórico	24,40		
P3	6 m tubo 3" SCH 40	67,68	77,66	761,87
	2 Flanges Slip On	7,2		
	Metanol	2,78		
P4	6 m tubo 4" SCH 40	96,36	149,68	1468,34
	1 Curva RL	4,04		
	Óleo Bruto	49,28		
P5	6 m tubo 3" SCH 80	91,5	124,27	1219,07
	2 Flanges Slip On	7,2		
	Vapor @10 Bar	25,57		
P6	2 m tubo 2" SCH 80	14,94	32,99	323,62
	3 m tubo 1" SCH 80	9,69		
	1 Redução 2" x 1"	0,408		
	Soda 50%	7,95		
P7	6 m tubo 4" SCH 40	96,36	99,14	972,59
	Ar Comprimido @5 Bar	2,78		
P8	6 m tubo 3" SCH 40	67,68	98,41	965,42
	1 Curva RL	2,12		
	Óleo Refinado	28,61		

Fonte: do autor, 2022.

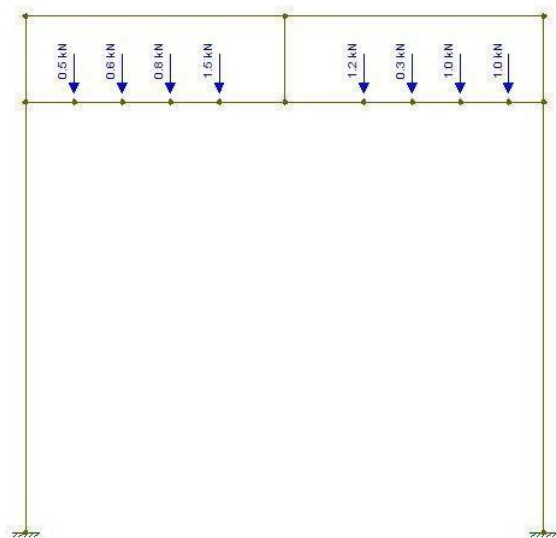
A Figura 31 mostra o modelo criado para a análise matricial, o qual foi realizado através do software Ftool, utilizando elementos de viga 2D. Para o modelamento desta estrutura foram selecionados perfis do tipo I, das tabelas Gerdau/AçoMinas.

A análise matricial foi realizada com a aplicação das cargas da Tabela 13. O resultado da mesa é o momento fletor na estrutura apresentado na Figura 32.

Para a realização da análise, foi escolhido o perfil W150x13, o qual é o menor perfil nesta norma. Como é mostrado na Figura 31, o momento fletor máximo é de 1,1 kN.m, o que resulta em uma tensão de 12,82 MPa na viga, a qual é calculada de acordo com a Equação 4.

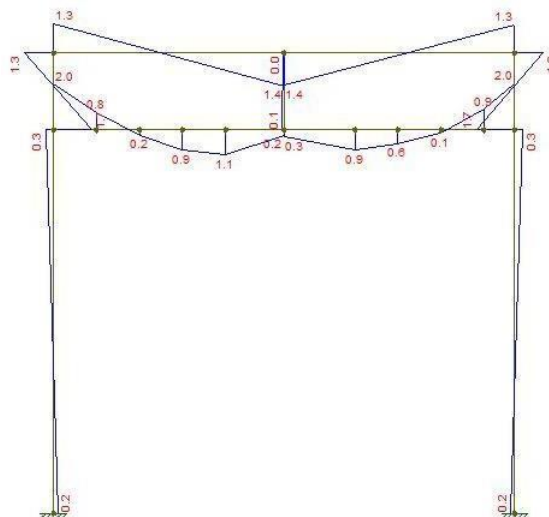
$$\sigma = \frac{M_{m\acute{a}x} \cdot h}{I} \quad (4)$$

Figura 31: Primeira estrutura analisada através do software Ftool. estrutura analisada



Fonte: do autor, 2022.

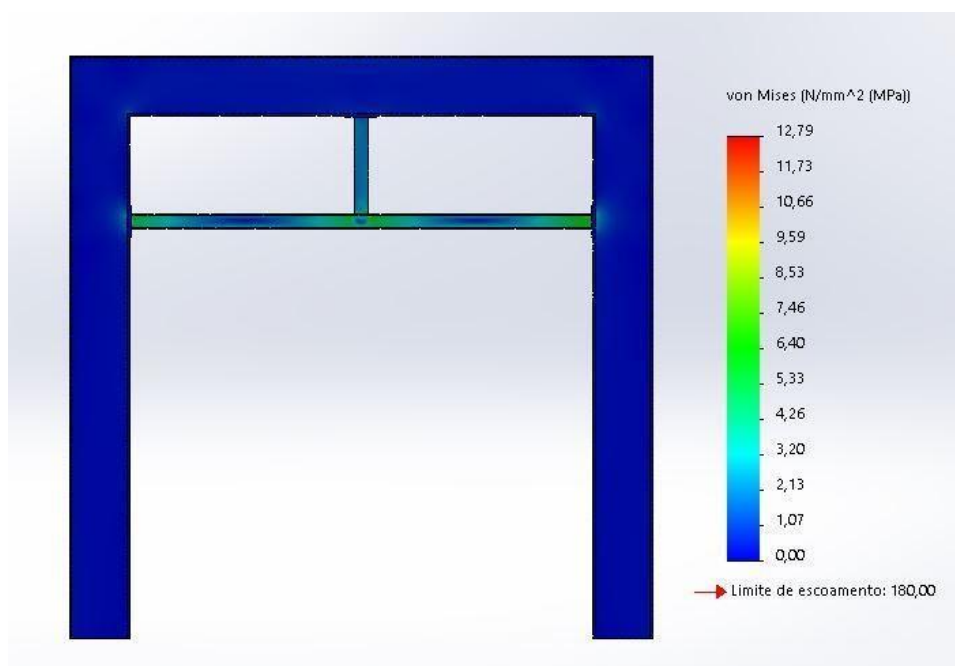
Figura 32: Momentos fletores resultantes na primeira



Fonte: Autor, 2021.

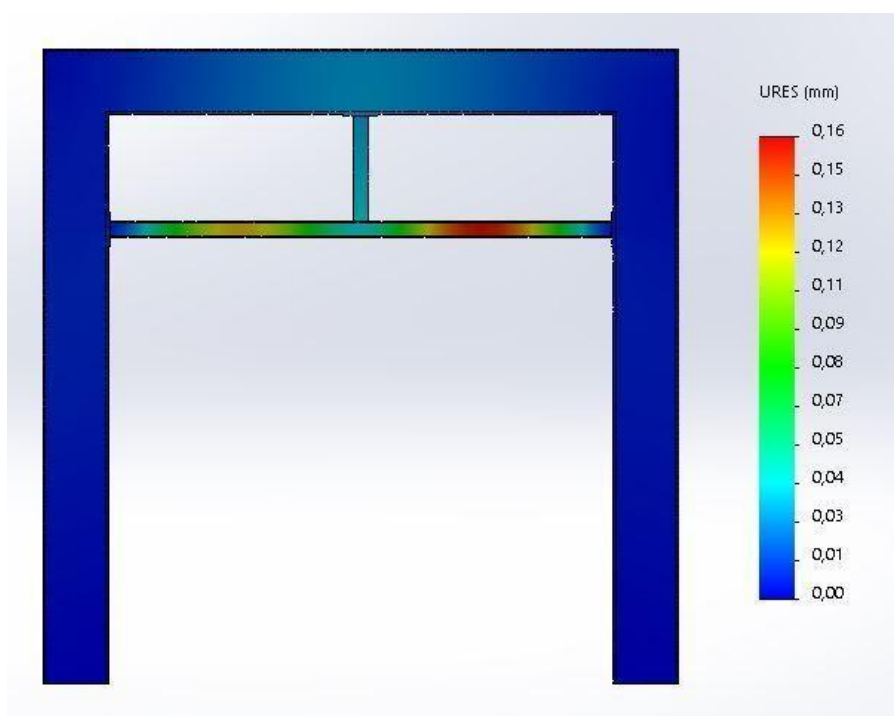
Como complementação dos resultados obtidos na análise matricial, foi realizada uma análise de elementos finitos, utilizando o software SolidWorks. Para esta análise, foi utilizada a malha padrão do SolidWorks, uma malha de caráter triangular de primeira ordem. Para este modelo, a geração da malha resultou em 201942 elementos e 399257 nós. O cálculo também foi realizado utilizando as cargas apresentadas na Tabela 13. O resultado desta segunda análise, através do método de elementos finitos, é apresentado na Figura 33, onde a maior tensão registrada foi de 12,79 MPa, valor muito próximo do encontrado na análise matricial, com uma variação de apenas 0,23%. Através da simulação foi também possível determinar o deslocamento da estrutura, o qual é apresentado através da Figura 34.

Figura 33: Análise, via MEF, no primeiro modelo, utilizando o software SolidWorks



Fonte: do autor, 2022.

Figura 34: Deslocamento máximo, no primeiro modelo calculado, através do método dos elementos finitos



Fonte: do autor, 2022.

3.8.2 Segundo modelo para simulação

A análise destas novas estruturas foi realizada através de análise matricial, utilizando o software Ftool. Neste modelo foram aplicadas quatorze cargas geradas pela força peso de quatorze tubulações, as quais podem ser vistas na Tabela 14. Estas cargas são compostas pelo peso do próprio tubo, acessórios e o fluido que ocupa o interior dos tubos. Sendo este modelo composto por linhas de escape de gases de processo e outros que se façam necessária a purga do processo.

Tabela 14: Cargas geradas pela força peso na Simulação 02

Carga Peso	Componentes	Massa (kg)	Massa Total (kg)	Carga (N)
P1 até P14	6 m tubo ¾" SCH 80	13,14	16,62	163,04
	2 Flanges Slip On	1,8		
	Teste hidrostático	1,68		

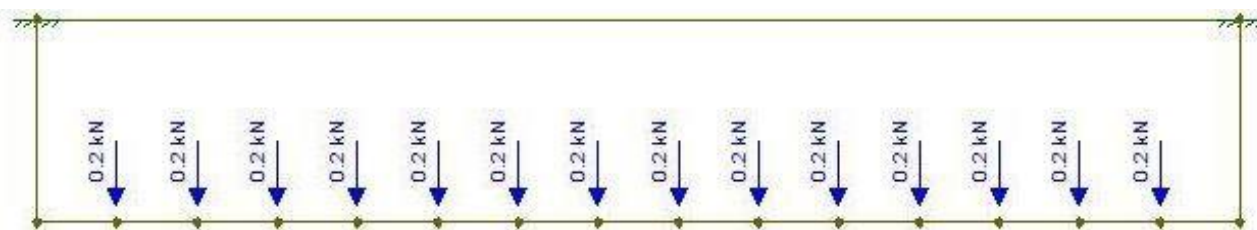
Fonte: do autor, 2022.

A Figura 35 mostra o modelo criado para análise matricial, a qual foi realizada através do software Ftool. Para a realização deste cálculo, foram selecionados perfis do tipo I, das tabelas Gerdau/AçoMinas.

O cálculo se deu com a aplicação das cargas da Tabela 14. O resultado do mesmo é o momento fletor na estrutura.

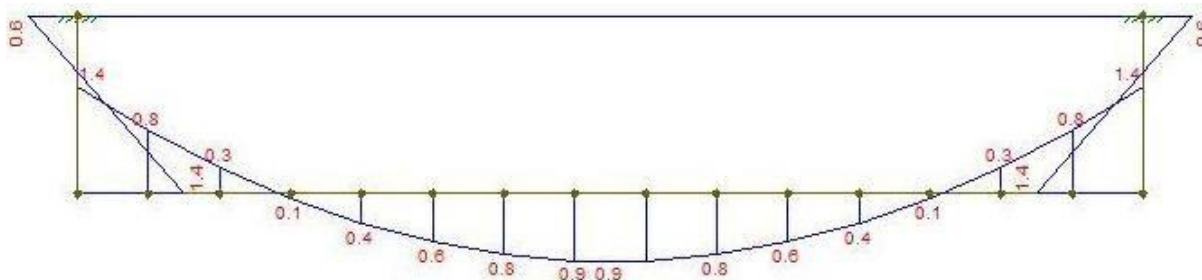
Já na Figura 36 há os resultados com os momentos fletores gerados na estrutura. Para a realização do cálculo, foi escolhido o perfil W150x13, o qual é o menor perfil nesta norma. Como é mostrado na Figura 36, o momento fletor máximo é de 1,4 kN.m, o que resulta em uma tensão de 16,31 MPa na viga, a qual é calculada de acordo com a Equação 4.

Figura 35: Segunda estrutura analisada através do software Ftool



Fonte: do autor, 2022.

Figura 36: Momentos fletores resultantes na segunda estrutura analisada

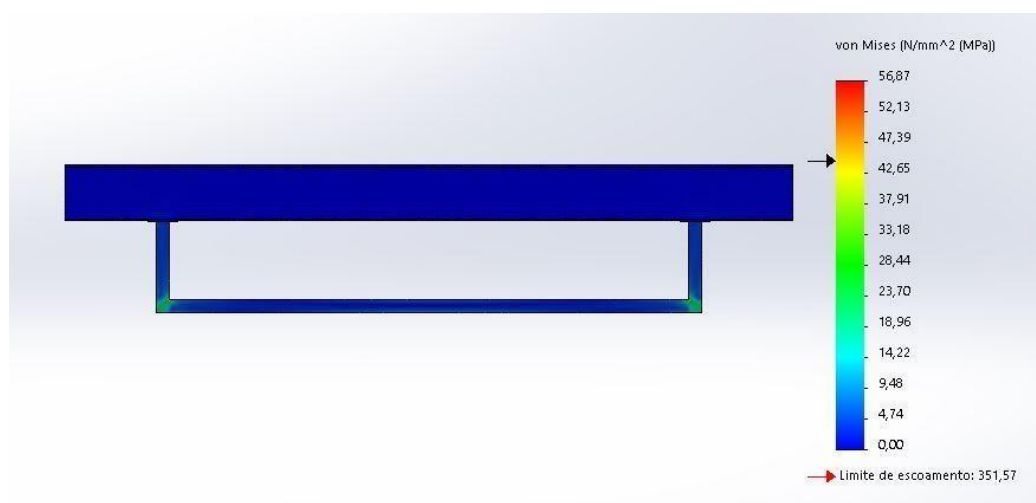


Fonte: do autor, 2022.

Como complementação dos resultados obtidos na análise matricial, foi realizada uma análise de elementos finitos, utilizando o software SolidWorks. Para esta análise, foi utilizada a malha padrão do SolidWorks, uma malha de caráter triangular de primeira ordem. Para este modelo, a geração da malha resultou em 282546 elementos e 501934 nós. O cálculo também foi realizado utilizando as cargas apresentadas na Tabela 14. O resultado desta segunda análise, através do método de elementos finitos, é apresentado na Figura 37, onde a maior tensão registrada foi de 56,87 MPa, porém este valor se trata de um ponto de concentração de tensões, não sendo uma representação verdadeira do fenômeno físico, e tendo o valor descartado. Na região do entorno deste ponto é observado tensões na grandeza de 17 MPa, o que representa uma variação de aproximadamente 4% do valor previamente obtido.

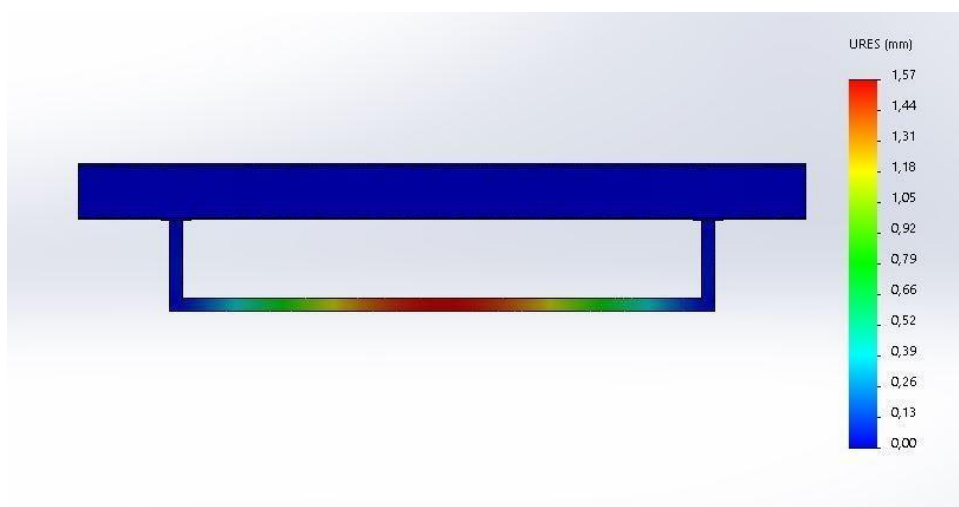
Através da simulação foi também possível determinar o deslocamento da estrutura, o qual é apresentado através da Figura 38.

Figura 37: Análise, via MEF, no segundo modelo, utilizando o software SolidWorks



Fonte: do autor, 2022.

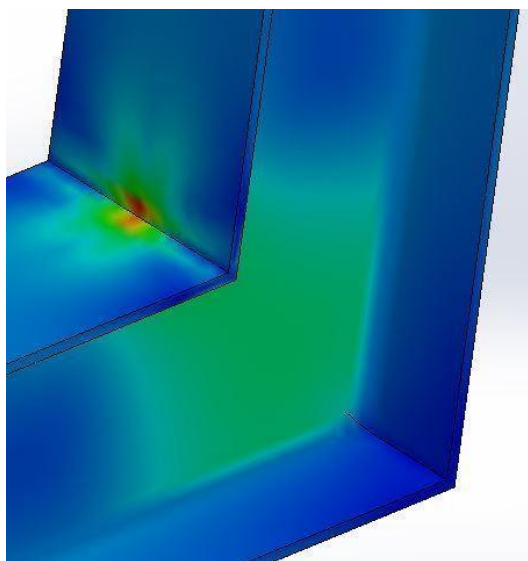
Figura 38: Deslocamento máximo, no segundo modelo calculado, através do método dos elementos finitos



Fonte: do autor, 2022.

A Figura 39 traz o ponto de concentrações de tensão no modelo simulado, através da qual é possível observar melhor os resultados obtidos.

Figura 39: Concentrações de tensão no segundo modelo analisado



Fonte: do autor, 2022.

3.8.3 Terceiro Modelo para Simulação

A análise destas novas estruturas foi realizada através de análise matricial, utilizando o software Ftool. Neste modelo foram aplicadas duas cargas geradas pela força peso de duas tubulações, as quais podem ser vistas na Tabela 15. Estas cargas são compostas pelo peso do

próprio tubo, acessórios e o fluido que ocupa o interior dos tubos. Sendo este modelo composto por linhas de água de saída de uma unidade industrial.

Tabela 15: Cargas geradas pela força peso na Simulação 03

Carga Peso	Componentes	Massa (kg)	Massa Total (kg)	Carga (N)
P1 até P2	8 m tubo 8" SCH 40	339,84	598,10	5867,37
	Condensado	258,26		

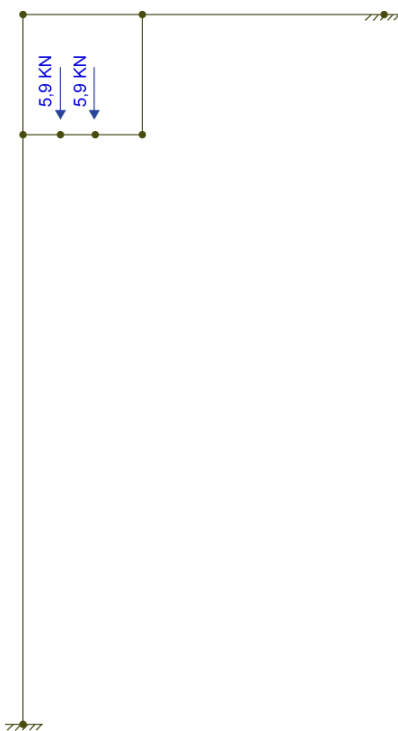
Fonte: do autor, 2022.

A Figura 40 mostra o modelo criado para análise matricial, o qual foi realizado através do software Ftool. Para a realização deste cálculo, foram selecionados perfis do tipo I, das tabelas Gerdau/AçoMinas.

A análise matricial se deu com a aplicação das cargas da Tabela 15. O resultado do cálculo é o momento fletor na estrutura.

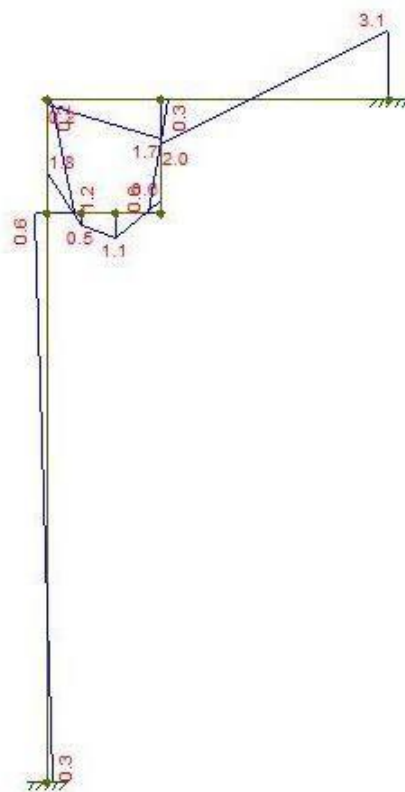
Já na Figura 41 há os resultados com os momentos fletores gerados na estrutura. Para a realização da análise, foi escolhido o perfil W150x13, o qual é o menor perfil nesta norma. Como é mostrado na Figura 40, o momento fletor máximo é de 2,0 kN.m, o que resulta em uma tensão de 23,31 MPa na viga, a qual é calculada de acordo com a Equação 4.

Figura 40: Terceira estrutura analisada através do software Ftool



Fonte: do autor, 2022.

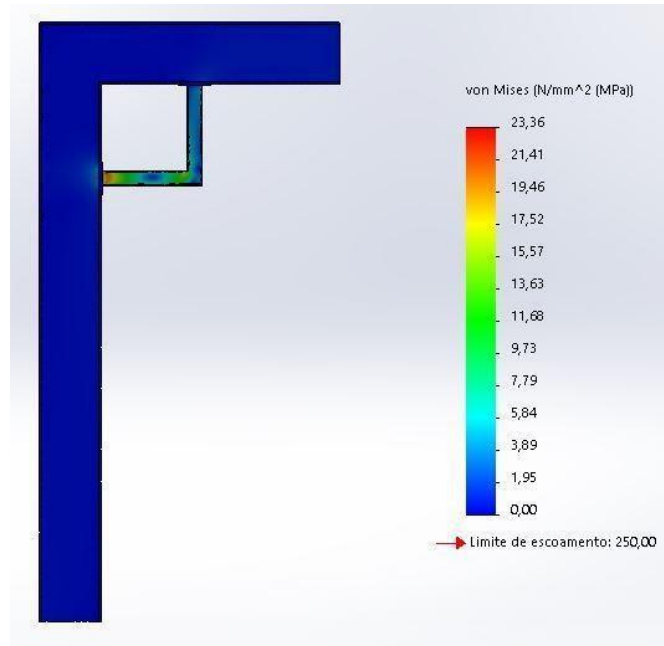
Figura 41: Momentos fletores resultantes na terceira estrutura analisada



Fonte: do autor, 2022.

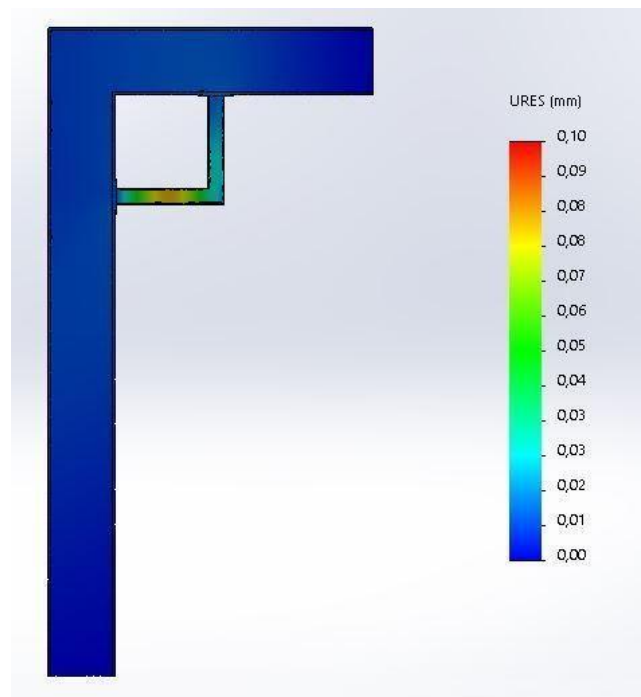
Como complementação dos resultados obtidos na análise matricial, foi realizada uma análise de elementos finitos, utilizando o software SolidWorks. Para esta análise, foi utilizada a malha padrão do SolidWorks, uma malha de caráter triangular de primeira ordem. Para este modelo, a geração da malha resultou em 204061 elementos e 361159 nós. O cálculo também foi realizado utilizando as cargas apresentadas na Tabela 15. O resultado desta segunda análise, através do método de elementos finitos, é apresentado na Figura 42, onde a maior tensão registrada foi de 23,36 MPa, valor muito próximo do encontrado na outra análise, com uma variação de apenas 0,21%. Através da simulação foi também possível determinar o deslocamento da estrutura, o qual é apresentado através da Figura 43.

Figura 42: Análise, via MEF, no terceiro modelo, utilizando o software SolidWorks



Fonte: do autor, 2022.

Figura 43: Deslocamento máximo, no terceiro modelo calculado, através do método dos elementos finitos



Fonte: do autor, 2022.

3.9 Simulação numérica dos adesivos sob os carregamentos

Com a seleção dos perfis estruturais das estruturas dos três modelos, bem como os resultados dos ensaios realizados nas uniões adesivadas, o trabalho continuar-se-á através das simulações numéricas focadas em obter as tensões nos adesivos.

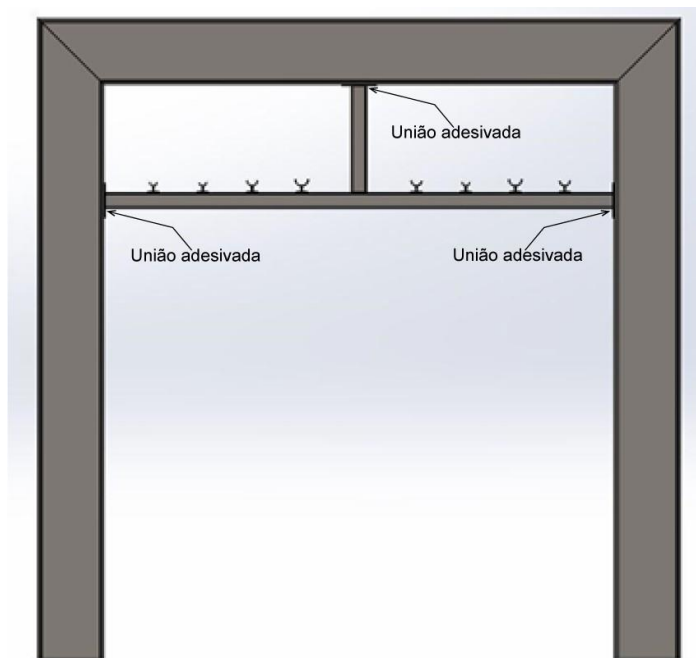
Desta forma, a primeira estrutura foi simulada através do software Ansys, através de uma análise estática. Após a simulação, busca-se determinar o ponto de rompimento do adesivo, o que ocorre através de uma simulação dinâmica, utilizando o software Ansys LS Dyna. Devido ao menor poder de processamento requerido, foi utilizado o software SolidWorks para realizar as simulações estáticas dos modelos dois e três.

As simulações foram realizadas utilizando os mesmos modelos que serviram de base para seleção dos perfis das vigas, porém, com a adição do adesivo estrutural entre as vigas novas e existentes, conforme indicado nas Figuras 44, 45 e 46.

As cargas utilizadas também foram as mesmas apresentadas nas Tabelas 13, 14 e 15.

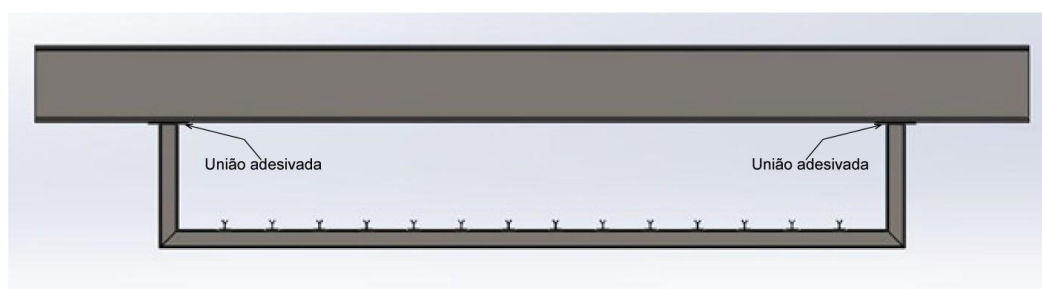
Desta forma, foram simulados os três modelos conforme constam nas Figuras 44, 45 e 46.

Figura 44: Primeiro modelo de estrutura adesivada estudado



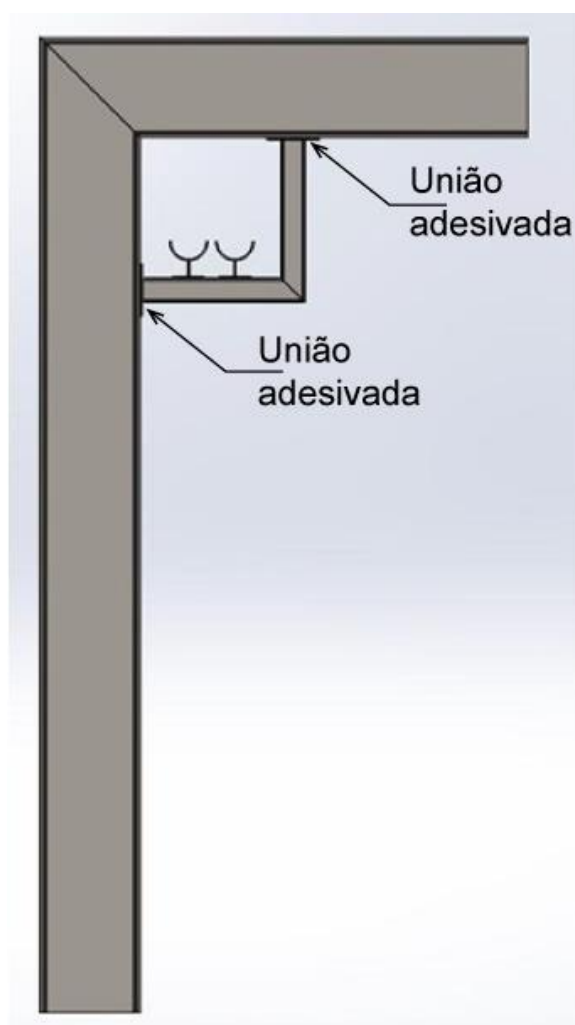
Fonte: do autor, 2022.

Figura 45: Segundo modelo de estrutura adesivada estudado



Fonte: do autor, 2022.

Figura 46: Terceiro modelo de estrutura adesivada estudado



Fonte: do autor, 2022.

A etapa 10, produção, não é aplicável a presente dissertação.

3.10 Patente

A presente dissertação resultou também em um pedido de patente (Anexo III), o qual foi depositado no sistema do INPI sob o número de pedido BR 10 2022 000258 4. Abaixo é apresentado o estado da arte e a reivindicação apresentados no pedido.

3.10.1 Estado da arte

A norma IEC 60079-10-1 define como atmosfera explosiva aquela que envolve uma mistura de substâncias inflamáveis (na forma de gás, vapor, névoa, poeira ou fibra) com o ar em condições atmosféricas, onde a combustão se propaga através da mistura após a ignição. Nestas áreas, encontradas em diversas instalações, cuidados especiais devem ser tomados para construção, instalação e utilização de equipamentos elétricos, tendo em vista que superaquecimentos e faíscas podem gerar explosões. Nestas áreas todos os equipamentos elétricos instalados devem ser projetados especificamente para essa aplicação, seguindo as normas vigentes, sendo que no Brasil a principal norma para essa aplicação é a NBR 9518. Também é importante salientar que todas as ferramentas elétricas utilizadas neste ambiente devem respeitar a classificação própria do ambiente. Também devido ao alto risco do ambiente, processos como de soldagem, onde há uma fonte de ignição direta, não são permissíveis de serem executados nestes locais.

Adesivos estruturais são substâncias, compostas de diversas famílias químicas, com a finalidade de unir dois substratos (corpos), que podem compostos por quaisquer materiais. Vale ressaltar que estes já são empregados há vários anos na construção mecânica, tendo destaque o grande campo de atuação no qual são empregados, podendo citar a indústria aeronáutica, automobilística, construção civil, e várias outras.

A aplicação de adesivos estruturais pode eliminar a necessidade de realização do processo de soldagem, ou a perfuração de materiais, com finalidade de utilizar fixadores convencionais, como parafusos. Essa característica permite que este método de construção seja empregado em ambientes com atmosfera explosiva, tendo em vista que não há produção de faíscas ou uma fonte de energia significativa no processo que poderia desencadear uma explosão.

3.10.2 Reivindicação

Utilização de adesivos estruturais em ambientes com risco de explosão, como alternativa a uniões convencionais, com a finalidade de unir estruturas em aço, ferro fundido, concreto, e demais materiais que possam a ser utilizados.

Estas uniões podem ter caráter estrutural, ou não, sendo independente o uso da estrutura adesivada. De forma que faz parte do escopo desta patente a utilização de uniões adesivadas como solução para união de elementos em ambientes onde há limitações para utilização de outras formas, sejam convencionais ou não, de união mecânica.

O adesivo estrutural empregado pode ser de qualquer base ou família química, bem como de qualquer tipo, tendo em vista que a reivindicação é da utilização da adesivação estrutural como solução para um problema, e não de um produto específico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A primeira parte deste capítulo visa a trazer os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento, arrancamento, tração e fadiga. Estes ensaios são de suma importância para o desenvolvimento do trabalho, pois são informações necessárias para a realização das análises de elementos finitos, e validação dos modelos.

Já na segunda etapa deste capítulo são então apresentados os resultados obtidos das simulações numéricas, as quais são realizadas em três etapas. A primeira simulação visa complementar os resultados obtidos no ensaio de tração.

A segunda simulação é realizada com o intuito de obter a carga necessária para a falha das uniões adesivadas do primeiro modelo. Já as demais simulações são análises estáticas dos três modelos estudados com a aplicação das cargas selecionadas.

4.1 Resultados dos ensaios de cisalhamento

Os ensaios de cisalhamento foram realizados de acordo com a norma ASTM D 1002, os quais tiveram como resultado a tensão de escoamento e a tensão máxima da união adesivada. Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados na Tabela 16. Os corpos de prova fabricados podem ser vistos na Figura 47.

Figura 47: Corpos de prova fabricados para ensaio de cisalhamento



Fonte: do autor, 2022.

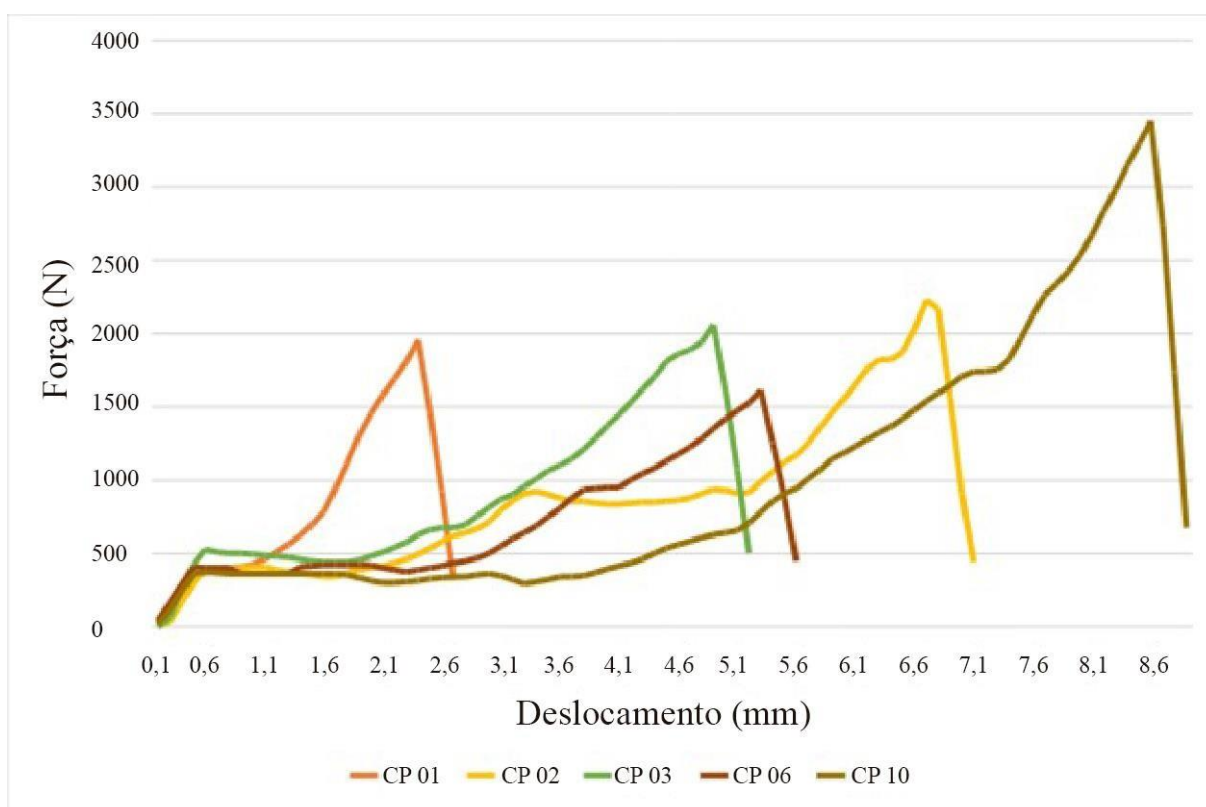
Tabela 16: Resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento

Corpo de prova	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)
CP01	11,206	12,673
CP02	13,671	14,453
CP03	12,814	13,368
CP06	10,429	10,46
CP10	15,019	22,352
Média	12,628 ± 1,655	14,661 ± 4,061

Fonte: do autor, 2022.

Referente à resistência ao cisalhamento o adesivo Sikadur 32 apresenta uma resistência mediana entre adesivos da mesma família, sendo 218,17% maior do que a tensão máxima obtida por Kumar et al. (2018) e 38,91% menor do que os valores encontrados por Já et al. (2021).

Figura 48: Resultados obtidos no ensaio de cisalhamento



Fonte: do autor, 2022.

O gráfico apresentado na Figura 48 ilustra o comportamento dos corpos de prova no ensaio, nos quais há um comportamento linear até a carga de 500 N, após isto há um crescimento não linear até a ruptura do corpo de prova. O trecho linear da curva é caracterizado por menores

deformações e esforços, e após isso, há grandes deslocamentos com cargas mais altas, até chegar à fratura do material.

Todos os corpos de prova apresentam fratura coesiva no adesivo, sendo esta então a resistência da união adesivada, não havendo falhas nos substratos, ou qualquer outro fator que pudesse interferir nos resultados finais.

4.2 Resultado dos ensaios de arrancamento

Figura 49: Corpos de prova fabricados para ensaio de arrancamento



Fonte: do autor, 2022.

Os ensaios de arrancamento foram realizados seguindo a norma ASTM D 1876, os resultados obtidos nestes ensaios foram a tensão de escoamento e a tensão máxima da união adesivada. Os corpos de prova utilizados podem ser vistos na Figura 49.

Tabela 17: Resultados obtidos nos ensaios de arrancamento

Corpos de Prova	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Máxima (MPa)
CP02	3,254	3,906
CP04	2,989	3,342
CP05	2,897	3,516
CP08	2,907	3,602
CP10	3,623	3,993
Média	3,134 ± 0,276	3,672 ± 0, 243

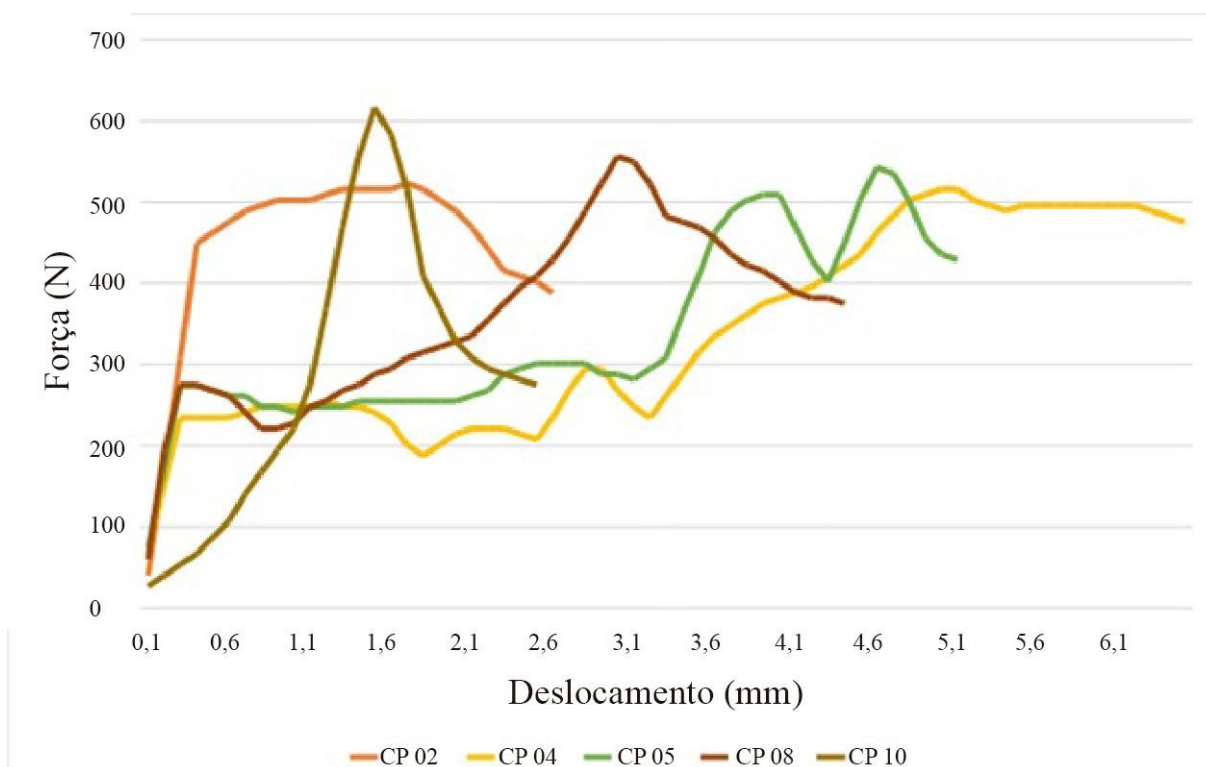
Fonte: do autor, 2022.

Stewart et. al (2007, p. 285) realizou ensaios de arrancamento com uma união adesivada composta por substratos de alumínio, unidos através do adesivo Bondmaster E3334, o qual é de base epóxi. Os autores encontraram tensões máximas de arrancamento entre 4 e 8 MPa.

Já et. al (2021, p. 7) também realizou ensaios de arrancamento em uniões com adesivo de base epóxi com substratos em aço (S235JR). Nestes ensaios, os autores encontraram tensões máximas de arrancamento próximas à 2,5 MPa.

Uniões adesivadas apresentam baixa resistência ao arrancamento, sendo necessário evitar este tipo de carregamento. Os valores apresentados na Tabela 17 mostram o quão baixa pode ser essa resistência.

Figura 50: Resultados obtidos no ensaio de arrancamento

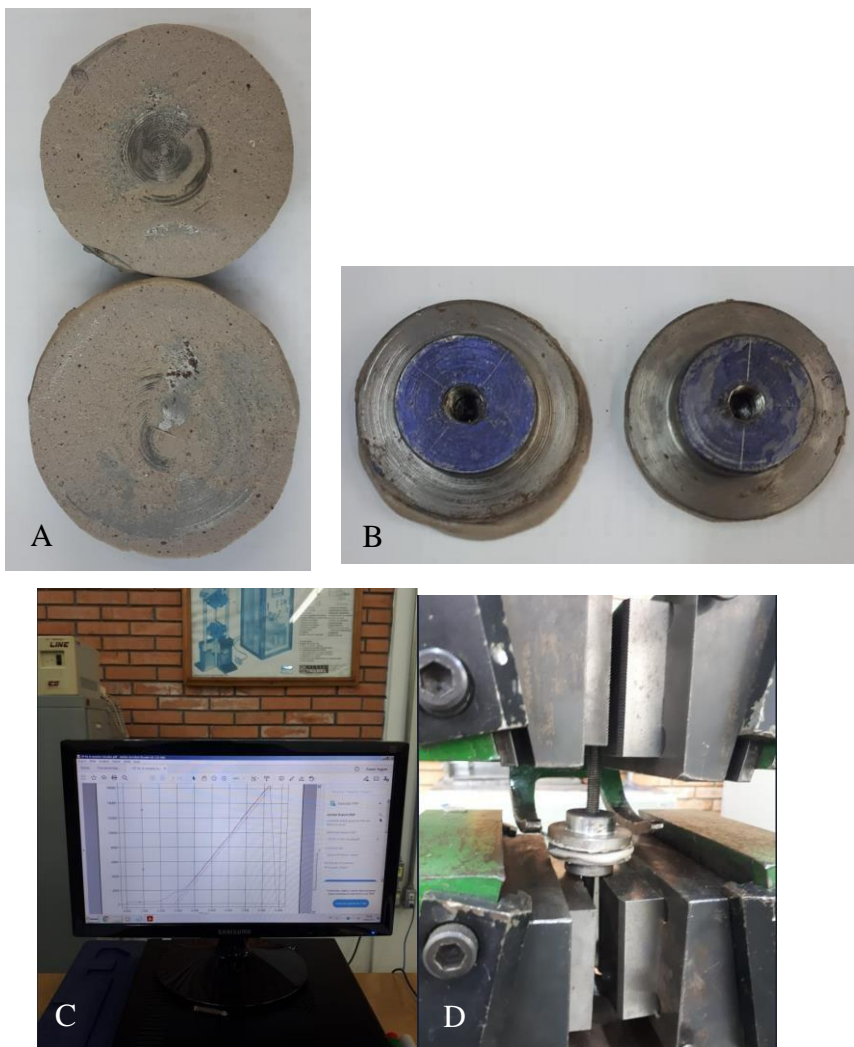


Fonte: do autor, 2022.

O gráfico apresentado na Figura 50 ilustra os dados da Tabela 17. Através deste é possível notar uma região elástica e após isto um comportamento não linear, que segue até a ruptura dos corpos de prova. Também é importante ver, conforme já era esperado, os baixos resultados obtidos nos ensaios de arrancamento, sendo este o pior tipo possível de carregamento para uniões adesivadas.

4.3 Resultado dos ensaios de tração

Figura 51: a) corpos de prova ensaiados na segunda tentativa. B) corpos de prova ensaiados na primeira tentativa. C) resultados dos ensaios. D) Primeira tentativa de realização do ensaio



Fonte: do autor, 2022.

Os ensaios de tração foram realizados de acordo com a norma ASTM D 897, através da qual foi possível obter a tensão de escoamento e a tensão máxima para corpos de prova adesivados ensaiados sobre tração. Na Figura 51 é possível ver os corpos de prova utilizados. Neste ensaio houve grandes dificuldades em fixar o corpo de prova na máquina de ensaios, sendo a Figura 51 (B) a primeira tentativa, onde o corpo de prova segue exatamente as medidas estabelecidas na norma ASTM D897.

Devido à forma de fixação, os resultados foram prejudicados, sendo necessário a fabricação de novos corpos de prova, com pequenas adaptações nas medidas, a fim de obter uma melhor fixação na máquina. Estes corpos, após ensaio podem ser vistos na Figura 51 (A).

Tabela 18: Resultados obtidos nos ensaios de tração

Corpos de Prova	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Máxima (MPa)
CP01	29,307	31,869
CP02	37,357	38,906
CP03	36,394	38,154
CP05	32,881	34,175
CP06	36,952	38,074
Média	$34,578 \pm 3,076$	$36,236 \pm 2,739$

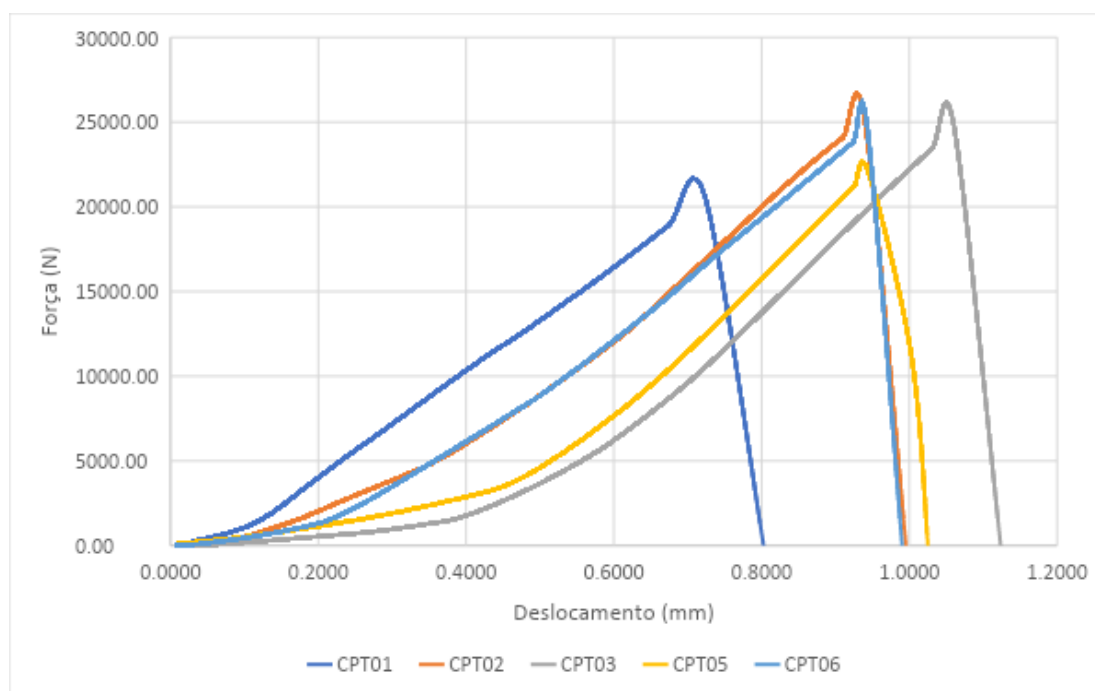
Fonte: do autor, 2022.

Saldanha et. al (2013, p. 95) realizou ensaios de tração com uniões adesivadas compostas por substratos de aço e adesivo de base epóxi, sendo os substratos compostos pelas ligas DIN C60 e DIN St33, já o adesivo é o modelo comercial XNR 6852, produzido pela NAGASE CHEMTEX.

Nestes ensaios os autores encontraram uma resistência máxima a tração de 59,9 MPa.

Mariam et. al (2018, p. 654) realizou ensaios de tração utilizando como substrato a liga de alumínio AA7075, e para o adesivo, o mesmo foi de base epóxi, produzido pela Araldite. Na realização destes experimentos, os autores encontraram o valor de 37,18 MPa como resistência máxima à tração da união adesivada.

Figura 52: Resultados obtidos no ensaio de tração



Fonte: do autor, 2022.

A Figura 52 traz os dados da Tabela 18 compilados em gráficos. Quando submetidas à tração, as uniões apresentam um caráter frágil, conforme pode ser visto na Figura 52. Também é interessante salientar a alta resistência à tração quando comparado à cisalhamento ou arrancamento.

Neste ensaio também foram obtidos o módulo de elasticidade médio e o valor da deformação específica final média, os quais foram, respectivamente, 7890,27 MPa e 0,0071.

4.4 Resultados dos ensaios de fadiga

Figura 53:A) Corpo de prova em ensaio. B) Detalhe da fixação do corpo de prova. C) Obtenção de dados



Fonte: do autor, 2022.

Para a realização dos ensaios de fadiga, os corpos de prova foram divididos em cinco grupos, cada um com cinco corpos, totalizando vinte e cinco experimentos. Para obtenção das cargas utilizadas nos ensaios de fadiga foi realizada a média das cargas de escoamento dos

ensaios por cisalhamento, sendo este valor considerado como a carga de falha por cisalhamento. Esta média resultou em uma carga de 2260 N.

De acordo com a norma ASTM D 3166 as cargas de teste devem iniciar em 10% do valor máximo, ou de falha por cisalhamento, e aumentar até um valor próximo da falha. Desta forma, os cinco grupos foram separados em relação a carga aplicada, as quais constam na Tabela 19.

Na Figura 53 é possível ver o corpo de prova alocado na máquina de ensaio de fadiga.

Tabela 19: Grupos para ensaio e cargas aplicadas

Grupo	Carga Aplicada (N)	Percentual da Carga Máxima
A	226	10%
B	679	30%
C	1132	50%
D	1584	70%
E	2037	90%

Fonte: do autor, 2022.

Conforme consta na Tabela 19, o percentual máximo da carga máxima utilizado foi 90%, essa escolha se deu pelo fato de que valores superiores provavelmente iriam levar à uma falha com um número de ciclos muito baixo. As demais faixas foram distribuídas em intervalos iguais entre o mínimo estabelecido em norma (10%) e o máximo adotado (90%).

Os testes foram realizados até a falha da união, ou então até a marca de 1.000.000 de ciclos, ponto em que foi considerado como tendo vida infinita em fadiga. Os resultados obtidos constam na Tabela 20.

Tabela 20: Resultados dos ensaios de fadiga

Grupo	Corpos de Prova				
	1	2	3	4	5
	Ciclos				
A	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
B	1000000	8438	1000000	1000000	1000000
C	1000000	1000000	1000000	77570	63015
D	-	1000000	1000000	1000000	1000000
E	64034	-	90178	41230	48002

Fonte: do autor, 2022.

Na Tabela 20 há duas células sem valores numéricos. Estes pontos se tratam de valores atípicos, os quais são o corpo de prova 1 do grupo D, o qual apresentou 144 ciclos até a falha, e o corpo de prova 2 do grupo E, o qual apresentou 436 ciclos até a falha. Ambos os corpos destoam bastante dos demais resultados apresentados na Tabela 20, de forma que não caracterizam um padrão de comportamento ou uma resposta lógica, e por ser tratar de apenas dois pontos, estes não alteram o resultado total do estudo, sendo possível desconsiderar ambos.

De acordo com a norma ASTM D 3166 para haver a validação da união adesivada em fadiga não é necessária a formulação de uma curva demonstrando o comportamento de fadiga, a exigência da norma é de que os corpos ensaiados falhem dentro de um intervalo entre 2.000 e 10.000.000 ciclos. Desta forma é possível ver que os corpos de prova ensaiados satisfizeram os requisitos da norma, cumprindo o critério estabelecido na mesma, assim, estando aprovados no teste de fadiga.

4.5 Simulação numérica de ensaio de tração segundo norma D 897-01

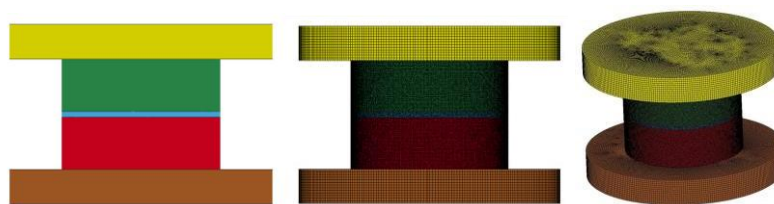
Durante a realização do ensaio de tração, houve dificuldade em fixar o corpo de prova nas garras da máquina de ensaio universal, em função disto, os corpos de prova utilizados, foram confeccionados com diâmetro de 19,05 mm.

Com o objetivo de verificar o ensaio com o corpo de prova com as dimensões estabelecidas pela norma, foi então realizada uma simulação numérica do referido ensaio, utilizando as dimensões de acordo com a norma ASTM D 897-01. A intenção é capturar o efeito da combinação do substrato e adesivo nos valores do módulo de elasticidade, tensão de escoamento e ruptura e deformação específica final. A Figura 19 apresenta a geometria do corpo de prova conforme definido pela norma.

A Figura 54 apresenta uma vista frontal do modelo sólido gerado e da malha. Já na Figura 55 é possível ver o detalhe da malha, com 395186 nós e 581132 elementos.

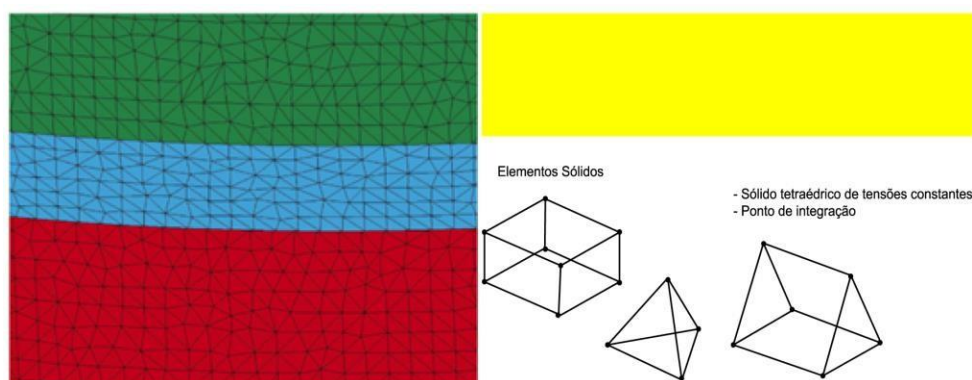
O software utilizado para a análise foi o Ansys Ls-Dyna. O elemento empregado é um sólido tetraédrico de tensões constantes com um ponto de integração (*fully integrated s/r solid*) (*ls-dyna user's guide, 2001*).

Figura 54: Modelo 3D do corpo de prova de tração



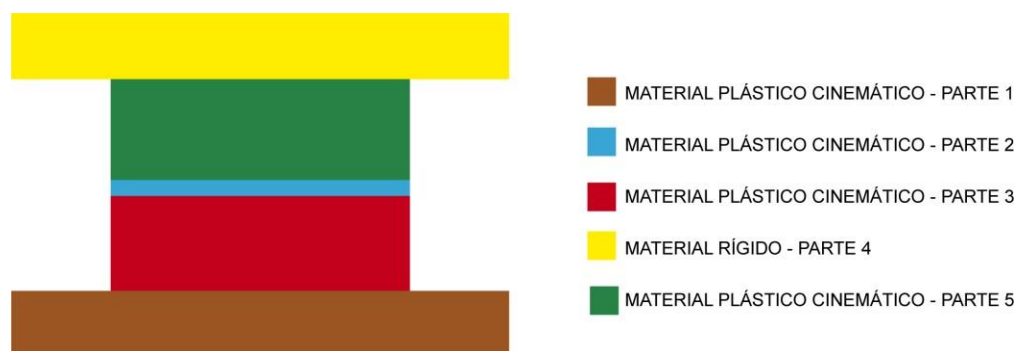
Fonte: do autor, 2022.

Figura 55: Detalhe da malha utilizada para simulação de corpo de prova de tração



Fonte: do autor, 2022.

Figura 56: Materiais utilizados para análise do corpo de prova de tração



Fonte: do autor, 2022.

A Figura 56 apresenta os materiais utilizados para simular as partes sólidas que compõem o modelo.

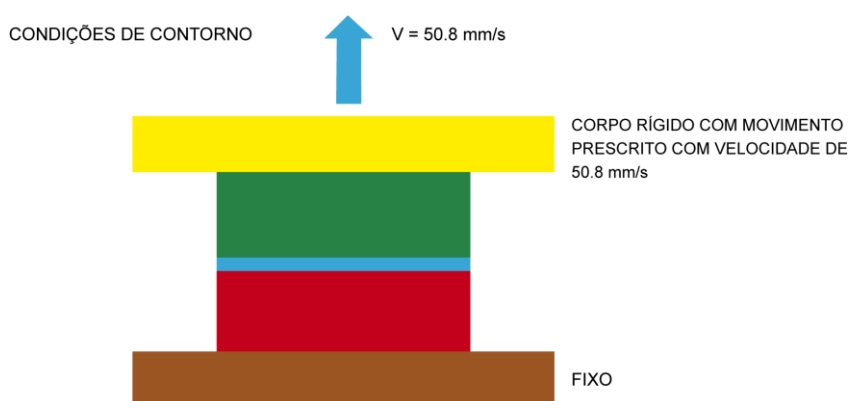
O material plástico cinemático, utilizado nas partes 1, 3 e 5, é o material do substrato, aço, e tem módulo de elasticidade de 210000 MPa, coeficiente de poisson de 0.3, limite de escoamento de 230 MPa, e densidade de $7,8 \cdot 10^{-9}$ kg/mm³. O material plástico cinemático utilizado na parte 2, adesivo, tem módulo de elasticidade de 4000 MPa, limite de escoamento de 33 MPa, densidade de $1,1 \cdot 10^{-9}$ kg/mm³ e deformação específica final de 1%, estes dados estão de acordo com as informações do catálogo do fabricante Sika (2019).

Haghani e Al-Emrani (2021, p. 687) realizaram um estudo com diversos adesivos produzidos pela Sika, visando obter propriedades mecânicas dos mesmos, através deste os autores apontam que o coeficiente de Poisson destes adesivos tem o valor de 0,3, valor que foi adotado nesta simulação e nas demais realizadas na presente dissertação.

A parte 4, modelada como rígida, tem as mesmas propriedades mecânicas das partes 1, 3 e 5, ou seja, do aço.

As condições de contorno são apresentadas na Figura 57.

Figura 57: Condições de contorno para simulação de corpo de prova de tração

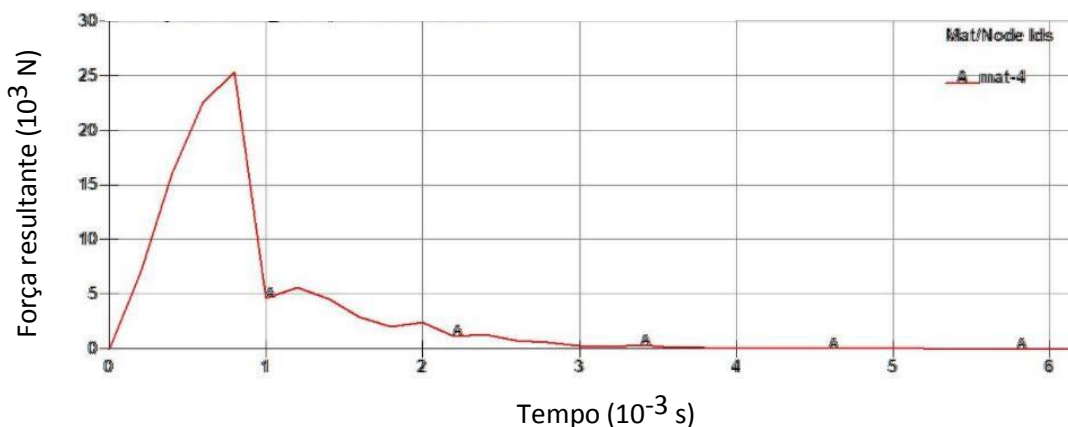


Fonte: do autor, 2022.

A Figura 58 apresenta a deformada do corpo de prova, e mostra a seção de ruptura. É interessante observar que a ruptura ocorre na interface entre o substrato de aço e o adesivo, da mesma forma que ocorre nos modelos ensaiados experimentalmente.

O gráfico apresentado na Figura 58 mostra a força resultante ao longo do tempo durante a realização do ensaio, desde o início de aplicação da carga até a ruptura.

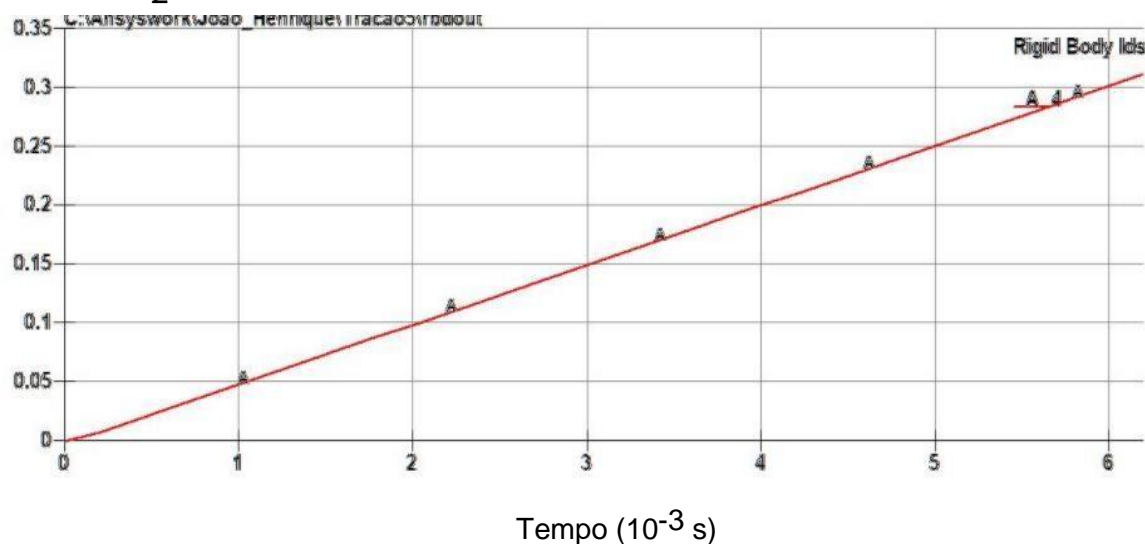
Figura 58: Gráfico força versus tempo para simulação do corpo de prova de tração



Fonte: do autor, 2022.

O gráfico representado na Figura 59 apresenta o deslocamento em função do tempo desde o início e aplicação da carga até a ruptura.

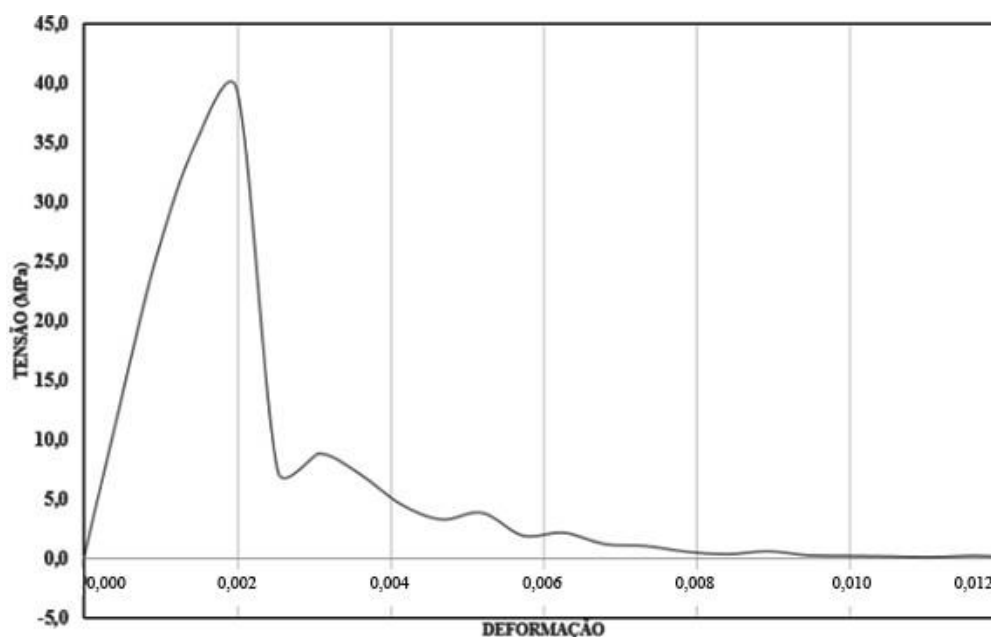
Figura 59: Gráfico de deslocamento versus tempo para simulação do corpo de prova de tração



Fonte: do autor, 2022.

A Figura 60 apresenta o gráfico tensão versus deformação, gerado a partir dos gráficos de força resultante versus tempo, Figura 58, e deslocamento versus tempo, Figura 59.

Figura 60: Gráfico tensão versus deformação para simulação do corpo de prova de tração



Fonte: do autor, 2022.

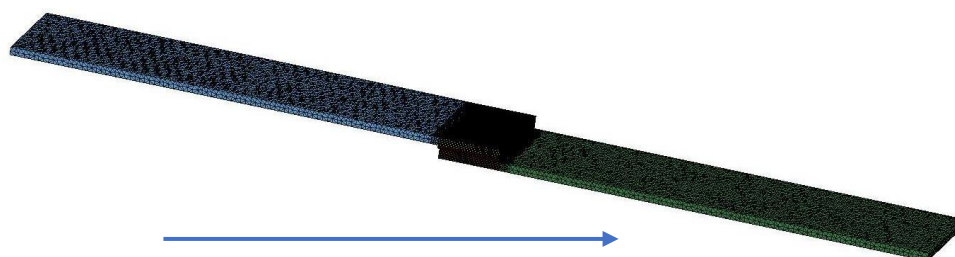
A partir do gráfico gerado, Figura 60, é possível então obter as propriedades mecânicas geradas numericamente, com o corpo de prova com a geometria definida pela norma ASTM D 897-01. Desta forma, o módulo de elasticidade obtido foi de 26622 MPa, a deformação específica final é de aproximadamente 1%, a tensão de escoamento é de 40 MPa e a densidade é $1,4 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m}^3$.

4.6 Simulação numérica de ensaio de cisalhamento segundo norma ASTM D 1002

Com a finalidade de obter uma maior validação dos dados obtidos foi realizada uma simulação numérica do ensaio de cisalhamento, onde foram analisados os corpos de ensaio de acordo com a norma ASTM D 1002, geometria também utilizada para a realização dos ensaios apresentados no capítulo 4.1.

O software utilizado para a análise foi o Ansys LS Dyna. O elemento empregado para criação da malha é um sólido tetraédrico de tensões constantes com um ponto de integração. A Figura 61 traz uma vista do modelo analisado, com a malha utilizada, a qual é composta por 212396 nós e 211429 elementos. O material utilizado para a simulação é o material plástico cinemático para representar o aço e o adesivo, ambos os materiais com as mesmas propriedades utilizadas na simulação do ensaio de tração.

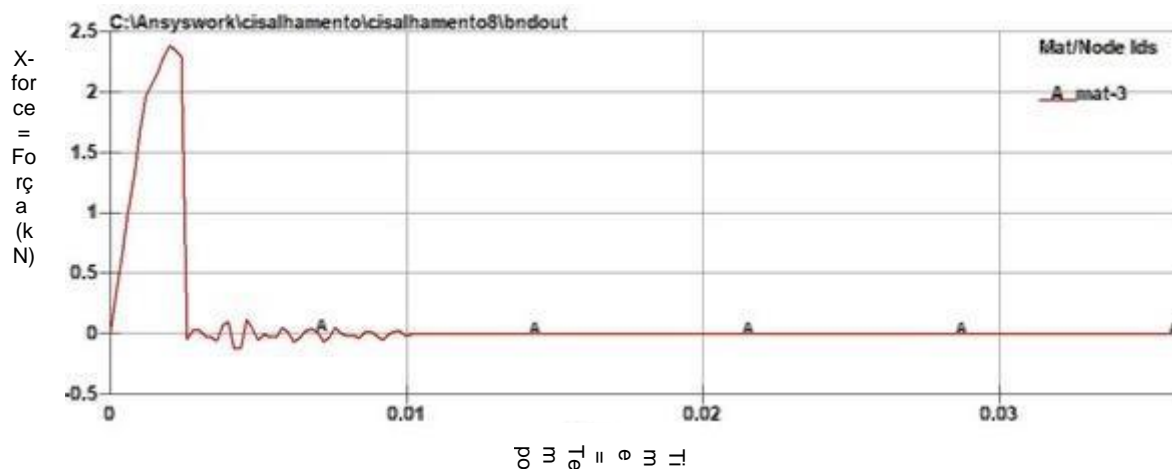
Figura 61: Malha e modelo utilizados para simulação do ensaio de cisalhamento



Fonte: do autor, 2022.

A Figura 62 apresenta a força resultante ao longo do tempo durante a realização da simulação, onde é possível notar uma força máxima próxima a marca de 2500 N, valor dentro dos intervalos encontrados nos ensaios.

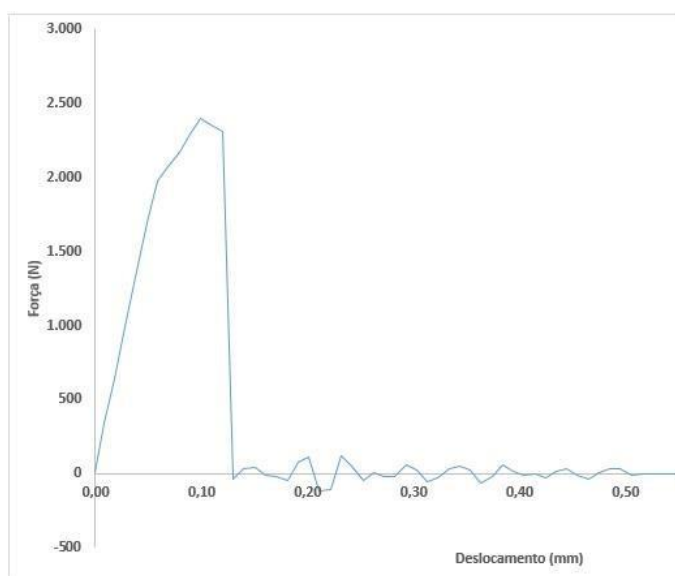
Figura 62: Gráfico força versus tempo para simulação de corpo de prova de cisalhamento



Fonte: do autor, 2022.

A Figura 63 traz a força em função do deslocamento para a simulação do ensaio de cisalhamento.

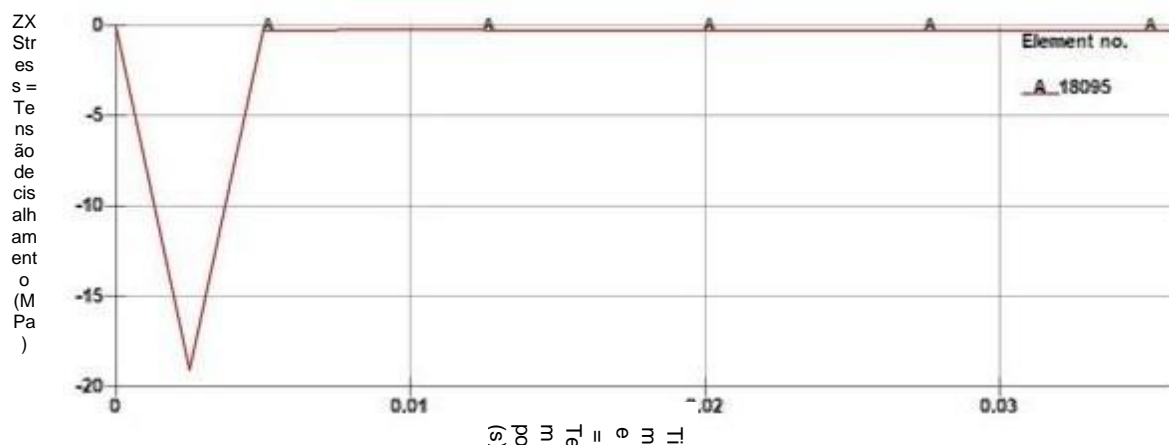
Figura 63: Gráfico força versus deslocamento para simulação de corpo de prova de cisalhamento



Fonte: do autor, 2022.

A diferença observada no deslocamento em relação ao ensaio experimental (Figura 48) se deve ao escorregamento que ocorre nas garras de fixação da máquina de ensaio. Com base nos gráficos apresentados nas Figuras 62 e 63 é possível então gerar um gráfico da tensão em função do tempo, o qual é apresentado na Figura 64.

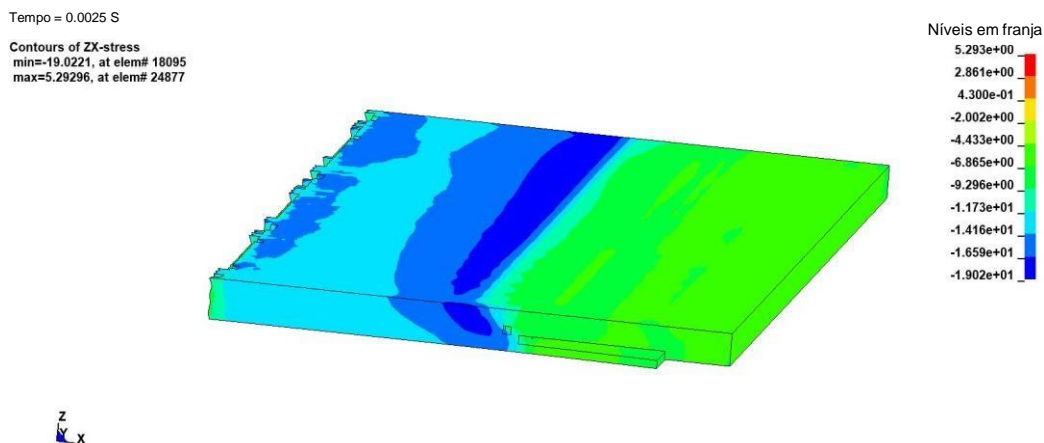
Figura 64: Gráfico tensão de cisalhamento versus tempo para simulação do corpo de prova de cisalhamento



Fonte: do autor, 2022.

A Figura 65 mostra a distribuição de tensão ao longo da camada de adesivo, sendo o valor máximo de tensão de cisalhamento encontrado de 19.02 MPa (cor azul na Figura 65), valor esperado da análise, uma vez que a tensão de escoamento prescrita foi de 33 MPa e o valor esperado utilizando a Teoria da Energia de Distorção é de 19.04 MPa.

Figura 65: Distribuição da tensão ao longo do adesivo do corpo de prova de cisalhamento



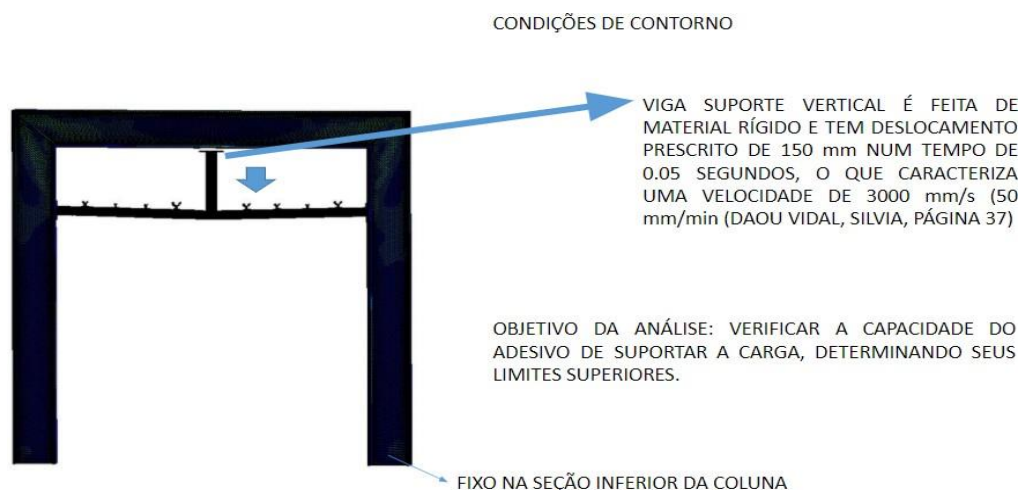
Fonte: do autor, 2022.

Através destes resultados, é possível notar a simulação de cisalhamento também apresentou resultados factíveis com os encontrados nos ensaios experimentais, sendo desta maneira, um complemento a validação do método para a simulação realizada para o ensaio de tração.

4.7 Análise de colapso e carga necessária para a falha

O objetivo da análise apresentada nessa seção é a determinação da tensão atuante no adesivo ao longo do tempo, gerada pelo deslocamento prescrito como condição de contorno na viga vertical central do modelo de pórtico mostrado na Figura 66. Através da obtenção da tensão ao longo do tempo no adesivo, e da força exigida para deformar a viga em seu centro, é possível determinar um gráfico de tensão versus força e verificar a carga máxima que o adesivo suporta antes de atingir a tensão limite de resistência à tração do mesmo. A simulação numérica foi realizada no software Ansys Ls-Dyna.

Figura 66: Condições de contorno para simulação de carga necessária para falha



Fonte: do autor, 2022.

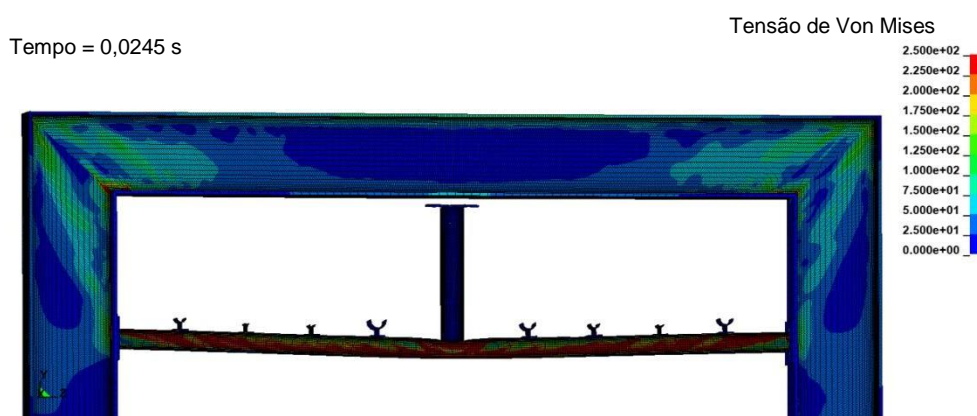
Para este modelo, foi considerado que a viga de suporte vertical é rígida, tendo deslocamento prescrito de 150 mm, em um tempo de 0,05 segundos, o que caracteriza uma velocidade de 3000 mm/s (50 mm/min), esta condição de contorno é trazida por Vidal (2016, p. 37) como pertinente à resistência mecânica de adesivos epóxis, sendo a taxa utilizada, a mais elevada apresentada pelo autor.

A Figura 67 apresenta a malha utilizada. Foram utilizados 267021 nós e 163140 elementos. Os elementos utilizados foram o elemento sólido tetraédrico de tensão constante (fully integrated s/r solid), elemento padrão recomendado pelo ls-dyna (ls-dyna user's guide, 2001) e o elemento de casca do tipo de belytschko-tsay. O adesivo foi modelado como elemento de casca e as estruturas de flange dos perfis e mesa, que tem contato com o adesivo, foram modelados como sólidos.

O material utilizado para o adesivo foi o material plástico cinemático (Is-dyna, 2001) com módulo de elasticidade de 26622 MPa, deformação específica final de 1%, tensão de escoamento de 40 MPa, e densidade de $1,4 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m}^3$. Estas propriedades mecânicas foram as obtidas na simulação numérica do ensaio de tração, apresentadas anteriormente. Também foram realizadas simulações com as propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração experimental, apresentadas na seção 4.3, com módulo de elasticidade de 7890 MPa, tensão de escoamento de 33,9 MPa, densidade de $1,4 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m}^3$ e deformação específica final de 0.71%. Além dessas duas análises, também é realizada a análise utilizando as propriedades fornecidas pelo fabricante do adesivo (Sika) com módulo de elasticidade de 4000 MPa, tensão de escoamento de 33 MPa, densidade de $1,4 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m}^3$ e deformação específica final de 1%.

A Figura 67 apresenta uma vista frontal do pórtico no tempo de 0,0245 s, e mostra as tensões de Von Mises com ponto de corte (range) de 250 MPa. Desta forma a figura não apresenta os picos de tensões que ocorrem em pontos de concentração de tensões.

Figura 67: Tensão de Von Mises com as propriedades do material guiadas pelo modelo numérico

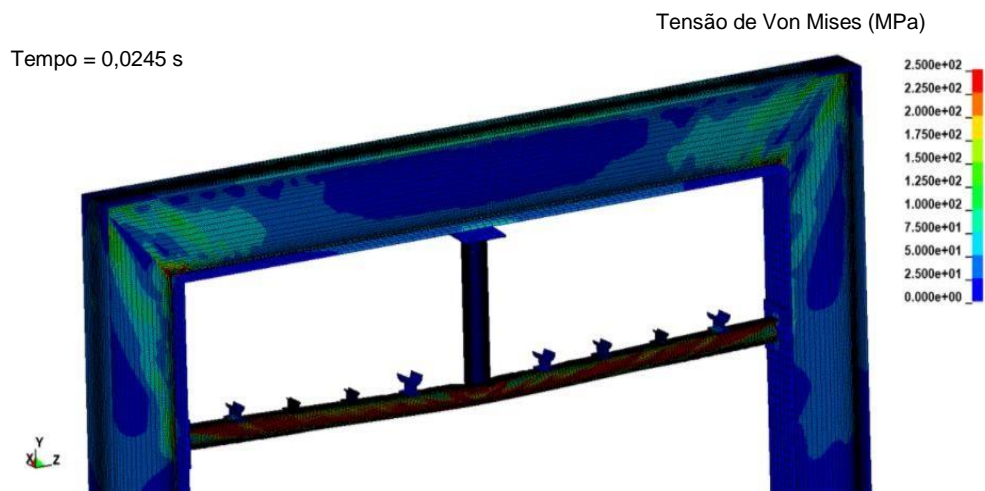


Fonte: do autor, 2022.

Observa-se na Figura 67 o descolamento total do adesivo localizado no suporte superior da estrutura. Este descolamento ocorre devido as tensões atingirem o limite de escoamento de 40 MPa com deformação específica de 1%.

A Figura 68 apresenta o mesmo modelo da Figura 67 em uma vista tridimensional.

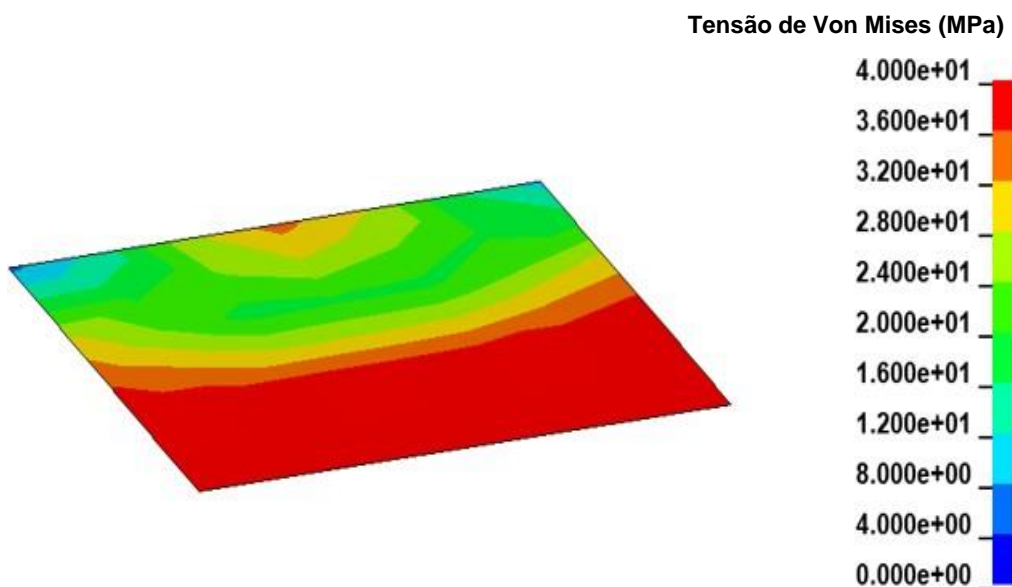
Figura 68: Tensão de Von Mises em vista tridimensional para propriedades obtidas através do modelo numérico



Fonte: do autor, 2022.

A Figura 69 apresenta a tensão de Von Mises desenvolvida no adesivo superior no tempo de 0,035 s.

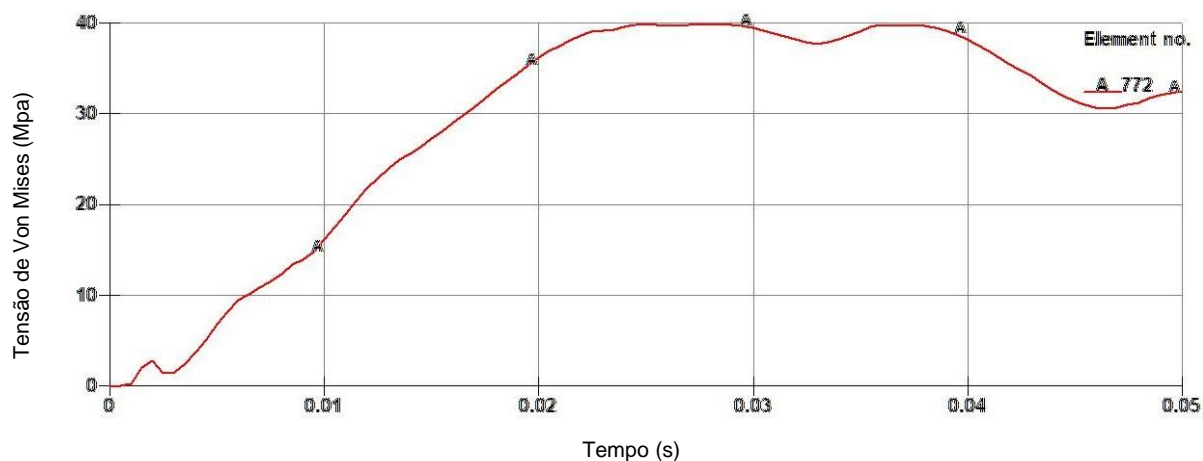
Figura 69: Tensão de Von Mises no adesivo superior com propriedades obtidas através do modelo numérico



Fonte: do autor, 2022.

A Figura 70 apresenta a variação da tensão de Von Mises ao longo do tempo de 0.05 s. Observa-se que a tensão máxima que ocorre durante todo o evento é de 40 MPa, que é a tensão especificada para o material utilizando a curva de tensão deformação obtida no ensaio de tração numérico.

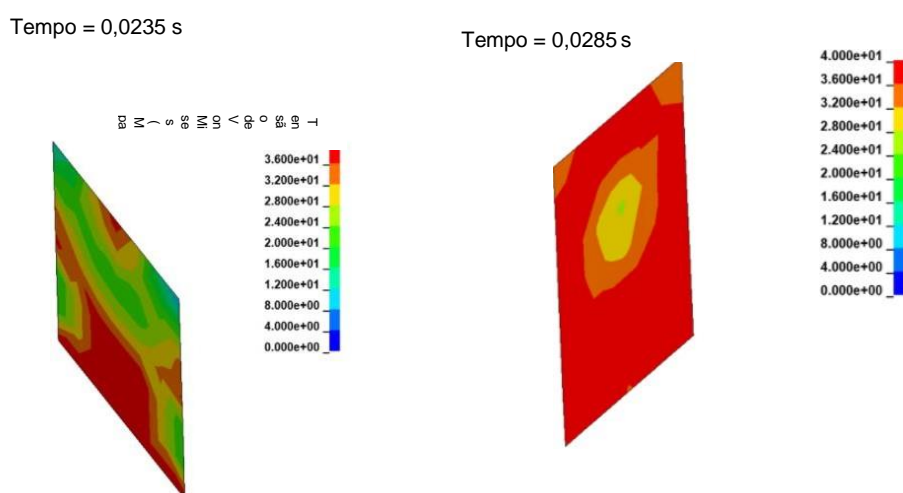
Figura 70: Tensão de Von Mises ao longo do tempo no adesivo central



Fonte: do autor, 2022.

As Figuras 71 e 72 apresentam as tensões de Von Mises no tempo de 0.0285 s para os adesivos do lado direito e esquerdo do pórtico, considerando o material com as propriedades mecânicas obtidas na simulação numérica do ensaio de tração.

Figura 71 e 72: Tensão de Von Mises no adesivo esquerdo com propriedades obtidas através do modelo numérico

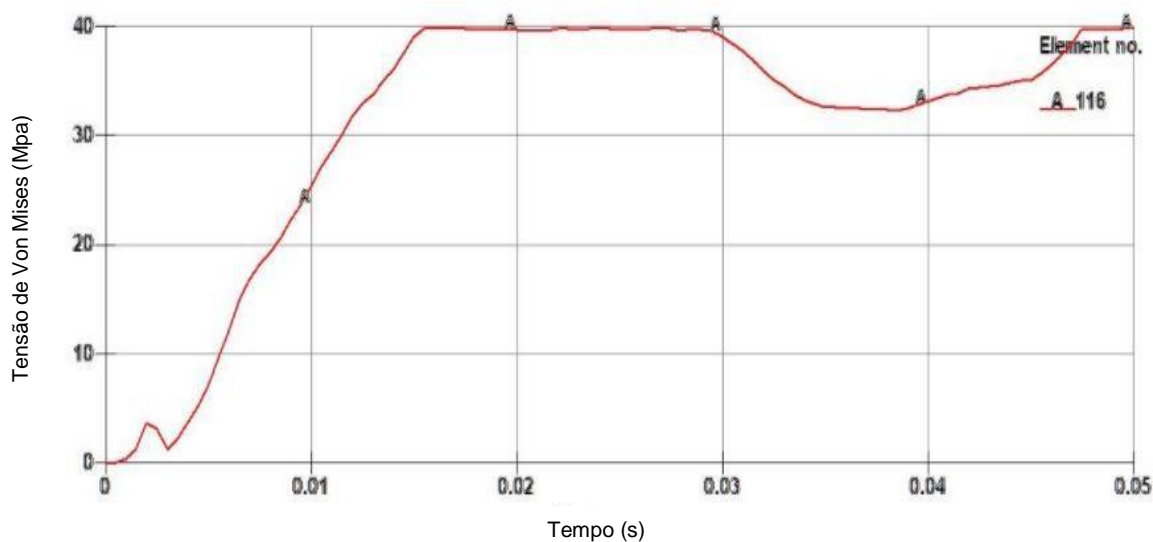


Fonte: do autor, 2022.

As Figuras 73 e 74 apresentam a variação da tensão de Von Mises ao longo do tempo de 0.05 s. Observa-se que a tensão máxima que ocorre durante todo o evento é de 40 MPa, que

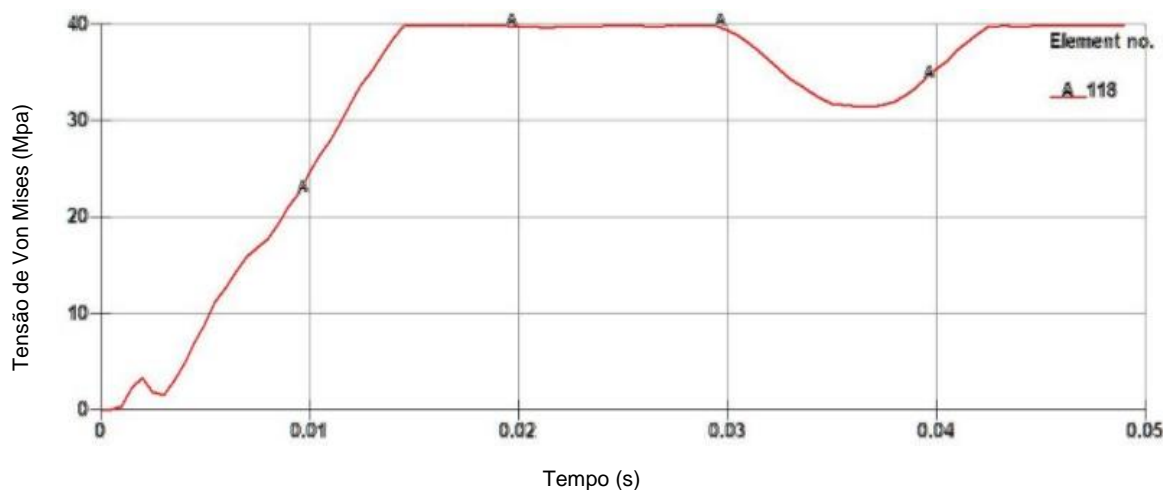
é a tensão especificada para o material utilizando a curva de tensão deformação obtida no ensaio de tração numérico.

Figura 73: Tensão de Von Mises ao longo do tempo no adesivo do lado direito



Fonte: do autor, 2022.

Figura 74: Tensão de Von Mises ao longo do tempo no adesivo do lado esquerdo



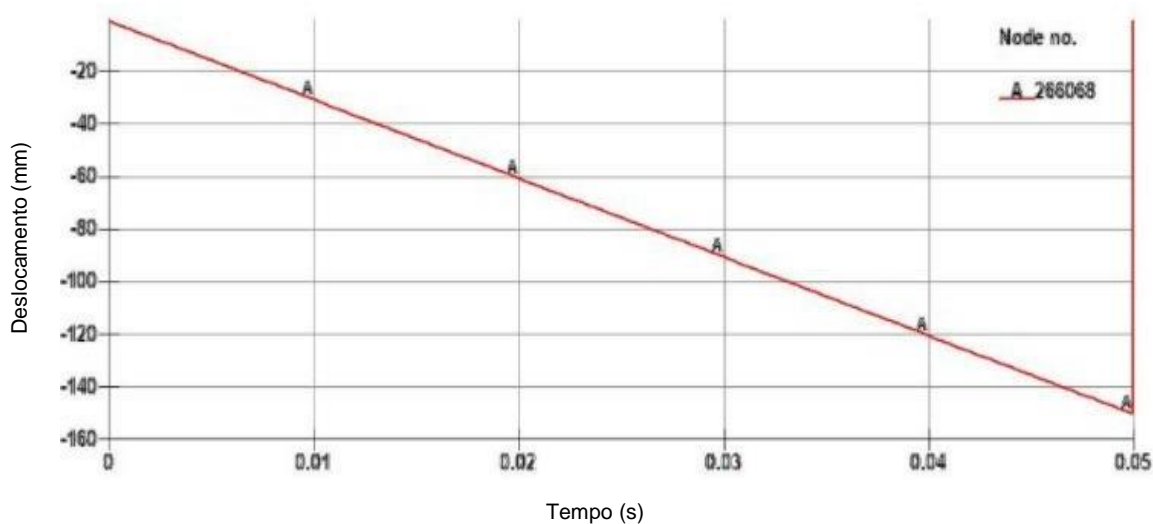
Fonte: do autor, 2022.

Foram realizadas simulações com materiais com as propriedades mecânicas obtidas pelo ensaio experimental e também com as fornecidas pelo fabricante. Como as propriedades são muito próximas, os resultados se repetem, com o mesmo padrão de comportamento para tensões de Von Mises ao longo do tempo. A diferença está na tensão de escoamento e deformação

específica, as quais possuem os valores de 40 MPa e 1% na simulação numérica e 33 MPa e 0,71% no ensaio experimental. Por este motivo, não apresentam se esses resultados.

A Figura 75 apresenta o deslocamento ao longo do tempo de simulação de 0.05 s para o nó central da viga horizontal menor do pórtico.

Figura 75: Deslocamento ao longo do tempo para o nó central da viga horizontal menor do pórtico



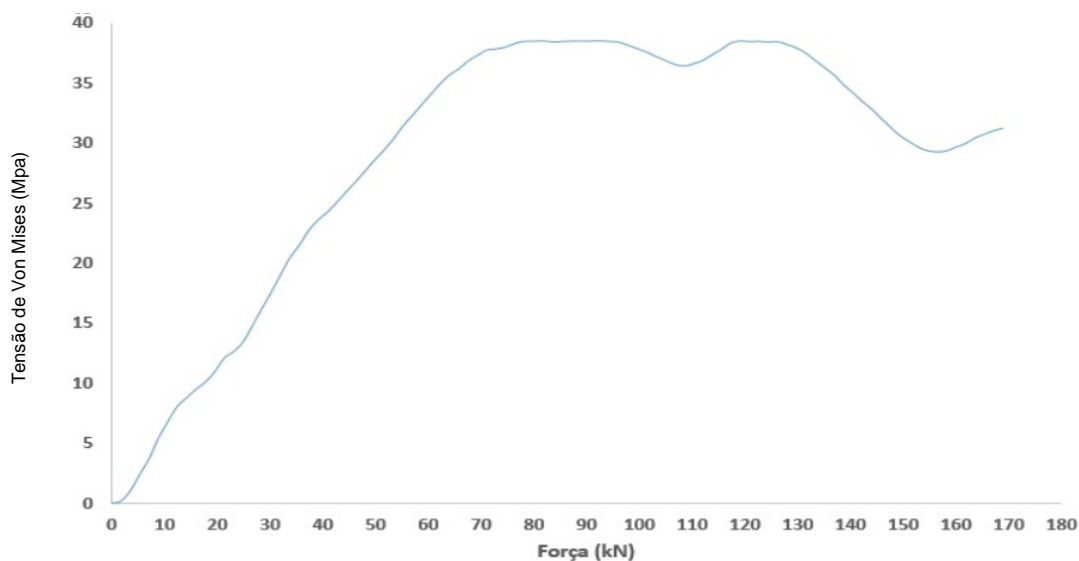
Fonte: do autor, 2022.

A partir das curvas de deformação versus tempo e tensão de Von Mises versus tempo, pode-se obter uma curva de tensão de Von Mises versus força, desconsiderando na plotagem o instante até $4 \cdot 10^{-3}$ s, tempo em que o adesivo central ainda atua, após esse tempo há o rompimento, e a viga comporta-se como biengastada, conforme pode ser visto na Figura 67.

Utilizando a Equação 4 é possível então obter o gráfico tensão versus força que é apresentado na Figura 76.

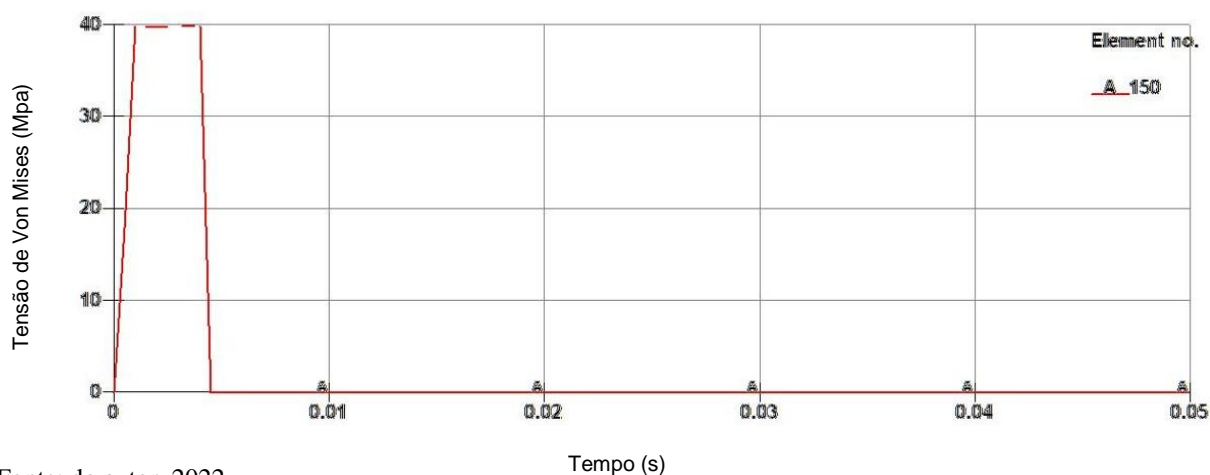
$$F = \frac{Y_{max} 192EI}{l^3} \quad (4)$$

Figura 76: Gráfico tensão de Von Mises versus força



Fonte: do autor, 2022.

Figura 77: Gráfico tensão de Von Mises versus tempo para o adesivo central



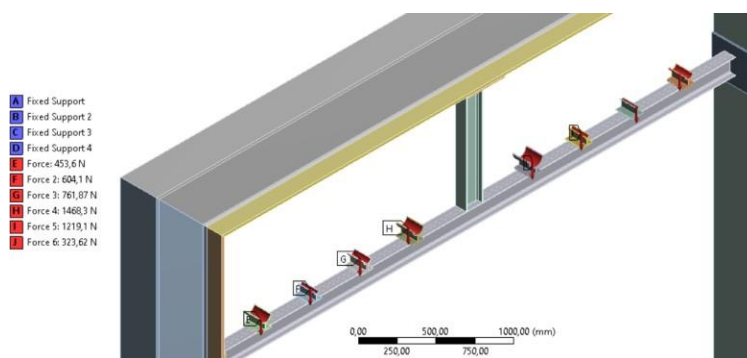
Fonte: do autor, 2022.

Para a Equação 4, o deslocamento máximo (Y_{max}) é considerado como 80 mm, o módulo de elasticidade (E) utilizado é o do aço, com valor de 210 GPa, o momento de inércia (I) da viga é de $6,35 \times 10^6 \text{ mm}^4$ e o comprimento (l) é de 6000 mm. Desta maneira, a Equação 4 irá resultar numa força necessária de 90311,11 N, ou aproximadamente 90 kN para o rompimento das uniões adesivadas, um valor muito alto quando comparado ao carregamento gerado pelos tubos, que foi de aproximadamente 7 kN.

4.8 Resultado do primeiro modelo de simulação

O objetivo da análise apresentada nessa seção é a determinação da tensão atuante no adesivo, ao longo do tempo, gerada pelo carregamento prescrito como condição de contorno na viga horizontal central do modelo de pórtico conforme mostrado na Figura 78 e Tabela 12, com carregamento estático. Através da obtenção da tensão ao longo do tempo no adesivo é possível determinar um gráfico de tensão versus tempo e verificar a tensão máxima que o adesivo suporta sob ação da carga conforme apresentado na Tabela 12. A simulação numérica foi realizada no software Ansys Ls-Dyna. A análise realizada utiliza o mesmo modelo da seção 4.6, também utilizando os mesmos materiais e a mesma malha. A vinculação ocorre na base de ambas as colunas. A análise foi explícita e o tempo de processamento foi de 0.044 s.

Figura 78: Carregamento utilizado na simulação do primeiro modelo



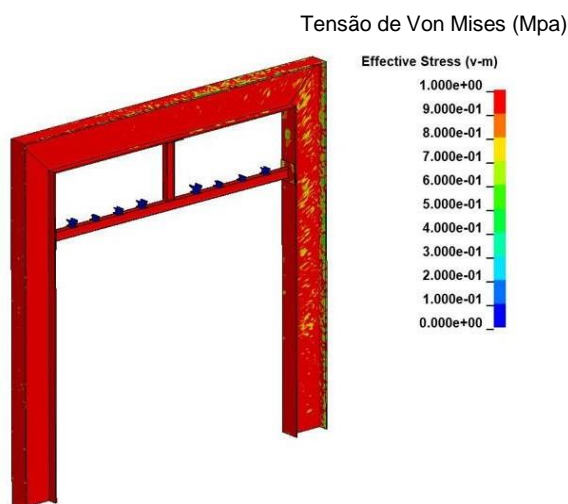
Fonte: do autor, 2022.

Foram utilizados 267021 nós e 163140 elementos. Os elementos utilizados foram os elementos do tipo sólido tetraédrico de tensão constante (fully integrated s/r solid), elemento padrão recomendado pelo Ls-Dyna (ls-dyna user's guide, 2001) e o elemento de casca do tipo belytschko-tsay. O adesivo foi modelado como elemento de casca e as estruturas de flange dos perfis e mesa que tem contato com o adesivo foram modeladas como sólidos.

O material utilizado para o adesivo foi o material plástico cinemático (ls-dyna, 2001) com módulo de elasticidade de 26622 MPa, deformação específica final de 1%, tensão de escoamento 40 MPa e a densidade de $1,4 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m}^3$. Essas propriedades mecânicas são as obtidas na simulação numérica do ensaio de tração, anteriormente apresentada.

A Figura 79 apresenta uma vista tridimensional do pórtico, sob carregamento estático e mostra as tensões de Von Mises com ponto de corte (range) de 1 MPa.

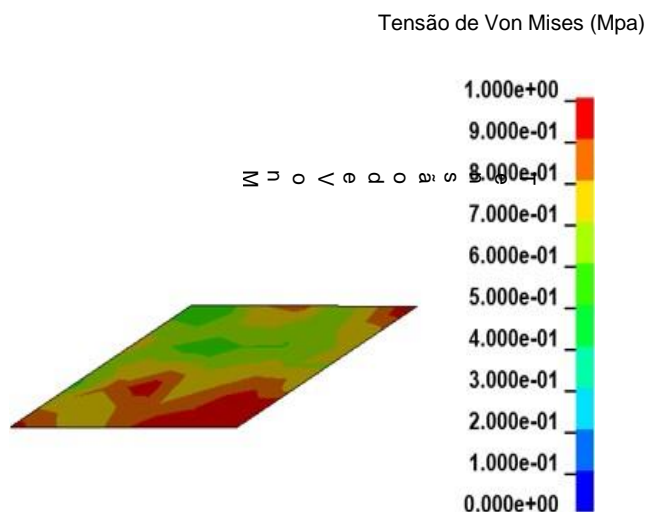
Figura 79: Tensão de Von Mises com ponto de corte em 1 MPa para o primeiro modelo analisado



Fonte: do autor, 2022.

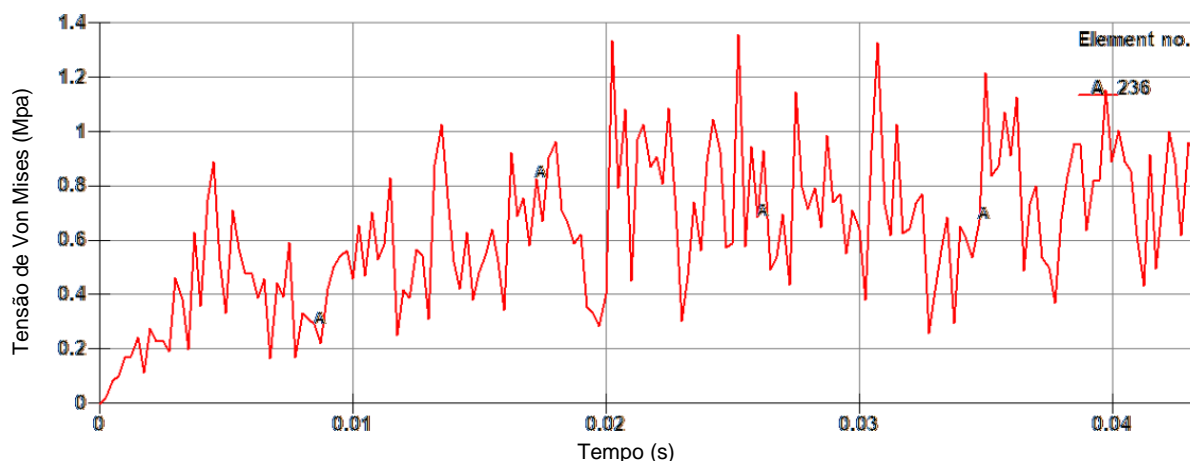
Na Figura 80 é apresentada a tensão de Von Mises desenvolvida no adesivo superior, com ponto de corte de 1 MPa. A Figura 81 apresenta a variação da tensão de Von Mises ao longo do tempo de aplicação da carga. Observa-se na Figura 81 que a tensão de Von Mises aproxima-se do valor máximo de 1,4 MPa para o elemento 236.

Figura 80: Tensões de Von Mises no adesivo superior



Fonte: do autor, 2022.

Figura 81: Variação da Tensão de Von Mises ao longo do tempo de aplicação da carga

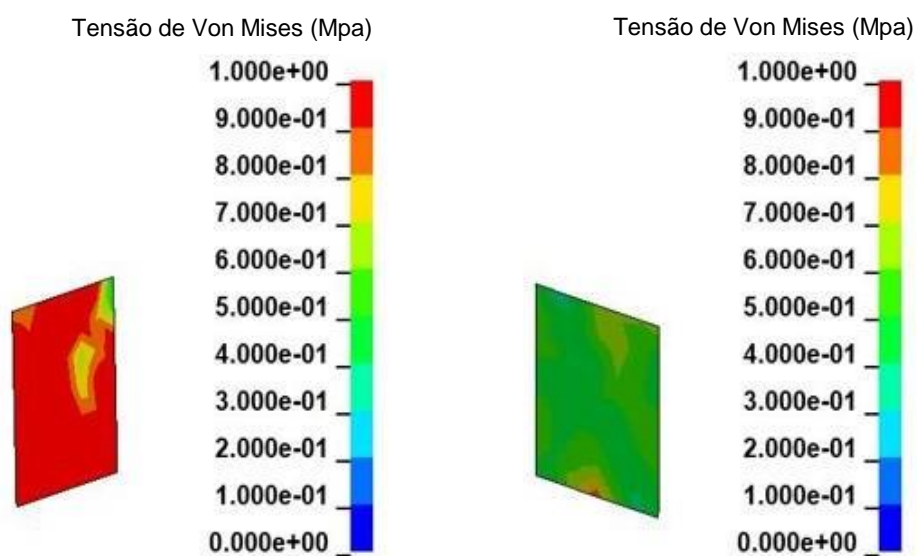


Fonte: do autor, 2022.

O padrão de comportamento da Figura 81 apresenta constantes oscilações, o que de acordo com Meira Junior (p. 64, 2010) é causado devido ao algoritmo de contato, que considera uma distância de tolerância ao detectar penetração de nós ou superfícies. Onde um nó dentro da zona de tolerância é considerado em contato, mesmo que tal fenômeno não aconteça geometricamente. Meira Junior (p. 64, 2010) também aponta que devido ao algoritmo de integração no tempo utilizado pelo software de elementos finitos ser explícito são necessários intervalos de tempo extremamente pequenos para diminuir o efeito de oscilação, onde o intervalo de tempo precisa ser menor do que o tempo necessário para que um sinal atravesse o menor elemento na velocidade do som.

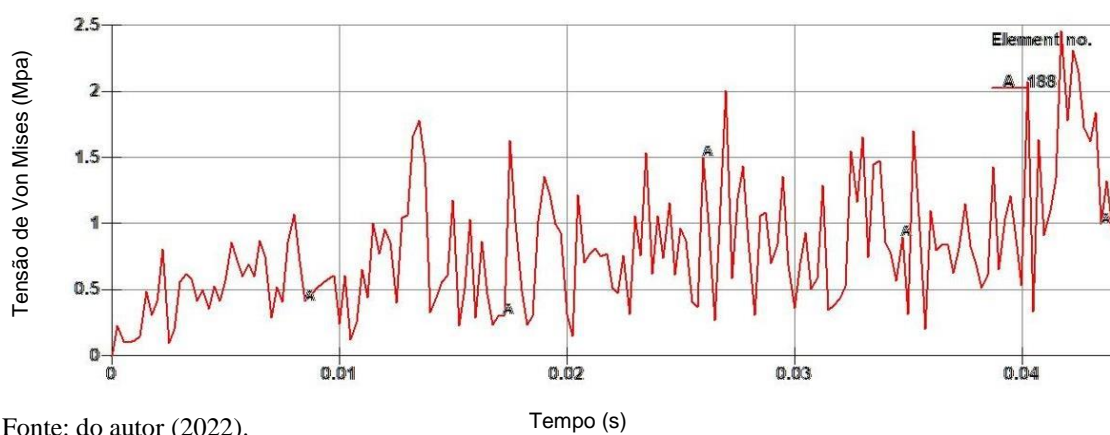
As Figuras 82 e 83 apresentam as tensões de Von Mises no tempo para os adesivos do lado direito e esquerdo do pórtico, considerando o material com as propriedades mecânicas obtidas na simulação numérica do ensaio de tração. As Figuras 84 e 85 apresentam a variação ao longo do tempo da tensão de Von Mises para o lado esquerdo e lado direito. Observa-se na Figura 84, lado esquerdo, que as tensões de Von Mises atingem um limite superior a 2 MPa. Já na Figura 85, lado direito, as tensões atingem um valor limite em torno de 1,5 MPa.

Figura 82 e 83: Tensões de Von Mises no adesivo esquerdo, com ponto de corte de 1 MPa



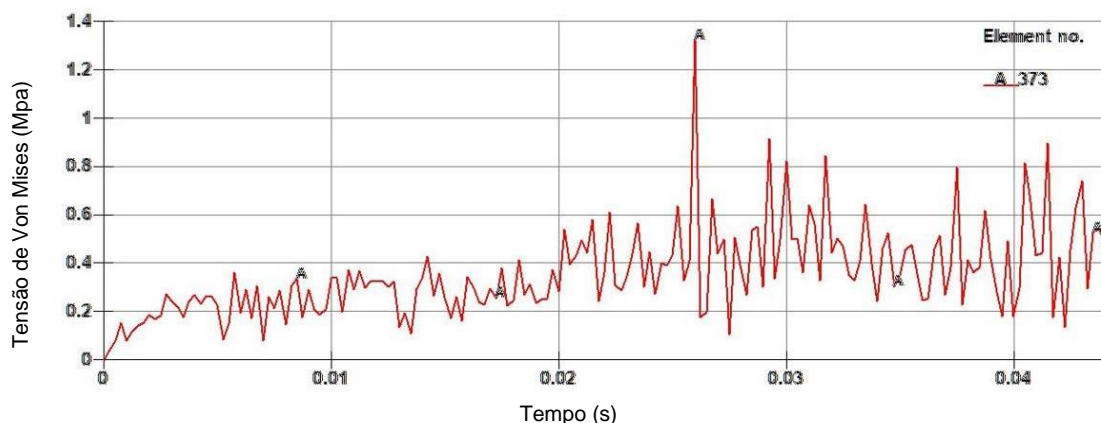
Fonte: do autor, 2022.

Figura 84: Variação da tensão de Von Mises ao longo do tempo para o adesivo do lado esquerdo



Fonte: do autor (2022).

Figura 85: Variação da tensão de Von Mises ao longo do tempo para o adesivo do lado direito



Fonte: do autor (2022).

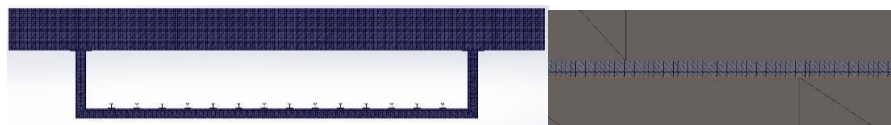
Conclui-se da presente análise que os esforços originados nos adesivos pelo carregamento dos tubos da Tabela 12 apresentam valores de tensão de Von Mises muito baixos quando comparados com os valores da tensão limite de escoamento de 40 MPa, do material do adesivo.

4.9 Resultado do Segundo Modelo de Simulação

O segundo modelo analisado foi simulado, de maneira estática, através do software SolidWorks. As propriedades do adesivo, conforme dito acima, seguem de acordo com as propriedades utilizadas nas simulações anteriores. As cargas aplicadas são demonstradas na Tabela 13, as quais foram as mesmas utilizadas para a avaliação da estrutura.

A malha utilizada é composta por elementos triangulares de primeira ordem, com o tamanho do elemento variando entre 2 e 20 mm, sendo discretizado para 0,3 mm nas regiões do adesivo. Esta malha resultou em 1306682 nós e 735768 elementos. A malha gerada na estrutura, e a região discretizada podem ser vistas na Figura 86.

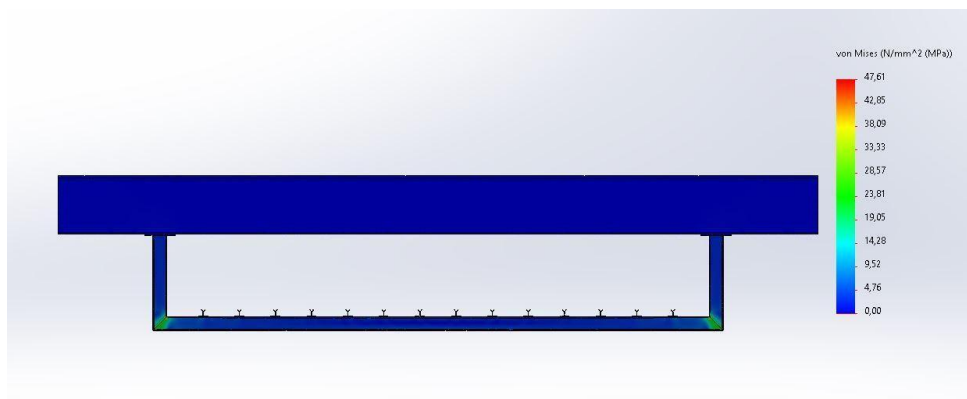
Figura 86: A) Malha gerada na segunda estrutura analisada. B) Malha discretizada na região do adesivo para o segundo modelo analisado



Fonte: do autor, 2022.

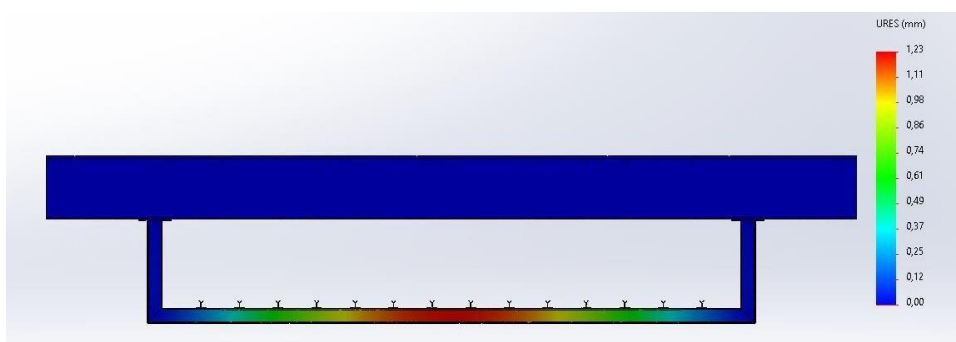
A simulação resultou em uma tensão de Von Mises de 47,61 MPa, porém essa está localizada em um concentrador de tensões, sendo a maior tensão igual a obtida durante a avaliação da estrutura, ou seja, de aproximadamente 17 MPa. Já o deslocamento máximo da estrutura foi de 1,23 mm. Ambos os resultados podem ser vistos nas Figuras 87 e 88.

Figura 87: Tensão de Von Mises calculada no segundo modelo analisado



Fonte: do autor, 2022.

Figura 88: Deslocamento total do segundo modelo analisado

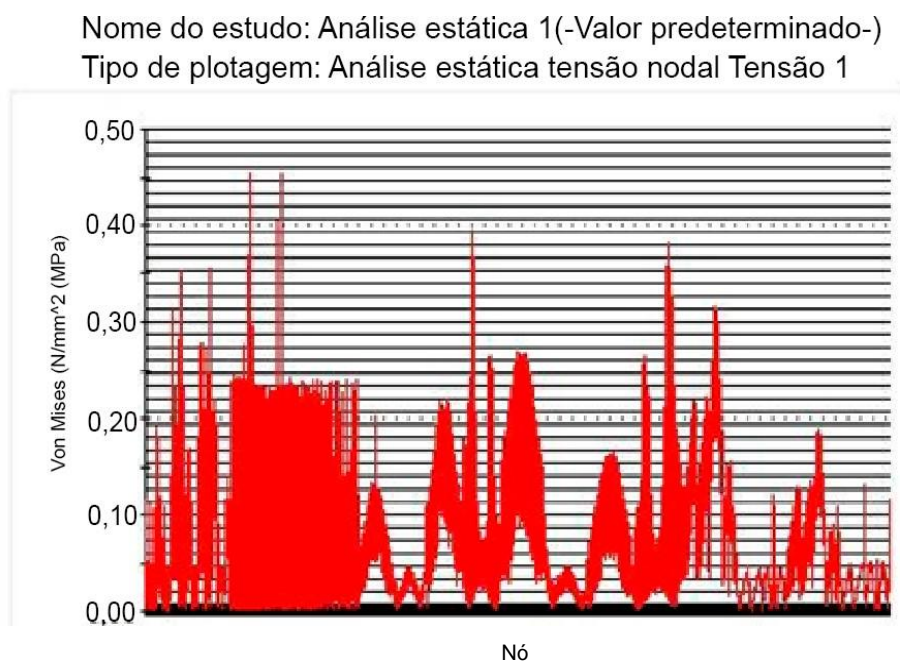


Fonte: do autor, 2022.

Através da ferramenta de sonda, do SolidWorks, foi possível analisar a tensão apenas nos adesivos. Devido à distribuição igual de cargas, ambos os adesivos deste modelo apresentaram tensões iguais, independente dos lados.

A tensão máxima nos adesivos é de 0,45 MPa, na Figura 89 é possível ver a variação da tensão ao longo do adesivo. Essa tensão máxima representa 1,33% do limite de escoamento da união adesivada.

Figura 89: Tensão ao longo dos adesivos no segundo modelo analisado



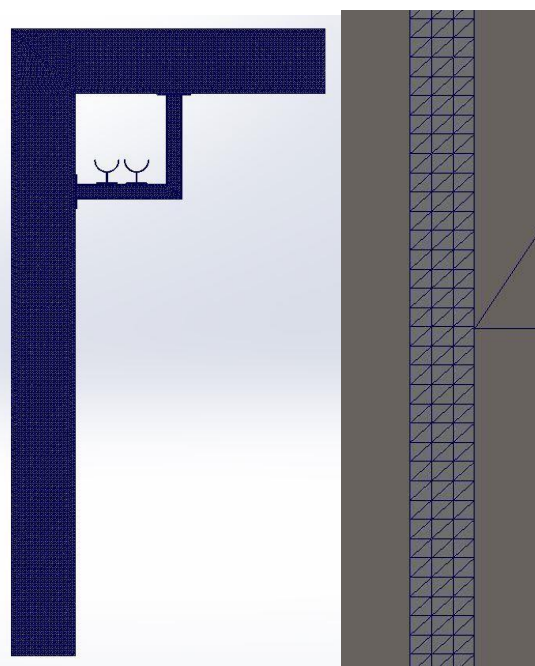
Fonte: do autor, 2022.

4.10 Resultado do Terceiro Modelo de Simulação

O terceiro modelo analisado foi simulado, de maneira estática, através do software SolidWorks. As propriedades do adesivo, conforme dito acima, seguem de acordo com as propriedades utilizadas nas simulações anteriores. As cargas aplicadas são demonstradas na Tabela 14, as quais foram as mesmas utilizadas para a avaliação da estrutura.

A malha utilizada é composta por elementos triangulares de primeira ordem, com o tamanho do elemento variando entre 2 e 20 mm, sendo discretizado para 0,3 mm nas regiões do adesivo. Esta malha resultou em 1155026 nós e 638612 elementos. A malha gerada na estrutura, e a região discretizada podem ser vistas na Figura 90.

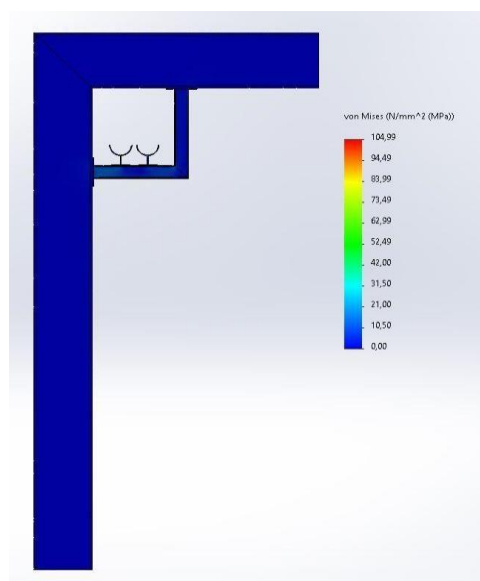
Figura 90: A) Malha gerada na terceira estrutura analisada. B) Malha discretizada na região do adesivo para o terceiro modelo analisado



Fonte: do autor, 2022.

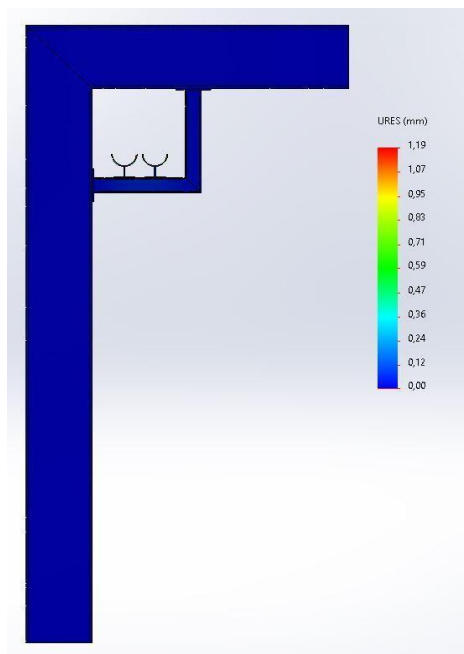
A simulação resultou em uma tensão máxima de Von Mises de 104,99 MPa, porém essa se trata de um concentrador de tensões, localizado nos suportes para tubulação, nos quais foi aplicada a carga, e não na estrutura, a tensão máxima de Von Mises na estrutura foi de aproximadamente 23 MPa. Já o deslocamento máximo da estrutura foi de 1,19 mm. Ambos os resultados podem ser vistos nas Figuras 91 e 92.

Figura 91: Tensão de Von Mises calculada no terceiro modelo analisado



Fonte: do autor, 2022.

Figura 92: Deslocamento total do terceiro modelo analisado

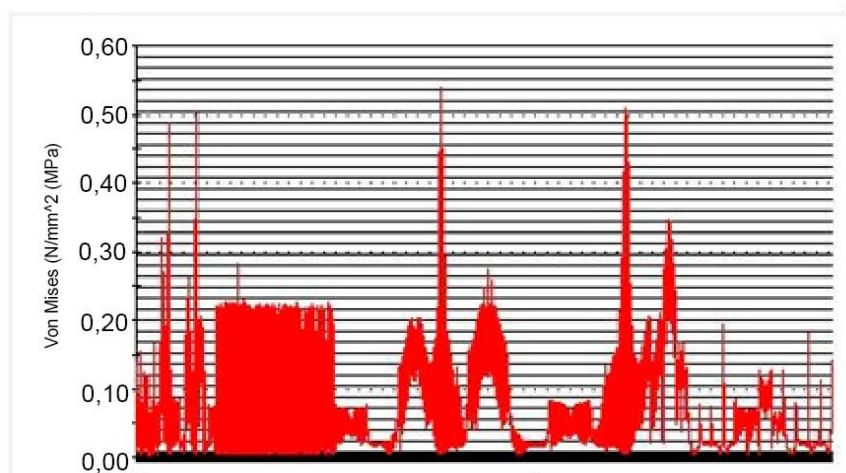


Fonte: do autor, 2022.

Através da ferramenta de sonda, do SolidWorks, foi possível analisar a tensão apenas nos adesivos. A tensão ao longo dos adesivos, superior e lateral, são apresentadas nas Figuras 93 e 94.

Figura 93: Tensão ao longo do adesivo superior no terceiro modelo analisado

Nome do estudo: Análise estática 1(-Valor predeterminado-)
Tipo de plotagem: Análise estática tensão nodal Tensão 1



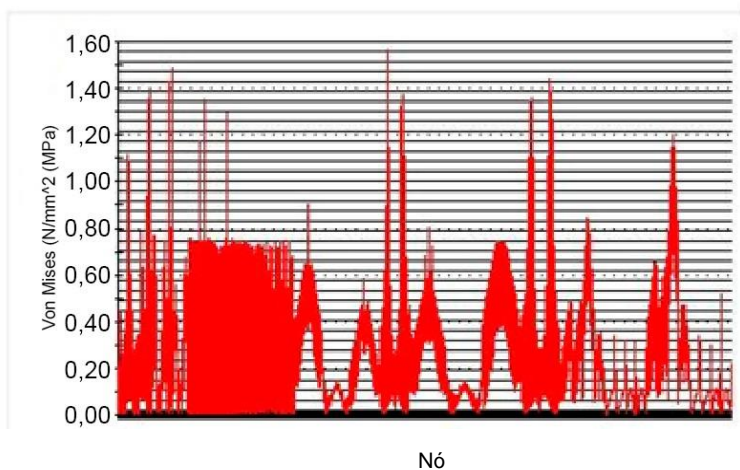
Fonte: do autor, 2022.

Nó

Figura 94: Tensão ao longo do adesivo lateral no terceiro modelo analisado

Nome do estudo: Análise estática 1(-Valor predeterminado-)

Tipo de plotagem: Análise estática tensão nodal Tensão 1



Fonte: do autor, 2022.

Como pode ser visto nas Figuras 93 e 94, as maiores tensões apresentadas foram de, respectivamente, 0,54 e 1,57 MPa. Através das figuras acima citadas, é também possível observar a variação da tensão ao longo do adesivo. As tensões máximas encontradas representam, respectivamente, 1,59% e 4,63% do limite de escoamento da união adesivada.

5 CONCLUSÕES

Foi avaliada a possibilidade de utilização de adesivos estruturais como alternativa à uniões convencionais, para ambientes onde estas não podem ser aplicadas. Para maior entendimento do comportamento destes, foram realizados ensaios em laboratório, a fim de obter as tensões máximas que as uniões podem suportar. Também foram realizadas simulações numéricas, a afim de validar a utilização da união adesivada em uma aplicação real, com cargas geradas em função de tubulações, fluidos e acessórios.

Em relação aos objetivos, pode se afirmar que todos foram alcançados no decorrer da pesquisa. Onde, durante a etapa de revisão bibliográfica é realizado um estudo sobre adesivos estruturais e os esforços que os estes podem suportar. Nesta etapa também é realizado um levantamento bibliográfico sobre os carregamentos em uniões adesivadas e os ensaios necessários para avaliar cada carregamento.

Durante o estágio de materiais e métodos foi selecionado um adesivo estrutural para a aplicação desejada. A partir desta seleção foi possível confeccionar os corpos de prova para ensaio de cisalhamento, tração, arrancamento e fadiga.

Com base nestas etapas, foi possível então realizar as simulações utilizado o método dos elementos finitos, analisando três modelos de aplicação de adesivação estrutural.

As simulações trouxeram tensões baixas no adesivo, de maneira geral, inferiores a 5% do limite de escoamento da união, sendo que no caso do primeiro modelo, onde foi determinada a carga necessária para a falha, a mesma foi calculada em torno de 90 kN, carga bem superior a aplicada.

Com estes resultados, é validada a utilização dos adesivos estruturais como união estrutural para suportes de tubulação, porém a aplicação dos mesmos deve respeitar as limitações do método que são citadas ao longo do trabalho.

Para a execução deste trabalho foi selecionado o modelo Sikadur 32, da fabricante Sika, para este adesivo, os dados apresentados aqui são suficientes para o dimensionamento de uniões adesivadas, podendo se fazer necessário a utilização de simulações numéricas em função da geometria utilizada. Já para fabricantes ou adesivos diferentes, se faz necessária a realização dos ensaios novamente, para maior entendimento da união, e das simulações. Esta necessidade de novos ensaios e simulações se apresenta como um ponto negativo no método, já que se faz necessário um maior trabalho para efetuar a aplicação de adesivos diferentes.

A presente dissertação também resultou em um pedido de patente, depositado juntamente ao INPI, sob o pedido número BR 10 2022 000258 4, pedido este que visa os direitos

intelectual e de exploração econômica sobre a utilização de adesivação estrutural como alternativa à uniões mecânicas convencionais em espaços com atmosfera explosiva. O comprovante de depósito pode ser visto no Anexo II.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com o objetivo de contribuir para futuros estudos nesta linha de pesquisa é importante que se registrem algumas propostas de continuidade para a pesquisa, das quais, é possível citar:

- Realizar um estudo mais aprofundado sobre a vida em fadiga de uniões adesivadas, de forma a melhor prever o comportamento das mesmas ao longo do tempo.
- Realizar um estudo quantitativo sobre a influência da rugosidade em uniões adesivadas, afim de buscar um acabamento superficial ideal para a aplicação do adesivo.
- Realizar um estudo quantitativo sobre a influência da espessura da camada de adesivo, de forma a avaliar a perda de resistência mecânica em função do aumento da espessura.
- Realizar um estudo sobre a área de adesivação, determinando critérios para determinação da mesma e sua influência no nível de tensões gerados na camada adesivada.
- Realizar testes de carga experimental em estruturas em escala real e avaliar o comportamento da união adesivada.
- Realizar estudos experimentais e numéricos do efeito da temperatura do ambiente em estruturas adesivadas.

6 REFERÊNCIAS

ABIQUIM. Disponível em: <https://abiquim.org.br/industriaQuimica>. Acesso em: 12 jul. 2021.

ABIQUIM. **O desempenho da indústria química brasileira**. São Paulo, 2020. 20p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Equipamentos elétricos para atmosferas explosivas - Requisitos gerais**. NBR 9518. Rio de Janeiro, 1997, 23p.

ABNT NBR IEC 60079-10-1. **Atmosferas explosivas Parte10-1: classificação de áreas**. Atmosferas explosivas de gás. 2009. 63p.

ADAMS, R. D.; PEPPIATT, N. A. Stress analysis of adhesive-bonded lap joints. **The Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, 1974, v. 9, p. 185. DOI: 10.1243/03093247V093185.

ALTIDIS, Jaqueline Dias. **Propriedades adesivas de compósitos de matriz epóxi reforçados com pós – metálicos**. Dissertação (Doutorado) – Universidade Federal da Paraíba - PB. 2013. 91p.

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE**. São Paulo: Editora Érica. 2002.

ALVES, José J. N. Overview and experimental verification of models to classify hazardous áreas. **Process Safety and Environmental Protection**, 122, p. 102-117, 2019.

ANTUNES, Adelaide Maria de Souza; GALERA, Paola; RUBINSTEIN, Luis. Prospectiva para a indústria química do Brasil: uma visão para o futuro. **Economia & Tecnologia**, ano 07, v. 26, jul./set. 2011. p. 1-10.

ARAÚJO, Vânia Maria Rodrigues Hermes de. A patente como ferramenta da informação. **Ci. Inf.**, Brasília, v. 10, n. 2, p. 27-32, 1981.

ARENAS, José M.; NARBÓN Julia'n J.; ALÍA, Cristina. Optimum adhesive thickness in structural adhesives joints using statistical techniques based on Weibull distribution. **International Journal of Adhesion & Adhesives**. 30, p. 160-165, 2010.

ASTM - American Society for Testing and Materials. D 1002 - Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal). **Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken**, 1999.

ASTM - American Society for Testing and Materials. D 3166 - Standard Test Method for Fatigue Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading (Metal/Metal). **Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken**, 1999.

ASTM - American Society for Testing and Materials. D 897 - Standard Test Method for Tensile Properties of Adhesive Bonds. **Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken**, 2001.

ASTM International. **Designation: A 36/A 36M – 04**. 2013. 4p.

AUSIELLO, Pietro; APICELLA, Antonio; DAVIDSON, Carel L. Effect of adhesive layer properties on stress distribution in composite restorations – a 3D finite element analysis. **Dental Materials**, v. 18, p. 295-303, 2002.

BJÖRKLUND, Anna; HÖGLIND, Joakim. **Strengthening of steel structures with bonded prestressed laminates**. Chalmers University Of Technology Göteborg, Sweden, 2007.

BOYES, Robert. **Adhesive bonding of stainless steel: strength and durability**. 1998. 246p.

CAMPBELL, F. C. **Manufacturing technology for aerospace structural materials**. Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, New York, Oxford, Paris, San Diego, San Francisco, Singapore, Sydney, Tokyo: Elsevier. 2006. 617p.

COMYN, John. **Adhesion Science**. Letchworth - Inglaterra: The Royal Society of Chemistry. 1997.162p.

COUNTRYMAN, David; BLOMQUIST, Richard F.; GILLESPIE, Robert H. **Adhesives in building construction**. Forest servisse U.S. Department of Agriculture Agriculture Handbook n. 516. 1978. 165p.

DRAKE, Richard M.; WALTER, Robert J. Design of Structural Steel Pipe Racks. **Engineering Journal / fourth quarter**. 2010. 252p.

ESTEVEZ, José Luis Soares. **Estudo do comportamento de adesivos estruturais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Estrutural) - Faculdade de Engenharia - Departamento de Engenharia Mecânica Universidade do Porto. Portugal. 1990. 119p.

ESTEVEZ, Vítor Hugo Carones. **Determinação da tenacidade de um adesivo em solicitações de modo misto (I + II)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Porto - Portugal, 2010.

FERNANDES, Dennis Videira. **Estudo da aderência de barras de aço coladas ao concreto com resina Epoxi**. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Rio de Janeiro - RJ. 2011. 162p.

FLOOR, J. H. J. **Structural adhesive bonded steel-to-steel connections**. An introduction for structural engineering. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia civil e geociências. Holanda: Delft, 2014.

GALVEZ, P. et al. Effect of moisture and temperature on thermal and mechanical properties of structural polyurethane adhesive joints. **Composite Structures**, p 1-13, 2020.

GARCIA, J. A. et a. Characterization and material model definition of toughened adhesives for finite element analysis. **International Journal of Adhesion & Adhesives**. v. 31, p. 182-192, 2011.

GROTTO, André Carlos. **Projeto de um sistema de gancheira tipo transportador aéreo para uso em baús frigoríficos**. Tese (Mestrado profissional em Fabricação) – Universidade de Passo Fundo – UPF. Passo Fundo, 2021.

GUO, L. et al. Effects of loading rate, temperature, and thickness on the tensile strength of precision adhesive joints. **Polymer Testing**, p 1-7, 2022.

JORDÃO, Dácio de Miranda. **Pequeno manual de instalações elétricas em atmosferas potencialmente explosivas**. São Paulo: Blucher, 2018. 24p.

KOPPE, Rafael. **Avaliação do efeito provocado pela presença de furos em uniões metálicas com adesivo acrílico**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processo de Fabricação – Mestrado Profissional) – Universidade de Passo Fundo - Passo Fundo - RS, 2014. 94p.

KOUTROMANOS, Ioannis. **Fundamentals of Finite Element Analysis: Linear Finite Element Analysis**. John Wiley & Sons, Inc., 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, USA. 2018.

KOWATZ, J. et al. Experimental failure analysis of adhesively bonded steel/CRFP joints under quasi-static and cyclic tensile-shear and peel loading. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, p 1-11, 2021.

KUMAR, A. et al. MWCNTs toward superior strength of epoxy adhesive joint on mild steel adherent. **Composites Part B**, p 207-216, 2018.

LIAO, Lijuan; HUANG, Chenguang; SAWA, Toshiyuki. Effect of adhesive thickness, adhesive type and scarf angle on the mechanical properties of scarf adhesive joints. **International Journal of Solids and Structures**, n. 50, p. 4333-4340, 2013.

MAGALHÃES, Ari. **Manual de redação de patentes: um guia prático para uso de leigos e profissionais**. 2. ed. Rio de Janeiro - RJ: Schoba. 2020. 188p.

MARIAM, M. et al. Tensile and fatigue properties of single lap joints of aluminium alloy/glass fibre reinforced composites fabricated with different joining methods. **Composite Structures**, p. 647-658, 2018.

MARQUES, Jeanne Letícia da Silva. **Desenvolvimento de adesivos nanocompósitos de poliuretano à base de óleo de mamona**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS. 2009. 110p.

MEIRA JUNIOR, Agenor Dias. **Avaliação do comportamento da estrutura de ônibus rodoviário solicitado a impacto frontal**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grane do Sul. Porto Alegre, dez. 2010.

MENDES, Carlos Ney Rocha Pessoa. **Contribuição ao desenvolvimento de projeto de carrocerias automotivas utilizando adesivo estrutural para junção de chapas metálicas**. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia Automotiva) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - SP. 2005. 176p.

NAYYAR, Mohindar L. **Piping handbook**. 7. ed. New York San Francisco Washington, D.C. Auckland Bogotá, Caracas, Lisbon, London, Madrid, México, City Milan, Montreal, New Delhi, San Juan, Singapore, Sydney, Tokyo, Toronto: McGraw-Hill. 1999. 2483p.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1055p.

OLIVA, Henrique Nunes Pereira. **Estudo de adesivo epóxi reforçado com nanotubo de carbono e comparação para juntas coladas, rebitadas e híbridas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais - MG. 2016. 136p.

PARISHER, Roy A.; RHAA, Robert A. **Pipe drafting and design**. 2. ed. Boston, Oxford, Auckland, Johannesburg, Melbourne, New Delhi: Gulf Professional Publishing. 2002. 324p.

PENG, L. C.; PENG, Tsen-Loong. **Pipe stress engineering**. Houston, Texas, USA: Asme Press. 2009. 495p.

PETRIE, Edward M. **Hand book of adhesives and sealants**. 2007. 765p.

PIEKARCZYK, M.; GREC, R. Application of adhesive bonding in steel and aluminium. Structures. **Archives Of Civil Engineering**. LVIII, 3, p. 309-329. 2012. DOI: 10.2478/v.10169-012-0018-8.

PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology**. 2. ed. revised and expanded. New York: Marcel Dekker, Inc. 2003. 999p.

PMI - Project Management Institute. **Guia do conhecimento em gerenciamento de projetos**. 6. ed. Pensilvânia: Management Institute. 2017. 763p.

POCIUS, Alphonsus V. **Adhesion and Adhesives Technology**. An Introduction. 3. ed. Cincinnati, - USA: Hanser Publishers. 2012. 388p.

QUINI, Josué Garcia. **Adesivos estruturais uretânicos aplicados a combinações de compósitos, plásticos e metais**. Dissertação (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Autarquia associada a Universidade de São Paulo - SP. 2011. 141p.

RIBEIRO, Filipe Manuel Ferreira. **Estudo da resistência e mecanismos de dano em juntas adesivas entre materiais compósitos com defeitos de adesão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto - Portugal. 2015. 121p.

RODRÍGUEZ, René Quispe et al. Failure criteria for adhesively bonded joints. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, 37, p. 26-36. 2012.

ROSS, Carl T. F. **Finite Element Programs in Structural Engineering & Continuum Mechanics**. Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi: WP. 2011. 637p.

ROSS, Carl T. F. **Finite element programs in structural engineering and continuum mechanics**. Oxford Cambridge Philadelphia New Delhi. 1996.

SALDANHA, D.F.S et al. Mechanical characterization of a high elongation and high toughness epoxy adhesive. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, p. 91-98, 2013.

SANTOS, Demetrio Jackson dos. **Estudo experimental da resistência mecânica de junções adesivas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - SP, 2007. 143p.

SHIGLEY, Joseph IE; MISCHKE, Charles M.; BUDYNAS, Richard G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 960p.

SIKADUR®-32. **Ficha técnica de produto**. Osasco - SP. 2019. 3p.

SILVA, Lucas F. M. et al. Analytical models of adhesively bonded joints – Part I: Literature survey. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, 29, p. 319-330, 2009.

STEWART, I. et al. The cohesive mechanical properties of a toughened epoxy adhesive as a function of cure level. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, p. 277-287, 2007.

SUÁREZ, J. C et al. Case studies in adhesives selection. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 143-144, 219-224, 2003.

SZEWCZAK, I. et al. Influence of Mechanical Properties of Steel and CFRP Tapes on the Effectiveness of Strengthening Thin-Walled Beams. **Materials**, p. 1-14, 2021.

TEIXEIRA, Luís Manuel Barbosa Santos. **Caracterização do comportamento mecânico de juntas de sobreposição simples coladas com adesivos estruturais**. Dissertação (Mestrado em Manutenção Industrial) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial - Porto. 2000. 197p.

TELLES, Pedro Carlos da Silva. **Tubulações industriais: cálculo**. 9. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC, 2001. 178p.

XU, Wei; WEI, Yueguang. Influence of adhesive thickness on local interface fracture and overall strength of metallic adhesive bonding structures. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, 40, p. 158-167, 2013.

ZACHARIAH, Abu Thomas. **Finite Element Modelling of Adhesive Interface between Steel and CFRP**. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden 2006.

ZIENKIEWICZ, C.; TAYLOR, R. L.; FOX, D. D. **The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics**. 7. ed. Amsterdam: Elsevier. 2014. 657p.

ANEXOS

ANEXO I

1 CÁLCULOS MANUAIS

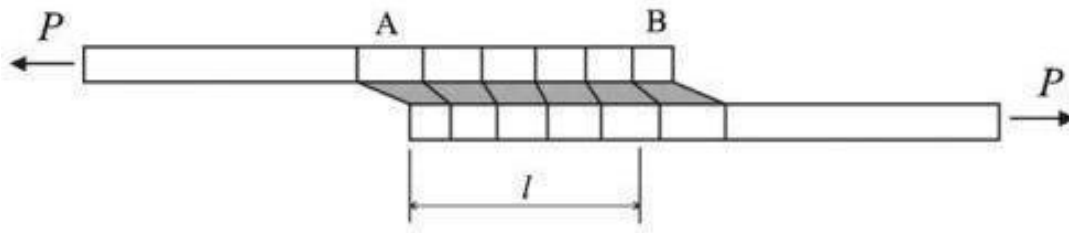
Há diversas metodologias para calcular a resistência mecânica analiticamente, destas, serão analisadas as principais equações encontradas na bibliografia.

1.1 Método Volkersen

Este foi o primeiro modelo de cálculo desenvolvido para dimensionar juntas adesivadas, criado em 1938, por O. Volkersen, com o nome de modelo de cisalhamento defasado, o qual pode ser visto na Figura 95. (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS et al, 2005, p. 475)

Esta teoria considera que o adesivo deforma apenas devido a cargas de cisalhamento, porém os substratos podem deformar também por tração. (SILVA et al, 2009, p. 320)

Figura 95: Cisalhamento defasado proposto por Volkersen



Fonte: Silva et al. (2009, p. 320).

Conforme Silva et al (2009, p. 331) a tensão de cisalhamento através do método de Volkersen pode ser obtida utilizando a Equação 5.

$$r = \frac{P}{bl} \frac{w \cosh(wX)}{2 \sinh(w/2)} + \left(\frac{\psi-1}{\psi+1} \right) \frac{w}{2} \sinh \quad (5)$$

De forma que esta equação será complementada pelas Equações 6, 7, 8 e 9.

$$w^2 = (1 + \psi)\phi \quad (6)$$

$$\psi = \frac{t_t}{t_b} \quad (7)$$

$$\phi = \frac{G_a l^2}{E t t_a} \quad (8)$$

$$X = \frac{x}{l}, \quad -\frac{1}{2} \leq X \leq \frac{1}{2} \quad (9)$$

Onde t_s é a espessura do substrato superior, t_b é a espessura do substrato inferior, E é o módulo de elasticidade do aderente, G_a é módulo de cisalhamento do adesivo, t_a é a espessura do adesivo e l é o comprimento da parte adesivada da união, ou comprimento de sobreposição da junta. A origem da coordenada longitudinal x é o meio da sobreposição.

1.2 Método Goland e Reissner

A aplicação de cargas excêntricas gera um momento fletor e uma força transversal, as quais irão ocasionar uma rotação na junta, alterando a direção do carregamento. Conforme acontece essa rotação, o momento fletor irá diminuir, gerando assim uma não linearidade geométrica, onde o efeito das deflexões dos substratos deve ser contabilizado. (SILVA et al, 2009, p. 321)

Os primeiros a considerarem este efeito foram Goland e Reissner, os quais obtiveram as Equações 10 e 11 para determinar o momento fletor e a força transversal, respectivamente.

$$M = k \frac{Pt}{2} \quad (10)$$

$$V = k' \frac{Pt}{c} \quad (11)$$

Onde t é a espessura dos substratos (considerando que sejam iguais) e c é a metade da sobreposição do adesivo. V é a força transversal, M o momento fletor, P é a carga de tração por unidade de largura aplicada no substrato, k e k' são fatores de correção para o momento fletor e a força transversal, respectivamente, e podem ser determinados pelas seguintes equações. (SILVA et al, 2009, p. 321)

$$k = \frac{\cosh \cosh(u_2 c)}{\cosh \cosh(u_2 c) + 2\sqrt{2} \sinh \sinh(u_2 c)} \quad (12)$$

$$u_2 = \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{2}} \frac{1}{t} \sqrt{\frac{P}{tE}} \quad (13)$$

$$k' = \frac{kc}{t} \sqrt{3(1-\nu^2)} \frac{P}{tE} \quad (14)$$

A ação da força transversal e do momento fletor no modelo de Goland e Reissner pode ser visto na Figura 96.

Figura 96: Atuação da força transversal e momento fletor pelo modelo de Goland e Reissner



Fonte: Rodríguez et al (2012, p. 27).

1.3 Método Hart-Smith

O Método Hart-Smith traz uma solução fechada algébrica para determinação do cisalhamento e para tensão de descascamento, o cisalhamento pode ser determinado pela Equação 15. (SILVA et al. 2009, p. 333)

$$r = A_2 \cosh \cosh(2\lambda'x) + C_2 \quad (15)$$

Onde a origem, x , é o ponto central da união. As demais variáveis podem ser determinadas de acordo com as equações subsequentes.

$$\lambda' = \sqrt{\quad} \quad (16)$$

$$A_2 = \frac{-G_a}{t_a E t} \left(\underline{P} + \frac{6(1-\nu^2)M}{t} \right) \frac{1}{2\lambda' \sinh \sinh(2\lambda'c)} \quad (17)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} \left(\underline{P} - 2 \frac{A_2}{2\lambda'} \sinh \sinh(2\lambda'c) \right) \quad (18)$$

$$M = \underline{P} + \left(\frac{t + t_a}{2} \right) \frac{1}{1 + sc + \left(\frac{\xi 2c 2}{6} \right)} \quad (19)$$

$$\xi = \frac{\underline{P}}{D} \quad (20)$$

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (21)$$

Já a tensão de descascamento pode ser obtida pela Equação 22.

$$\sigma = A \cosh \cosh(\chi x) \cos \cos(\chi x) + B(\chi x)(\chi x) \quad (22)$$

Onde as demais variáveis podem ser encontradas através das equações:

$$\chi^4 = \frac{-E_a}{2Dt_a} \quad (23)$$

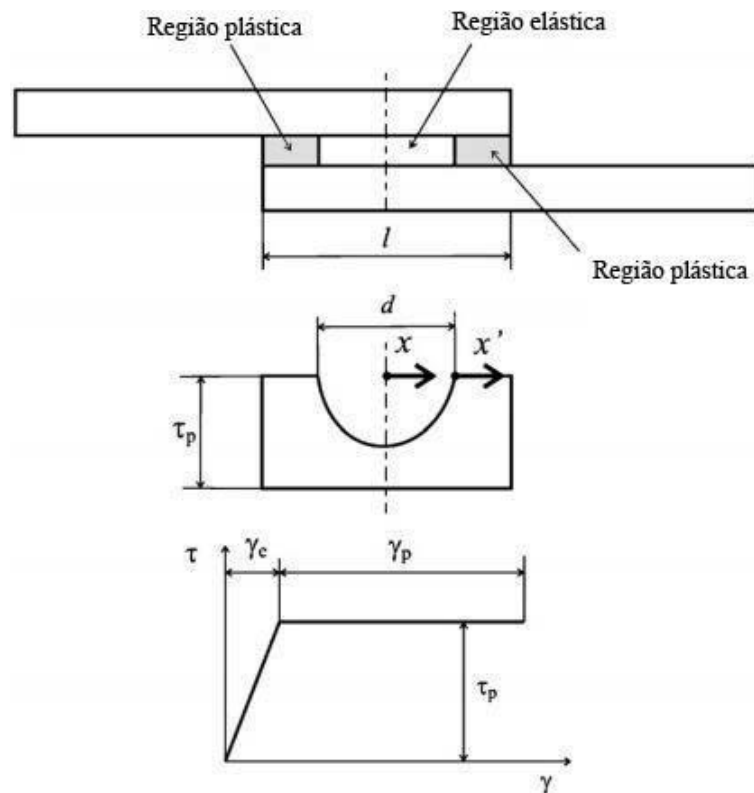
$$A = \frac{-E_a M (\chi c) - \cos \cos(\chi c)}{t_a D \chi^2 e^{\chi c}} \quad (24)$$

$$B = \frac{E_a M((\chi c) - \cos \cos(\chi c))}{t_a D \chi^2 e^{\chi c}} \quad (25)$$

O Método Hart-Smith também idealizou um modelo matemático levando em consideração a plasticidade durante o cisalhamento, mas mantendo o regime elástico sob a tensão de descascamento. Desta maneira a junta adesivada é dividida em três zonas, uma região central, sob deformação elástica, de comprimento d e duas outras regiões, sob deformação plástica. O comprimento total da junta é definido por l , e é considerado, e para uma junta realizada de maneira balanceada é considerado que o comprimento de cada zona sob deformação plástica é $(l-d)/2$. As coordenadas x e x' têm início nestas regiões. (SILVA et al. 2009, p. 334)

A representação deste modelo pode ser vista na Figura 97.

Figura 97: Considerações no modelo não linear proposto por Hart-Smith



Fonte: Silva et al. (2009, p. 334).

Assim, a tensão de cisalhamento é determinada por:

$$r = A_2 \cosh \cosh(2\lambda'x) + r_p(1 - K) \quad (26)$$

E a tensão de cisalhamento na região de regime plástico é determinada por:

$$\gamma = \gamma_e \quad (27)$$

Onde σ_p é a tensão de cisalhamento na região sob deformação plástica A_2 pode ser obtido pela Equação 28:

$$A_2 = \frac{K\sigma_p}{\cosh\cosh(\lambda|d)} \quad (28)$$

De acordo com Silva et al. (2009, p. 334) K e d podem ser obtidos de maneira iterativa, utilizando as Equações 29, 30 e 31.

$$\frac{P}{l\sigma_p}(\lambda l) = 2\lambda' \left(\frac{l-d}{2}\right) + 1(1-K)(\lambda'd) + K \tan h \tan h(\lambda'd) \quad (29)$$

$$\left[1 + 3k(1 - \nu^2) \left(1 + \frac{t_a}{t}\right)\right] \frac{P}{\sigma_p} \lambda^2 \left(\frac{l-d}{2}\right) = 2 \left(\frac{\gamma_p}{\gamma_e}\right) + K \left[2\lambda \left(\frac{l-d}{2}\right)\right]^2 \quad (30)$$

$$2 \left(\frac{\gamma_p}{\gamma_e}\right) = K \left\{ \left[2\lambda \left(\frac{l-d}{2}\right) + \tan h \tan h(\lambda'd)\right]^2 - \tan h^2(\lambda'd) \right\} \quad (31)$$

1.4 Método Adams et al

De acordo com Silva et al (2009, p. 328), o Método Adams et al propôs um modelo de cálculo mais simples que os demais já citados, o qual é baseado no escoamento do substrato e validado com dados experimentais. Este modelo é utilizável em situações onde o substrato não está sob deformação plástica e com adesivos dúcteis, isto é, 10% ou mais de deformação antes da falha. Para adesivos frágeis ou intermediários com substratos sem deformação plástica a análise é mais complexa, sendo sugerido por Silva et al (2009, p. 328) a utilização do método dos elementos finitos.

Assim, a determinação matemática deste método, ainda segundo Silva et al (2009, p. 335) pode se dar por:

$$P_a = \sigma_y b l \quad (32)$$

Onde P_a é o carregamento necessário para a falha da junta adesivada e σ_y é a tensão de escoamento do adesivo. De acordo com Silva et al (2009, p. 335) a tensão no substrato devido a carga aplicada P poder ser determinada por:

$$\sigma_t = \frac{P}{bt} \quad (33)$$

Caso haja flexão, a tensão na superfície interna do substrato devido ao momento fletor M será:

$$\sigma_s = \frac{6M}{bt^2} \quad (34)$$

Onde o momento pode ser obtido pela Equação 35.

$$M = \frac{kPt}{2} \quad (35)$$

A variável k é um fator de flexão devido ao momento, a qual é inversamente proporcional a esta deformação. Silva et al (2009, p. 335) afirma que a tensão atuante no substrato será a soma da tensão (σ_t) com a tensão de flexão. Destarte, o carregamento máximo suportado que causaria apenas escoamento no substrato (P_s) é definido por:

$$P_s = \frac{\sigma_y bt}{1+3k} \quad (36)$$

Onde σ_y é o limite de resistência ao escoamento do substrato. De acordo com Silva et al (2009, p. 335) para pequenos carregamentos e pequenas sobreposições adesivadas, k é aproximadamente 1. De forma que neste caso a Equação 37 pode ser escrita como:

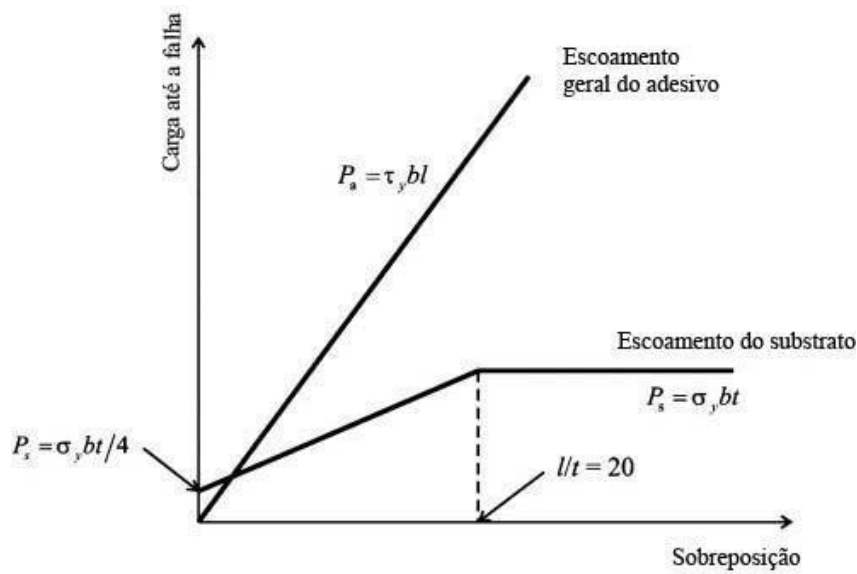
$$P_s = \frac{\sigma_y bt}{4} \quad (37)$$

Porém, ainda de acordo com Silva et al (2009, p. 335), em casos em que a união é longa em relação à espessura do substrato, satisfazendo a relação de $\frac{l}{t} \geq 20$, o valor de k irá diminuir, tendendo à zero, de forma que a Equação 38 poderá ser resumida então à:

$$P_s = \sigma_y bt \quad (38)$$

Desta forma, a utilização do método de Adams et al pode ser resumida na Figura 98.

Figura 98: Metodologia proposta por Adam et al



Fonte: Silva et al (2009, p. 335).

Além das metodologias abordadas de cálculo para resistência mecânica de uma junta adesivadas há diversas outras que também podem ser utilizadas, com destaques para os métodos propostos por Bigwood e Crocombe; Adams e Mallick, Frostig et al.

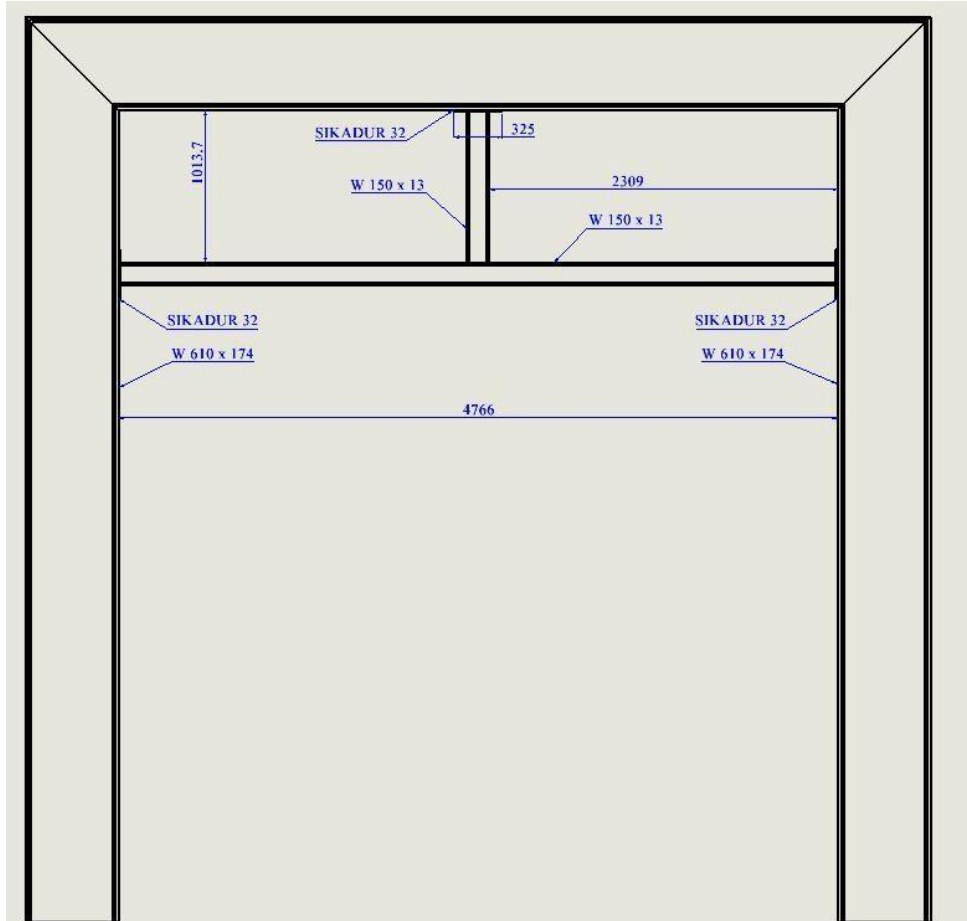
De acordo com Silva et al (2009, p. 340) uniões adesivadas dúcteis e, e sem deformações plásticas são melhor previstas utilizando métodos que considerem apenas o cisalhamento, tendo destaque para a metodologia de Hart-Smith.

Já para uniões com longas sobreposições, adesivos frágeis e deformações permanentes são difíceis de calcular, porém qualquer método linear de cálculo citado trará um resultado conservador, sendo segura sua utilização (SILVA et al. 2009, p. 340).

ANEXO II

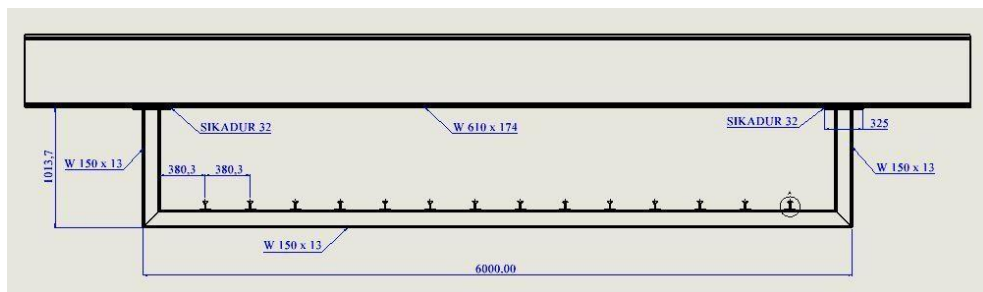
DETALHAMENTO DAS ESTRUTURAS ANALISADAS

Figura 99: Detalhamento da primeira estrutura analisada



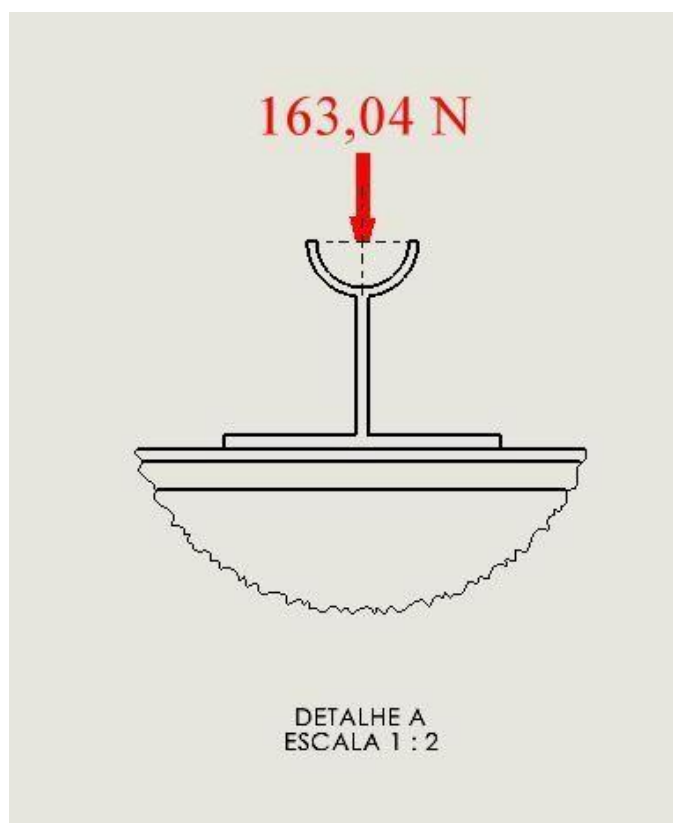
Fonte: do autor, 2022.

Figura 100: Detalhamento da segunda estrutura analisada



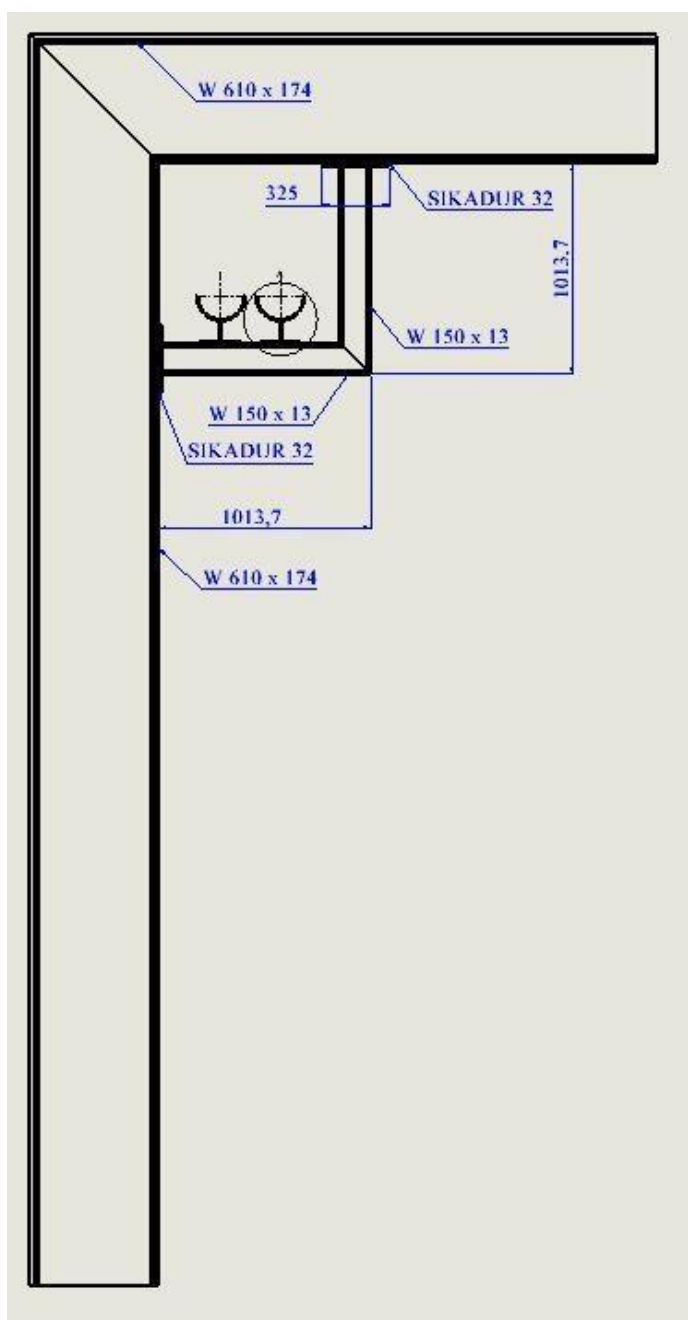
Fonte: do autor, 2022.

Figura 101: Detalhe do suporte de tubulação e da carga aplicada no segundo modelo analisado



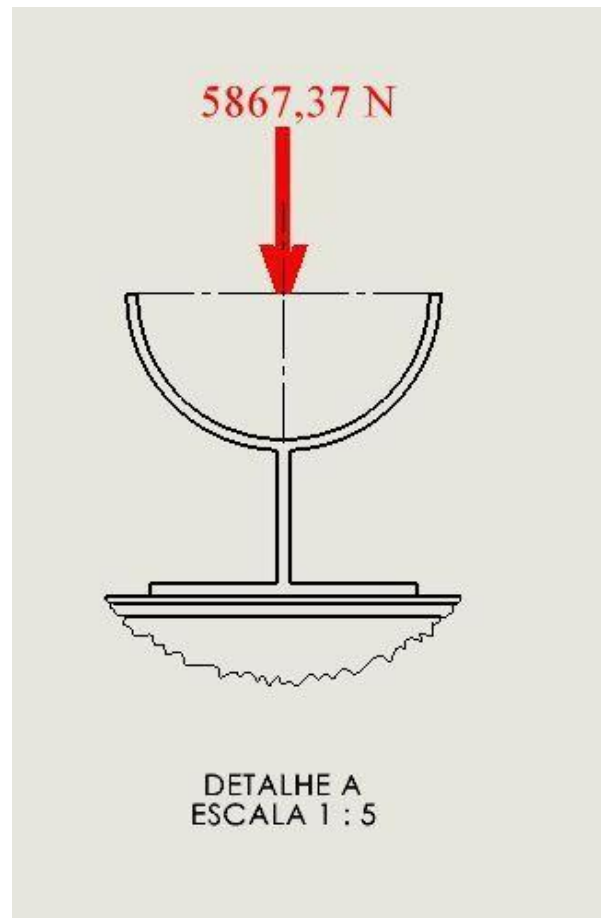
Fonte: do autor, 2022.

Figura 102: Detalhamento da terceira estrutura analisada



Fonte: do autor, 2022.

Figura 103: Detalhe do suporte de tubulação e da carga aplicada no terceiro modelo analisado



Fonte: do autor, 2022.

ANEXO III

UTILIZAÇÃO DE ADESIVOS COMO UNIÃO MECÂNICA EM AMBIENTES
COM RISCO DE EXPLOSÃO

Figura 104: Comprovante de depósito da patente BR 10 2022 000258 4

**Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de
Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT****Número do Processo:** BR 10 2022 000258 4**Dados do Depositante (71)**

Depositante 1 de 1

Nome ou Razão Social: JOÃO HENRIQUE DA SILVA RIBEIRO**Tipo de Pessoa:** Pessoa Física**CPF/CNPJ:** 03474820079**Nacionalidade:** Brasileira**Qualificação Física:** Engenheiro, arquiteto e afins**Endereço:** Rua Conde de Mesquita, 57, Apto 01**Cidade:** Blumenau**Estado:** SC**CEP:** 89057231**País:** Brasil**Telefone:****Fax:****Email:** ribeiro95joao@gmail.com

Fonte: Autor, 2022.

RESUMO

Utilização de adesivos como união mecânica em ambientes com risco de explosão

Utilização de adesivos estruturais, de qualquer base química, como elementos de união entre elementos estruturais em unidades industriais com atmosfera explosiva, sendo uma alternativa ao emprego de métodos convencionais, como soldagem, parafusação e demais.

RELATÓRIO DESCRITIVO

Utilização de adesivos como união mecânica em ambientes com risco de explosão

Campo técnico

[001] O presente relatório de invenção se refere à utilização de adesivos estruturais, independentes da família química à qual pertençam, como membros de uniões estruturais para suportes de tubulação em ambientes industriais com características explosivas, englobando, mas não restrito à refinarias de petróleo, unidades de extração de óleo de soja, unidades de transesterificação de biodiesel e demais ambientes classificados. Sendo que a utilização destes adesivos poderá ser empregada, mas não limitada a ligas de aço, ferro fundido, concreto, alvenaria e demais materiais.

Estado da arte

[002] A norma IEC 60079-10-1 define como atmosfera explosiva aquela que envolve uma mistura de substâncias inflamáveis (na forma de gás, vapor, névoa, poeira ou fibra) com o ar em condições atmosféricas, onde a combustão se propaga através da mistura após a ignição. Nestas áreas, encontradas em diversas instalações, cuidados especiais devem ser tomados para construção, instalação e utilização de equipamentos elétricos, tendo em vista que superaquecimentos e faíscas podem gerar explosões. Nestas áreas todos os equipamentos elétricos instalados devem ser projetados especificamente para essa aplicação, seguindo as normas vigentes, sendo que no Brasil a principal norma para essa aplicação é a NBR 9518. Também é importante salientar que todas as ferramentas elétricas utilizadas neste ambiente devem respeitar a classificação própria do ambiente. Também devido ao alto risco do ambiente, processos como de soldagem, onde há uma fonte de ignição direta, não são permissíveis de serem executados nestes locais.

[003] Adesivos estruturais são substâncias, compostas de diversas famílias químicas, com a finalidade de unir dois substratos (corpos), que podem ser compostos por quaisquer materiais. Vale ressaltar que estes já são empregados

há vários anos na construção mecânica, tendo destaque o grande campo de atuação no qual são empregados, podendo citar a indústria aeronáutica, automobilística, construção civil, e várias outras.

[004] A aplicação de adesivos estruturais pode eliminar a necessidade de realização do processo de soldagem, ou a perfuração de materiais, com finalidade de utilizar fixadores convencionais, como parafusos. Essa característica permite que este método de construção seja empregado em ambientes com atmosfera explosiva, tendo em vista que não há produção de faíscas ou uma fonte de energia significativa no processo que poderia desencadear uma explosão.

Discussão

[005] A alteração em layouts fabris com atmosferas explosivas é feita, atualmente, durante um curto período no ano, onde toda a unidade é parada, e as substâncias químicas responsáveis pela criação da atmosfera são removidas fisicamente ou quimicamente. Estas paradas produtivas para alterações costumam ocorrer em caráter anual, de forma que as alterações só podem ser realizadas durante um curto período de tempo no ano.

[006] Isso ocorre pois neste mercado só há a utilização de processos convencionais, como soldagem ou furação, utilizando ferramentas elétricas, processos os quais não podem ser realizados nestas atmosferas.

[007] A metodologia atual de trabalho traz muitos pontos negativos, como o curto período para realizar as alterações, e a breve janela de tempo para isso, o que faz com que diversas alterações fabris precisem esperar vários meses, ou anos, para serem realizadas.

[008] Desta forma, a utilização de adesivos estruturais visa permitir que estruturas pré-fabricadas possam ser montadas dentro destes ambientes sem a necessidade de nenhuma parada produtiva ou remoção de substâncias necessárias ao processo produtivo.

[009] A aplicação destes adesivos pode ser destinar à fixação de estruturas novas à estruturas existentes, ou ainda entre ambas estruturas novas, podendo estas ser em aço, ferro fundido, concreto, alvenaria ou qualquer outro material

empregado. A utilização deste adesivo também não produz nenhuma fonte de ignição, tendo em vista que a mesma não necessita de equipamentos elétricos, como o processo de furação, e não produz quantidade significativa de energia térmica, ou faíscas, como o processo de soldagem.

Relação das figuras

[010] Para um maior entendimento dos leitores, esta patente de invenção traz desenhos representativos da aplicação de adesivos estruturais como elementos de fixação.

[011] As figuras apresentadas ilustram melhor como pode ser a aplicação de adesivos estruturais em ambientes explosivos, porém, esta aplicação não fica limitada apenas às utilizações vistas nas figuras. Também é salientado que as figuras são meramente ilustrativas, trazendo a ideia da utilização e não um projeto ou modelo fixo.

[012] Desta forma as figuras 1, 2 e 3 ilustram suportes de tubulação caracterizados por estruturas metálicas novas que foram adesivados em estruturas de aço já existentes.

[013] A figura 4 traz um exemplo de aplicação de adesivo, porém este não é o único modo de aplicação, sendo aliás, uma configuração entre várias possíveis. Esta figura tem apenas a finalidade de melhor exemplificar como o adesivo ficaria aplicado em relação ao substrato (material de base).

Descrição

[014] A utilização de adesivos estruturais em ambientes com risco de explosão pode substituir meios convencionais de uniões estruturais, como uniões parafusadas, soldadas, rebitadas, entre outras.

[015] Este tipo de ambiente é muito comum em plantas químicas como plantas de extração de óleo de soja, refinarias de petróleo, unidades de transesterificação de biodiesel, entre outras.

[016] Essa utilização pode ser feita em uma união projetada especificamente para ser adesivada, ou não. Sendo que desta forma os adesivos estruturais se caracterizam como uma alternativa à união estrutural nestes ambientes.

[017] A aplicação da adesivação estrutural, como espessura da camada empregada, cálculos estruturais, ou mesmo o tipo do adesivo não são abordados neste documento, pois a reivindicação se dá pela utilização de adesivos estruturais, num âmbito geral, como solução ao emprego de uniões convencionais em ambientes onde estes não poderiam ser utilizados. Independente da tecnologia adesiva empregada, o objetivo para esta utilização será o mesmo: realizar de forma mais rápida trabalhos que necessitariam de uma parada fabril para execução devido a impossibilidade de empregar métodos convencionais.

REIVINDICAÇÃO

1. Utilização de adesivos estruturais em ambientes com risco de explosão, como alternativa a uniões convencionais, **caracterizado por** unir as estruturas em aço, ferro fundido, concreto, e demais materiais que possam a ser utilizados. Estas uniões podem ter caráter estrutural, ou não, sendo independente o uso da estrutura adesivada. De forma que faz parte do escopo desta patente a utilização de uniões adesivadas como solução para união de elementos em ambientes onde há limitações para utilização de outras formas, sejam convencionais ou não, de união mecânica. O adesivo estrutural empregado pode ser de qualquer base ou família química, bem como de qualquer tipo, tendo em vista que a reivindicação é da utilização da adesivação estrutural como solução para um problema, e não de um produto específico.

FIG. 1

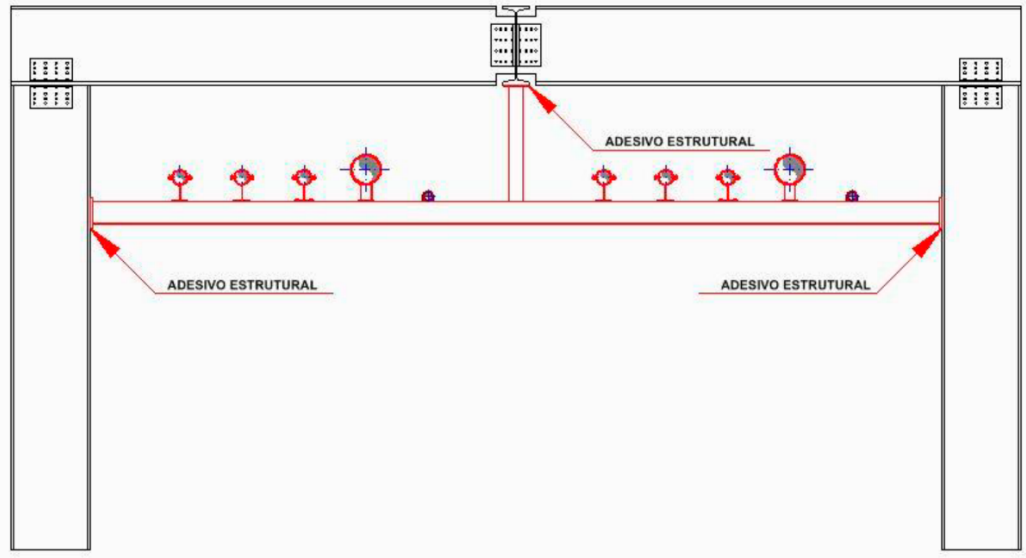


FIG. 2

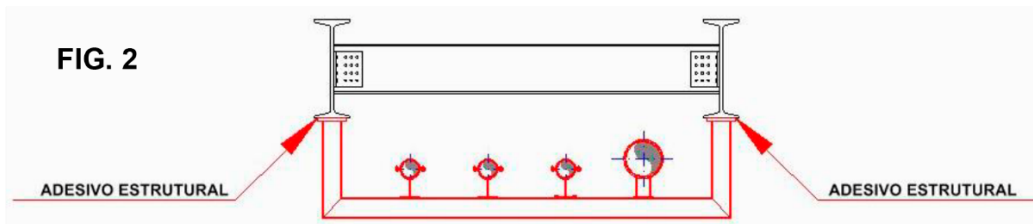


FIG. 3

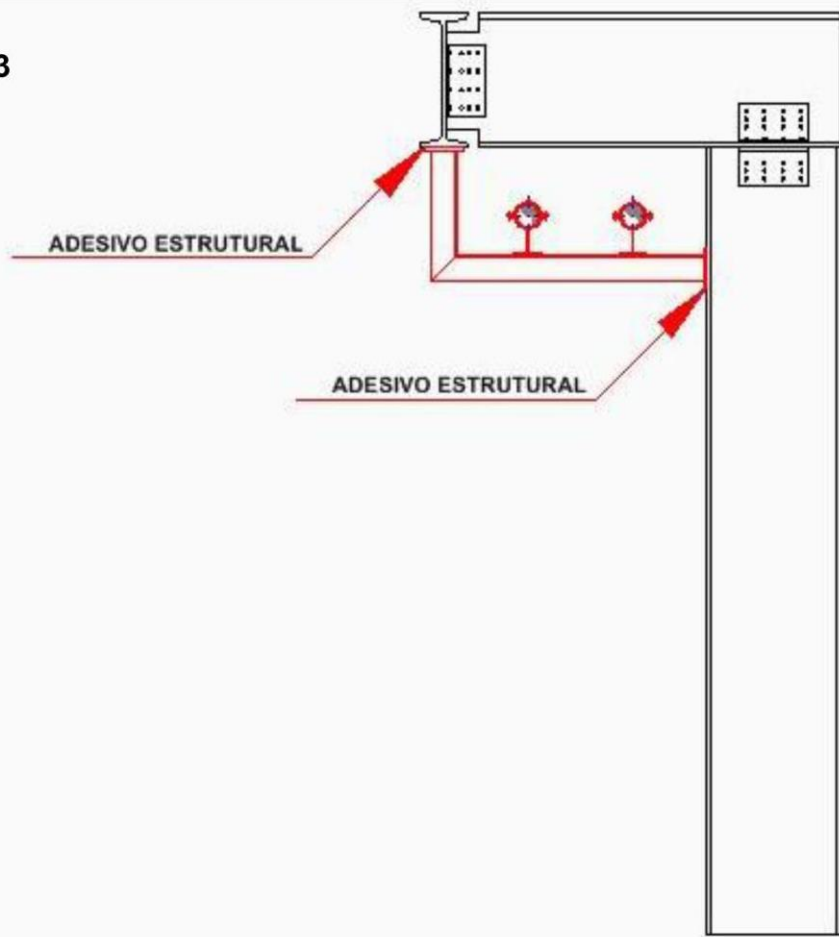
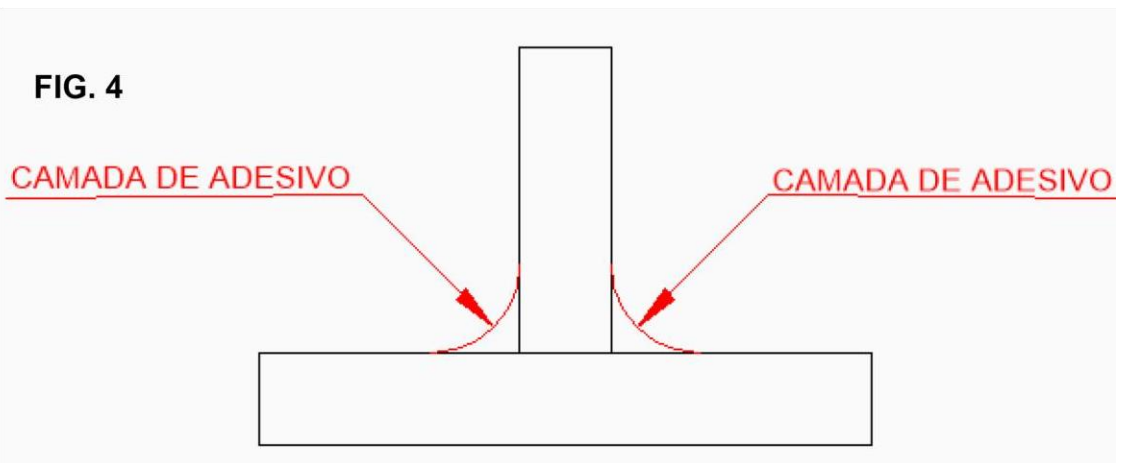


FIG. 4



ESCLARECIMENTO

Utilização de adesivos como união mecânica em ambientes com risco de explosão

Conforme solicitado no dia 15/02/2022, através do sistema do INPI, houve a alteração na formatação dos arquivos, seguindo os padrões indicados pela instituição. Desta forma, o autor reconhece que alterou todos os documentos solicitados, visando a cumprir com o estabelecido.



UPF
UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br