



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto Politécnico

Milla Siqueira de Paula

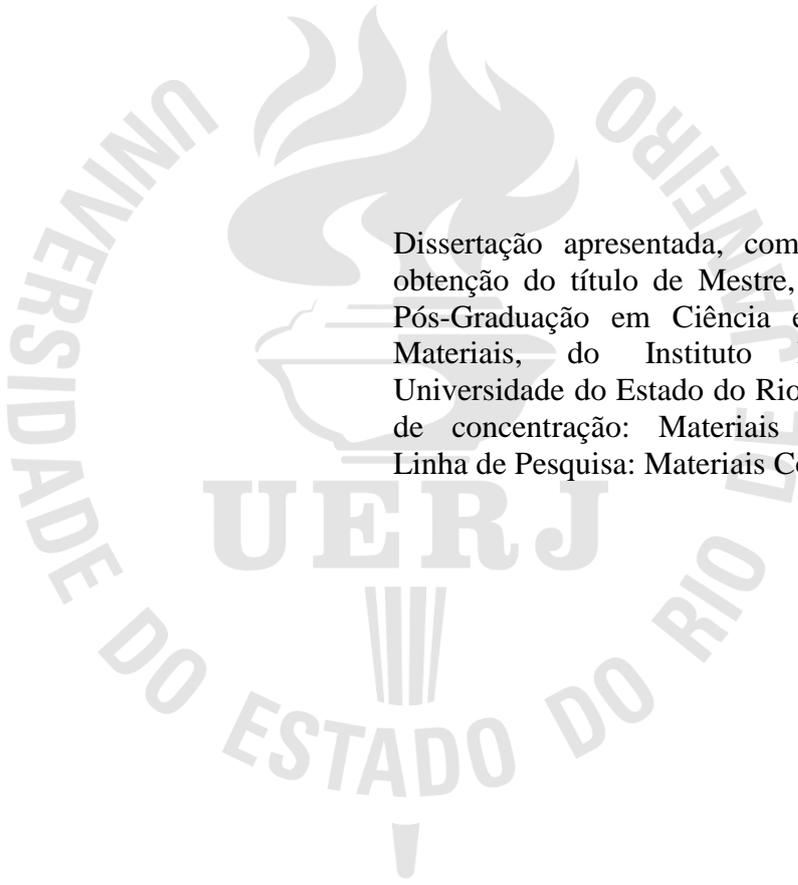
Análise do comportamento em fluência de juntas metálicas coladas

Nova Friburgo

2019

Milla Siqueira de Paula

Análise do comportamento em fluência de juntas metálicas coladas



Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Materiais Não Metálicos, Linha de Pesquisa: Materiais Conjugados.

Orientador(es): Prof(a) Eduardo Martins Sampaio

Nova Friburgo

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/E

P324 Paula, Milla Siqueira de.

Análise do comportamento em fluência de juntas metálicas coladas / Milla Siqueira de Paula. - 2019.

134 f. : il.

Orientador: Eduardo Martins Sampaio.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Juntas (Engenharia) - Ensaio mecânico - Teses. 2. Deformações (Mecânica) - Teses. 3. Falhas estruturais - Teses. 4. Deformações e tensões - Teses. 5. Materiais - Deformações - Teses. 6. Metais – Deformações - Teses. 7. Adesão - Teses. I. Sampaio, Eduardo Martins. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. III. Título.

CDU 621.791/.792

Bibliotecária: Sandra Mueller CRB7/3633

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação.

Assinatura

Data

Milla Siqueira de Paula

Análise do comportamento em fluência de juntas metálicas coladas

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Materiais Não Metálicos, Linha de Pesquisa: Materiais Conjugados.

Aprovada em 30 de Julho de 2019.

Banca examinadora:

Prof. Eduardo Martins Sampaio, D. Sc. (Orientador)
Instituto Politécnico - UERJ

Prof. Joaquim Teixeira de Assis, D. Sc.
Instituto Politécnico - UERJ

Prof. Valber Azevedo Perrut, D. Sc.
Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo
Américo Miguez de Mello - Petrobras

Nova Friburgo

2019

DEDICATÓRIA

À minha família, por ser minha motivação diária e constante.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que é o autor da vida.

Ao professor e orientador Eduardo Martins Sampaio, pelo apoio, instrução e motivação.

Ao meu esposo, Felipe, por me ajudar a ser uma pessoa melhor a cada dia.

Aos meus pais, irmãos e sobrinhos, que me motivam a lutar pelos meus objetivos.

A Ranulfo Martins Carneiro Netto e Ney Robson Ferreira Rohem, pelo auxílio nos testes e paciência.

Aos colegas do LAA, especialmente Marcelo e Ricardo, pela persistência e elaboração dos materiais para os ensaios.

Quem examina cada questão com cuidado prospera, e feliz é aquele que confia no Senhor.

Provérbios 16:20

RESUMO

DE PAULA, Milla Siqueira. Análise do comportamento em fluência de juntas metálicas coladas. 2019. 134 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2019.

Inúmeras vantagens apresentadas pela utilização de juntas coladas por adesivos tem sido notadas, levando a um aumento da utilização desse tipo de união de materiais no lugar dos tradicionais métodos. Apesar desse crescimento, pouca informação encontra-se na literatura sobre o comportamento dessas uniões sob fluência, devido ao alto tempo de execução desses ensaios quando comparados com outros ensaios destrutivos. Com o auxílio do Equipamento Pneumático de Fluência (EPF) criado pelo Laboratório de Adesão e Aderência (LAA/UERJ/IPRJ), foram realizados testes com variação nas porcentagens da tensão de ruptura, sendo que esta máquina pode testar até 10 corpos de prova por vez. Foram realizadas análises do comportamento em fluência de juntas de cisalhamento simples (SLJ) compostas de substratos metálicos e coladas com um adesivo de base epóxi (NVT 201E®) e outro com base poliuretano (Masterpur Estrutural 300®). Após as análises, foi possível compará-las com ensaios de fluência anteriores realizados no LAA com juntas com adesivos de base epóxi (Multi-metall®) e poliuretano (Fusor®). Concluiu-se que as tensões de ruptura em fluência, para os ensaios que ultrapassaram as 1000 horas, das juntas coladas com ambos os adesivos de base epóxi foram similares. O comportamento em fluência das juntas coladas com os adesivos de base poliuretano divergiu muito. As fraturas apresentadas após os testes de fluência das juntas coladas com o NVT 201E® foram mistas (adesivas e coesivas) e das juntas coladas com o Masterpur Estrutural 300® foram predominantemente adesivas. Algumas considerações foram realizadas no *software* de análise de elementos finitos, Abaqus®, para simular os testes de fluência realizados. Para encontrar os parâmetros de fluência, faz-se necessário obter a curva de fluência do adesivo, que ainda não foi obtida nesta dissertação. Por conseguinte, foram considerados parâmetros de fluência de outro adesivo de base epóxi e propriedades semelhantes aos do NVT 201E® com o objetivo de mostrar os passos necessários para a modelagem em fluência no Abaqus.

Palavras-chave: Juntas coladas. Fluência. Epóxi. Poliuretano. Elementos finitos. Abaqus®.

ABSTRACT

DE PAULA, Milla Siqueira. Análise do comportamento em fluência de juntas metálicas coladas. 2019. 134 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2019.

Numerous advantages presented by the use of adhesive bonded joints have been noted, leading to an increase use of this type of joining of materials in place of traditional methods. Despite this growth, little information is found in the literature on the behavior of these unions under creep, due to the high execution time of these tests when compared with other destructive tests. With the aid of the Creep Pneumatic Equipment (CPE) created by the Adhesion and Adherence Laboratory (AAL / UERJ / IPRJ), tests were performed with variation in percentages of rupture stress, and this machine can test up to 10 specimens per turn. The creep behavior analysis of single lap joints (SLJ) composed of metallic substrates and glued with an epoxy base adhesive (NVT 201E®) and another based on polyurethane (Masterpur Structural 300®) were performed. After the analyzes, it was possible to compare them with previous creep tests performed in the AAL with joints with epoxy base adhesives (Multi-metall®) and polyurethane (Fusor®). It was concluded that creep rupture stresses for the tests exceeding 1000 hours of the bonded joints with both epoxy base adhesives was similar. The creep behavior of the bonded joints with the polyurethane based adhesives differed widely. The fractures presented after the fluence tests of the joints bonded to the NVT 201E® were mixed (cohesive and adhesive) and the joints bonded with the Masterpur Structural 300® were predominantly adhesive. Some considerations were made in finite element analysis software, Abaqus®, to simulate the creep tests performed. To find the creep parameters, it is necessary to obtain the adhesive creep curve, which has not been obtained in this dissertation. Therefore, creep parameters of another epoxy based adhesive and properties similar to those of NVT 201E® were considered in order to show the steps required for creep modeling in Abaqus.

Keywords: Bonded joints. Creep. Epoxy. Polyurethane. Finite elements. Abaqus®.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes típicos de uma junta adesiva	18
Figura 2 - Aderentes, adesivo e superfície de colagem em uma junta colada.....	19
Figura 3 - Tipos de tensões nas SLJ	26
Figura 4 - Single-lap joint.....	27
Figura 5 - Representação das falhas coesivas e adesivas	28
Figura 6 - Exemplo de fraturas.	29
Figura 7 - Ângulo de contato.....	30
Figura 8 - Variação do ângulo de contato.....	30
Figura 9 - Esforços em uma junta de cisalhamento simples.....	32
Figura 10 - Representação da análise de Volkersen	33
Figura 11 - Deformações em juntas de cisalhamento simples	34
Figura 12 - Distribuição de tensão de cisalhamento de Volkersen.....	34
Figura 13 - Representação das tensões de arrancamento em uma SLJ	35
Figura 14 - Ensaio e curvas de fluência.....	36
Figura 15 - Curvas de fluência	37
Figura 16 - Gráfico da tensão (escala logarítmica) em função do tempo até a ruptura (escala logarítmica) para uma liga Ni-C em três temperaturas.....	38
Figura 17 - Influência da tensão e da temperatura sob a fluência em um material em função do tempo de vida.....	39
Figura 18 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de fluência	41
Figura 19 - Equipamento para o ensaio de fluência	42
Figura 20 - Conjunto de dados aproximados pela reta de regressão AB.....	44
Figura 21 - Exemplos de ajustes em uma linha de regressão	45
Figura 22 - Relação entre tempo de ruptura e três níveis de tensão, utilizando a equação de Larson-Miller	47
Figura 23 - Gráfico para o parâmetro Larson-Miller para uma liga S-590, baseada em Fe (C = 17).....	47
Figura 24 - Equipamento Pneumático de Fluência (EPF)	48
Figura 25 – Divisão de partes em cada unidade de ensaio.	49
Figura 26 - Partes de cada unidade de ensaio	50
Figura 27 - Exemplo de uma porta de carro modelada no Abaqus®	54
Figura 28 - Malha de elementos finitos utilizada no Abaqus® para junta de cisalhamento simples (em 2D).....	54

Figura 29 -Exemplo de malha em uma junta de cisalhamento simples em 3D no Abaqus®.....	55
Figura 30 - Componentes A e B do NVT 201E®	61
Figura 31 - Componentes A e B do Masterpur Estrutural 300®.....	62
Figura 32 - Dimensões do corpo de prova pela norma ASTM D 1002.....	63
Figura 33 - Substrato	64
Figura 34 - Corpos de prova antes e após o jateamento	65
Figura 35 - Rugosímetro TalyScan 150.....	66
Figura 36 - Resultado tridimensional da análise superficial de rugosidade	67
Figura 37 - Aspersão de Silano 1%	68
Figura 38 - Controle do ph da solução	68
Figura 39 - Elementos do gabarito de colagem	69
Figura 40 - Posicionamento das chapas para controle de espessura.....	70
Figura 41 - Colagem dos substratos	71
Figura 42 - Remoção do excesso de adesivo.....	71
Figura 43 - Barras de distribuição de carga e contrapeso.....	72
Figura 44 - Gabarito com as juntas na estufa para a cura do adesivo.....	72
Figura 45 - Máquina universal de ensaios AG-X.....	74
Figura 46 - Corpos de prova montados nas garras	75
Figura 47 - Ensaio para obter a tensão de ruptura no EPF	76
Figura 48 - Juntas em teste de fluência no EPF.....	77
Figura 49 - Molde para a fabricação dos corpos de prova para ensaios de tração	78
Figura 50 - Comparação das tensões de ruptura do NVT 201E® e Masterpur Estrutural 300®.....	84
Figura 51 - Comparação das tensões de ruptura em cisalhamento das juntas coladas com o Masterpur Estrutural 300® realizados pelo fabricante e nesta dissertação	85
Figura 52 - Comparação das tensões médias de ruptura das juntas jateadas e lixadas coladas com o Masterpur Estrutural 300®.....	86
Figura 53 - Comparação das tensões médias de ruptura das juntas lixadas coladas com o Masterpur Estrutural 300® com e sem aspersão de silano.....	90
Figura 54 - Gráfico do ensaio de cisalhamento para juntas coladas com o NVT 201E®.	91
Figura 55 - Gráfico do ensaio de cisalhamento para juntas coladas com o Multi-metall®	91
Figura 56 - Resultados dos ensaios de cisalhamento feitos na máquina universal das	

juntas coladas com o Masterpur Estrutural 300®.....	91
Figura 57 - Resultados dos ensaios de cisalhamento feitos na máquina universal das juntas coladas com o Fusor®.....	92
Figura 58 - Gráfico tensão x deformação para o Masterpur Estrutural 300®.....	93
Figura 59 - Resultados dos ensaios de fluência para as juntas com o NVT 201E®.....	95
Figura 60 - Resultados para os ensaios de fluência para as juntas com o Masterpur Estrutural 300®.....	97
Figura 61 - Gráfico log da tensão em função do log do tempo até a ruptura para o NVT 201E®.....	99
Figura 62 - Curva modelo e dados dos ensaios do NVT 201E® em escala logarítmica.	100
Figura 63 - Curva modelo e dados do ensaio NVT 201E® em escala cartesiana	100
Figura 64 - Gráfico log da tensão em função do log do tempo até a ruptura para o Masterpur Estrutural 300®.....	101
Figura 65 - Curva modelo e dados Masterpur Estrutural 300® em escala logarítmica ..	102
Figura 66 - Curva modelo e dados do Masterpur Estrutural 300® em escala cartesiana	102
Figura 67 - Região de fratura do corpo de prova colado	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Algumas famílias de adesivos estruturais.....	20
Tabela 2 – Diferenças entre vários tipos de juntas quanto à sua união	25
Tabela 3 – Informações Técnicas de Cura.....	60
Tabela 4 – Dados técnicos do adesivo NVT 201E®.....	60
Tabela 5 – Propriedades do adesivo NVT 201E®.....	60
Tabela 6 – Propriedades do Masterpur Estrutural 300®	61
Tabela 7 – Informações técnicas do Masterpur Estrutural 300®	62
Tabela 8 – Análise das rugosidades antes e após silanização.....	69
Tabela 9 – Condições climáticas para a colagem	70
Tabela 10 – Condições finais das juntas após a colagem	73
Tabela 11 – Propriedades e parâmetros de fluência do Epidian 53:PAC=100:80®.....	80
Tabela 12 – Resultados dos ensaios de tração realizados na máquina universal de ensaios para o NVT 201E®.....	81
Tabela 13 – Resultado dos ensaios de tração do EPF para o NVT 201E®.....	82
Tabela 14 –Resultado dos ensaios de tração da máquina universal para o Masterpur Estrutural 300®.....	83
Tabela 15 – Resultado do ensaio de tração do EPF para o Masterpur Estrutural 300®....	83
Tabela 16 –Resultado do ensaio de tração para o Masterpur Estrutural 300® para a superfície lixada.....	86
Tabela 17 –Tensão de ruptura das juntas jateadas coladas com o Masterpur Estrutural 300® após 4 meses de cura.....	87
Tabela 18 –Tensão de ruptura das juntas lixadas coladas com o Masterpur Estrutural 300® após 2 semanas de cura.....	88
Tabela 19 – Tempo de cura e tensão de ruptura do Masterpur Estrutural 300®.....	88
Tabela 20 –Resultado do ensaio de tração na máquina universal para o Masterpur Estrutural 300® para a superfície lixada sem silano.....	89
Tabela 21 – Tensão e deformação médias para as juntas coladas com cada adesivo.....	92
Tabela 22 – Comparação entre tensão, deformação e módulo de elasticidade dos adesivos	93
Tabela 23 – Resultado dos ensaios de fluência para as juntas coladas com oNVT 201E®	94

Tabela 24 –Resultado dos ensaios de fluência para as juntas coladas com o Multi-metall®.....	95
Tabela 25 –Resultado dos ensaios de fluência para as juntas coladas com o Masterpur Estrutural 300®.....	96
Tabela 26 –Tempo de cura e tempo de ruptura do Masterpur Estrutural 300® testado em fluência.....	97
Tabela 27 – Resultado dos ensaios de fluência para as juntas coladas com o Fusor®.....	98

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	16
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
1.1	Adesivos	18
1.1.1	<u>Adesivo estrutural</u>	19
1.1.1.1	Adesivo de base epóxi	21
1.1.1.2	Adesivo de base poliuretano.....	22
1.1.2	<u>Adesivo não-estrutural</u>	23
1.2	Juntas coladas com adesivos estruturais	23
1.2.1	<u>Junta de sobreposição simples</u>	27
1.2.1.1	Tipos de falhas nas juntas	28
1.2.1.2	Adesão.....	28
1.2.1.3	Preparação da superfície	31
1.2.1.4	Estudo das tensões nas juntas	32
1.3	Fluência	32
1.3.1	<u>Ensaio típico de fluência em metais</u>	36
1.3.2	<u>Efeitos da temperatura e tensão em metais</u>	38
1.3.3	<u>Fluência em polímeros</u>	40
1.3.4	<u>Normas para o ensaio de fluência (ASTM D 2294 e ASTM D 1002)</u>	40
1.3.5	<u>Métodos de extrapolação de dados</u>	43
1.3.5.1	Técnica de Regressão Linear	43
1.3.5.2	Parâmetro Larson-Miller	46
1.4	Equipamento Pneumático de Fluência (EPF)	48
1.4.1	<u>Alguns parâmetros de ensaio</u>	51
1.5	Método de Elementos Finitos (Finite Element Method - FEM)	52
1.5.1	Abaqus®.....	53
1.5.1.1	Leis para o estudo de fluência no Abaqus® (leis de potência).....	55
1.5.1.1.1	Lei de endurecimento pelo tempo transcorrido (<i>time-hardening</i>).....	56
2	METODOLOGIA	58
2.1	Planejamento dos experimentos	58

2.2	Características dos adesivos	59
2.2.1	<u>NVT 201E®</u>	59
2.2.2	<u>Masterpur Estrutural 300®</u>	61
2.3	Cálculo da tensão cisalhante máxima admitida nas juntas	62
2.4	Usinagem dos corpos de prova	64
2.5	Tratamento superficial	64
2.5.1	<u>Jateamento</u>	64
2.5.2	<u>Lixamento</u>	65
2.5.3	<u>Análise de rugosidade das juntas</u>	66
2.5.4	<u>Revestimento com o silano</u>	68
2.6	Colagem das juntas	69
2.7	Ensaio	73
2.7.1	<u>Testes de ruptura com a máquina universal de ensaios</u>	73
2.7.2	<u>Testes de ruptura com o EPF</u>	78
2.7.3	<u>Ensaio de fluência com o EPF</u>	76
2.8	Ensaio de tração do Masterpur Estrutural 300®	77
2.9	Modelagem da fluência no Abaqus	78
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
3.1	Tensões de ruptura das juntas	81
3.1.1	<u>Tensão média de ruptura das juntas coladas com o adesivo NVT 210E®</u>	81
3.1.2	<u>Tensão média de ruptura das juntas coladas com o adesivo Masterpur Estrutural 300®</u>	82
3.1.2.1	<u>Tensão média de ruptura das juntas lixadas e coladas com o Masterpur 300®</u>	85
3.1.2.2	<u>Influência da espessura dos adesivos e do tempo de cura para o Masterpur Estrutural 300®</u>	87
3.1.2.3	<u>Comparação juntas lixadas com Masterpur Estrutural 300® com e sem aspersão de silano</u>	89
3.1.3	<u>Comparação entre os ensaios de tração realizados pela Máquina Universal</u>	90
3.2	Comparação entre os módulos de elasticidade dos adesivos	93
3.3	Ensaio de fluência	94
3.3.1	<u>NVT 201E® e comparação com Multi-metall®</u>	94
3.3.2	<u>Masterpur Estrutural 300® e comparação com o Fusor®</u>	96
3.4	Dados experimentais do NVT 201E® em escala logarítmica	98
3.5	Qualificação das fraturas das juntas	103

3.6	Resultados das considerações de Fluência no Abaqus	104
	CONCLUSÃO.....	105
	REFERÊNCIAS.....	107
	APÊNDICE-A – Rugosidade	112
	APÊNDICE-B – Ensaio de fluência para o NVT 201E®.....	118
	APÊNDICE-C – Ensaio de fluência para o Masterpur Estrutural 300®	121
	APÊNDICE-D – Fotos dos corpos de prova fraturados	122
	APÊNDICE-E – Abaqus – desenho e propriedades do adesivo NVT®.....	127

INTRODUÇÃO

Os adesivos estruturais utilizados nas juntas coladas, têm ganhado destaque nos últimos anos. As inúmeras vantagens fornecidas como: não precisar de aporte térmico, não concentrar tensões, redução do peso, além de ser a melhor forma de unir materiais diferentes; são motivos para a substituição de parafusos, soldas e rebites por esses adesivos. Juntas metálicas unidas por adesivos estruturais tem encontrado enormes aplicações em processos industriais, principalmente no ramo offshore. Devido a isto, o LAA tem realizado estudos e utilizado adesivos em reparos de tubulações offshore, inclusive o adesivo NVT 201E® criado pela NOVATEC em parceria com o laboratório, que é um adesivo rígido de base epóxi.

Su and Makie (1993) afirmam que estudar o comportamento de fluência das juntas adesivas em aplicações estruturais é necessário para aumentar sua durabilidade e confiabilidade. O estudo do comportamento em fluência de juntas coladas é um tema de grande importância para o projeto de juntas adesivas estruturais, e também para o LAA, pois diversos reparos com adesivos têm sido realizados pelo laboratório, principalmente com o NVT 201E®. Devido a isto, alguns trabalhos foram realizados no LAA para estudar o comportamento em fluência das juntas coladas. Queiroz (2013) estudou o comportamento em fluência de juntas coladas com um adesivo rígido e um flexível. Júnior, (2017) utilizou testes hidrostáticos de resistência e em fluência para dar continuidade ao desenvolvimento de um novo reparo emergencial de chapa colada para tubulações de aço com defeito transpassante (furo) desenvolvido pelo LAA, demonstrando grande potencial de utilização do reparo. O comportamento em fluência de juntas de cisalhamento simples com o adesivo estrutural NVT 201E® ainda não havia sido estudado, sendo este um dos itens relevantes desse trabalho.

O comportamento em fluência dos adesivos estruturais ainda é pouco explorado, devido demandas de tempo e recursos financeiros. O fato destes adesivos serem submetidos a temperaturas cada vez mais elevadas e ser desejado longos tempos de duração, torna os seus comportamentos em fluência de suma importância. Khalili (2009) por exemplo, fez um estudo experimental da análise de fluência de juntas de cisalhamento simples metálicas coladas com adesivos reforçados por fibras.

O método de elementos finitos (MEF) proporciona a vantagem de simular o comportamento dos materiais, evitando ensaios desnecessários e desta forma proporcionando uma economia significativa. Uma maior confiabilidade dos resultados é gerada quando são obtidos resultados similares entre os ensaios experimentais e os numéricos. O comportamento

em fluência, como necessita de um longo período de operação, muitas vezes tem os seus ensaios experimentais limitados. A utilização do MEF para estudar a fluência é uma opção nesses casos. Um software de análise de elementos finitos muito utilizado comercialmente e que possui a capacidade de realizar análises para deformações de fluência é o Abaqus® (ABAQUS, 2014).

Poucos trabalhos ainda existem com a utilização do Abaqus® para a modelagem em fluência de adesivos. No presente trabalho, foram realizadas algumas considerações na modelagem com o auxílio do Abaqus® para as juntas coladas com o adesivo rígido (NVT 201E®), utilizando modelos encontrados nos trabalhos de Miravalles (2007) e Zehsaz (2014).

OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo comparar juntas coladas com adesivos de base epóxi (NVT 201E®) e poliuretano (Masterpur Estrutural 300®) ensaiadas nesta dissertação, com as juntas coladas com adesivos de mesma base ensaiadas por Queiroz (2013) (Multi-metall® e Fusor®, respectivamente). Será avaliado se existe uma proporção de tensão de ruptura em fluência para juntas coladas com adesivos que constituem a mesma base, neste caso os adesivos epóxis (rígidos) e os poliuretanos (flexíveis). Além disso, os dados obtidos pelo LAA para as chapas coladas com o NVT 201E® são apenas os ensaios de qualificação, que analisam o comportamento de chapas coladas com este adesivo em tempos curtos (cerca de 30 minutos). Como o adesivo NVT 201E® é muito utilizado pelo LAA em chapas coladas nos reparos estruturais, é importante estudar o comportamento em fluência do mesmo.

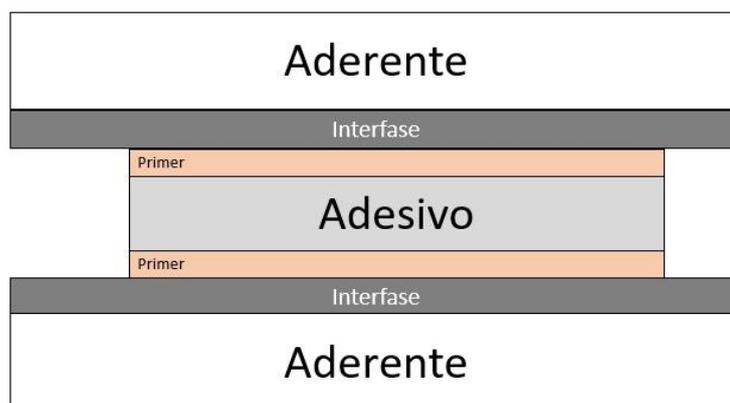
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Adesivos

Adesivo é definido como uma substância capaz de unir pelo menos duas superfícies de uma forma firme e permanente. Os adesivos são escolhidos por seus poderes de retenção e ligação, suas propriedades dependem da aplicação e processamento. Geralmente são materiais que possuem altas resistências ao cisalhamento e tração (PETRIE, 2000). Da Silva (2007) considera o adesivo como um material polimérico que, ao ser aplicado em superfícies pode ligá-las e resistir à sua separação.

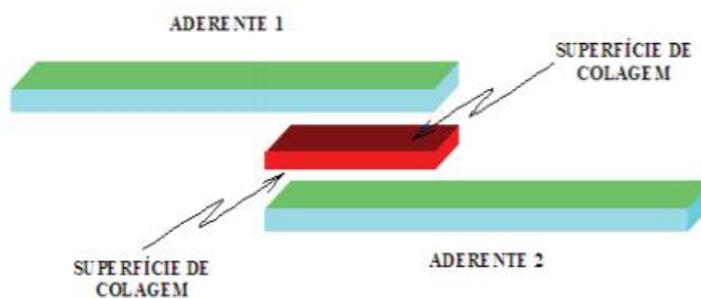
Segundo De Souza (2013), o substrato é o material a ser colado, sendo que após a colagem com frequência é referido como aderente. Chama-se interfase a área útil entre o adesivo e o aderente. A interface localiza-se dentro da interfase, sendo um plano de contato entre as superfícies de dois materiais. A região da interfase possui diferentes características físicas e químicas do adesivo e do aderente. Entre o adesivo e o aderente podem existir várias interfaces compostas com materiais diferentes. O adesivo transfere o carregamento de um aderente a outro das juntas coladas. A região de interface entre o adesivo e os aderentes é conhecida como superfície de colagem. Algumas vezes é aplicado um *primer*, antes de aplicar o adesivo, na superfície, com o objetivo de proteger a superfície e melhorar a performance da colagem (DE SOUZA, 2013). A Figura 1 mostra os componentes típicos de uma junta adesiva. A Figura 2 ilustra a superfície de colagem de uma junta colada.

Figura 1 - Componentes típicos de uma junta adesiva



Fonte: Adaptado de PETRIE, 2000, p.5.

Figura 2 - Aderentes, adesivo e superfície de colagem em uma junta colada



Fonte: JESUS, 2003.

O adesivo, na sua forma inicial, deve se comportar como um fluido, molhando as superfícies dos aderentes, devendo preencher todas as cavidades e espaços. Posteriormente, os adesivos devem endurecer e se transformar em sistemas rígidos, onde transferem e distribuem cargas (PETRIE, 2000).

Existem diversas formas de classificar os adesivos. Com base na função, temos os adesivos estruturais e não-estruturais, onde será explicado mais detalhadamente no tópico 1.1.1. Os adesivos também podem ser classificados como sintéticos ou naturais, de acordo com a sua fonte, sendo sintéticos os sintetizados pelo homem e naturais os de origem animal/vegetal. Outros métodos de classificação que não serão abordados nesse trabalho são os com base na aplicação, custo, composição química, forma física, dentre outros (DA SILVA, 2007).

1.1.1 Adesivo estrutural

Adesivos estruturais são aqueles que normalmente são usados em aplicações permanentes e que exigem alta resistência, apresentam resistência ao cisalhamento acima de 7 MPa. São geralmente formulados por resinas termofixas. Alguns elastômeros termofixos com alta resistência, como os poliuretanos, podem também ser classificados como adesivos estruturais (PETRIE, 2000). Adesivos estruturais possuem altas resistências ao cisalhamento e ao meio ambiente, de forma geral sua resistência é crítica para o sucesso da montagem. Essa classe de adesivos pode ser aplicada em diversos ambientes e todos esses adesivos são sintéticos. A tabela 1 mostra algumas famílias de adesivos estruturais.

Tabela 1 – Algumas famílias de adesivos estruturais (continua)

ADESIVOS	FORMA DISPONÍVEL	MÉTODO DE CURA	CARACTERÍSTICAS ESPECIAIS	ADERENTES USUAIS	FAIXA DE PREÇO
Epóxi (TF)	Líquido ou pasta em dois componentes; líquido pasta ou sólido em um componente; soluções	Temperatura ambiente ou mais elevada	-Adesivo existente mais versátil; -Excelente resistência ao cisalhamento; -Excelente resistência à umidade e a solventes; - Baixa retração durante a cura; -Fraca resistência ao descascamento; -Variedade de agentes de cura/endurecedores oferece muitas combinações.	Metal, plástico, vidro, borracha, madeira, cerâmica	Média
Acrílico (TF)	Líquido ou pasta em dois componentes	Temperatura ambiente	-Excelente adesão a muitos plásticos; - Boa resistência às intempéries; - Rápida cura; - Endurecedor pode ser usado como <i>primer</i> do substrato; - Baixa resistência ao descascamento e ao impacto.	Metais, muitos plásticos, madeira	Média
Cianocrilato (TF)	Líquido em componente único	Rapidamente à temperatura ambiente e na ausência de ar	- Endurecimento rápido; - Boa força de adesão; - Baixa viscosidade; - Baixa resistência à temperatura e ao impacto; - Inadequado para superfícies ácidas; - Custo elevado.	Metal, plásticos, vidro	Muito alta
Poliéster (TF)	Líquido ou pasta em dois componentes	Temperatura ambiente ou mais elevada	- Resistência à produtos químicos, à umidade, ao calor e intempéries. - Boas propriedades elétricas; - Ampla faixa de resistência; -Algumas resinas não curam completamente na presença de ar; - Sistemas curados com isocianeto tem boa adesão a muitos filmes plásticos.	Metais, folhas, chapas, plásticos, laminados plásticos, vidro	Baixa-média
Anaeróbico (TF)	Líquido ou pasta em um componente	Temperatura ambiente ou mais elevada, na ausência de ar	- Quimicamente inerte e anaeróbico; -Excelente capacidade de molhamento; - Faixa de temperatura de trabalho: - 54 -149°C; - Suporta rápido ciclos térmicos; - Para as classes com alta resistência à tração é necessária cura a 120°C. -A cura ocorre em minutos para temperaturas acima de 135°C.	Metais, plástico, vidro, madeira	Muito alta

Tabela 1 – Família de adesivos estruturais (continuação)

Poliamida (TF)	Filme apoiado, solução em solvente	Temperatura elevada	-Excelente resistência térmica e à oxidação; - Apto a uso contínuo em até 285°C, e em períodos curtos em até 480°C; - Custo elevado.	Metal, folha de metal, núcleo tipo favo de mel	Muito alta
Bismaleimida (TF)	Filme de pasta em um componente	Temperatura elevada	- Adequado para longos períodos de exposição a 200°C e curtos períodos de exposição a 230°C. -Baixa resistência ao descascamento.	Metais, placas de circuitos, compósitos	Alta
Melamina formaldeído (TF)	Pó a ser misturado com agente endurecedor	Calor e pressão	- Equivalente a adesivos fenólicos e resorcinóis com relação à durabilidade e resistência à água; - Normalmente são combinados com ureia para reduzir os custos. - Temperaturas de trabalho mais altas que ureias.	Compensados de madeira, outros produtos de madeira	Média
Poliuretano (TF)	Líquido ou pasta em dois componentes	Temperatura ambiente ou mais elevada	- Excelente resistência à tração e ao cisalhamento na faixa de – 240 a 95°C; - Boa adesão a plásticos; - Baixa resistência à umidade, antes e depois da cura.	Plásticos, metais, borracha	Alta
Fenólicos modificados (nitrilo-fenólico, neoprene-fenólico, vinil-fenólico) (TH)	Soluções em solventes e emulsões, filmes apoiados e não apoiados, fitas, líquido, pó de co-reação	Calor e pressão	- Ótima resistência ao cisalhamento e descascamento; - Boa resistência ao calor; - Ótima resistência à fadiga e ao impacto; - Boa adesão; - Boa resistência à umidade, água, óleo.	Metais, plásticos, vidro, borracha	Baixa-média

Legenda: (TF) – Termofixos; (TH) – Termofixos Híbridos.

Fonte: PETRIE 2000, p. 343-392.

1.1.1.1 Adesivo de base epóxi

Conforme afirmado por Petrie (2000), adesivos com base epóxi são provavelmente a família de adesivos mais versátil, pois colam bem a maioria dos substratos e podem ser modificados com facilidade para conseguir grandes variedades de propriedades. Devido a isto, possuem ampla aplicação na indústria automotiva, industrial e aeroespacial. Por causa das

suas boas propriedades de molhagem, adesivos epóxis oferecem um grau de adesão satisfatório para quase todos os substratos, exceto alguns plásticos e elastômeros. Epóxi curado exibe excelente resistência ao cisalhamento e tração, mas uma pobre resistência ao descascamento, a menos que modificado por um polímero mais resistente. Possuem também resistência ao óleo, mistura e a maioria dos solventes. Adesivos epóxis comerciais são compostos primariamente por uma resina epóxi e um agente de cura. Esses adesivos levam em média de 18 a 72 horas para a cura completa (PETRIE, 2000).

Adesivos epóxis oferecem alta resistência à fluência. Devido as altas resistências que podem ser obtidas e dos custos relativamente altos, eles são usados geralmente em aplicações estruturais na colagem de concreto e metal (PIZZI, 2013).

1.1.1.2 Adesivo de base poliuretano

Adesivos com base poliuretano são flexíveis e formam uma colagem firme com alta resistência ao cisalhamento. Esses adesivos exibem uma elevada resistência ao descascamento, diferente dos epóxis. Eles têm uma melhor resistência a baixas temperaturas do que outros adesivos. Ainda detém boa resistência à abrasão e dureza. Possuem boa resistência química, embora não tanto como os epóxis ou acrílicos. Não dispõem boa resistência à altas temperaturas. Devido à sua capacidade de molhamento e boa flexibilidade, adesivos com base poliuretano colam bem muitos substratos, incluindo plásticos difíceis de molhar. São muito usados para colar elastômeros, filmes, folhas metálicas e também substratos de madeira. São muito usados para a colagem de plásticos na indústria automotiva (PETRIE, 2000). Em temperaturas ambientes, o endurecimento ocorre entre 3 e 20 horas (PIZZI, 2013).

Quini (2011), avaliou as propriedades de um adesivo estrutural uretânico. Pôde-se concluir, por meio de diversos ensaios, que embora diversas vezes os adesivos uretânicos não são considerados estruturais, é um candidato capacitado ao trabalho de adesão estrutural, especialmente para uso automotivo. Este adesivo apresentou elevada aderência e em todos os ensaios realizados por Quini (2011) a fratura foi fora da área de colagem (indicando que a junta é mais resistente que o substrato isoladamente).

1.1.2 Adesivo não-estrutural

Adesivos não estruturais são caracterizados por possuírem relativamente baixa resistência mecânica e fraca resistência à fluência em temperaturas elevadas. Devido a isto, esses adesivos são usados em aplicações onde não é requerido uma boa resistência final da junta e as condições ambientais não são severas, como operações temporárias. Embora possuem baixa resistência, normalmente são fáceis de usar e possuem rápida adesão. Os adesivos não-estruturais mais comuns são os baseados em termoplásticos e elastômeros. Embora classificados como não estruturais, muitos desses adesivos são usados em aplicações estruturais, onde as condições ambientais, o substrato e as características de resistência são suaves (PETRIE, 2000).

1.2 Juntas coladas com adesivos estruturais

Sampaio et. al (2006), afirma que as juntas coladas com adesivos estruturais têm vasta utilização na indústria aeroespacial, de petróleo, automobilística, dentre outras. Possuem inúmeras vantagens como não precisar de aporte de calor, possuir uma distribuição uniforme das tensões (ao comparar com juntas convencionais como solda, rebites e parafusos), dispõem de uma simplicidade de aplicação, além da resistência às intempéries. Devido a estas e outras vantagens, vários trabalhos foram realizados para investigar a aplicação dessas juntas. Carbas (2008), utilizou o método de Taguchi para diminuir o número de testes experimentais a realizar e quantificar as diversas variáveis que afetam a força de ruptura das juntas adesivas de sobreposição simples a longo prazo, especialmente o efeito da preparação superficial. Nascimento (2013), estudou juntas adesivas de sobreposição simples em que o substrato é um material compósito. Ele observou que um aumento da espessura do adesivo provoca uma diminuição da força de ruptura da junta. Já para a variação do comprimento de sobreposição, um aumento da sobreposição leva a um aumento da força de ruptura. Foram realizadas simulações usando os Elementos Finitos com modelo de dano coesivo e análise matemática, demonstrando um acordo entre a simulação numérica e os resultados experimentais. McGeorge (2010) propôs um modelo que permite estimar a capacidade de juntas coladas com longas sobreposições por meio de cálculos derivados de uma abordagem de balanço de

energia e explica a dissipação de energia na linha de adesão devido a deformações inelásticas. Ele mostra o aumento da capacidade ao aumentar o comprimento de sobreposição. Ao contrário da maioria dos modelos de capacidade de junta colada anteriormente propostos, a capacidade de acordo com o novo modelo é independente da espessura da linha de colagem.

O Laboratório de Adesão e Aderência tem realizado diversos estudos de juntas coladas com adesivos estruturais, como o de Queiroz (2013) e Júnior (2017), conforme citados na introdução. A seguir serão citados outros trabalhos de juntas coladas realizados pelo LAA.

Passos (2016) estudou o comportamento mecânico de juntas coladas de material pultrudado em matriz poliéster. Foi observada a vantagem de utilizar o *primer* de silano hidrolisado, pela facilidade do método de borrifação e baixo custo. As juntas coladas apresentaram um comportamento melhor que as fitas adesivas e nenhum corpo de prova apresentou resistência à fluência. Neto, (2017) variou a largura e o comprimento das juntas de cisalhamento simples e juntas de carregamento combinado para analisar as suas resistências. O seu estudo confirma a preferência por maiores larguras das juntas de cisalhamento simples, quando são analisadas juntas com a mesma área colada. Da Silva (2018), estudou o desempenho térmico e mecânico de adesivo epóxi modificado com nanotubos de carbono e grafeno, encontrando melhorias de até 20% no módulo de elasticidade e 15% na resistência à ruptura para as adituições com nanotubos de carbono, além de ganhos nas propriedades de aderência.

Conforme já descrito, as juntas coladas apresentam algumas vantagens em relação a outros meios mais usuais de fixação. A tabela 2 mostra algumas diferenças quanto à união entre juntas coladas, rebitadas e soldadas.

Tabela 2 – Diferenças entre vários tipos de juntas quanto à sua união

Parâmetros	Junta Colada	Junta Rebitada	Junta Soldada
Exigência da preparação da superfície	Alta	Pequena	Pequena
União de materiais diferentes	Boa	Limitada	Ruim
Peso adicional na estrutura	Baixo	Alto	Moderado
Resistência à fadiga	Alta	Baixa	Moderada
Inspeção por ensaio não destrutivo	Muito limitado	Adequado	Adequado
Facilidade na desmontagem	Difícil	Fácil	Difícil
Custo de produção	Médio	Baixo	Baixo
Resistência à degradação pelo meio ambiente	Pobre	Pobre	Moderado
Tempo de produção	Baixo	Rápido	Moderado

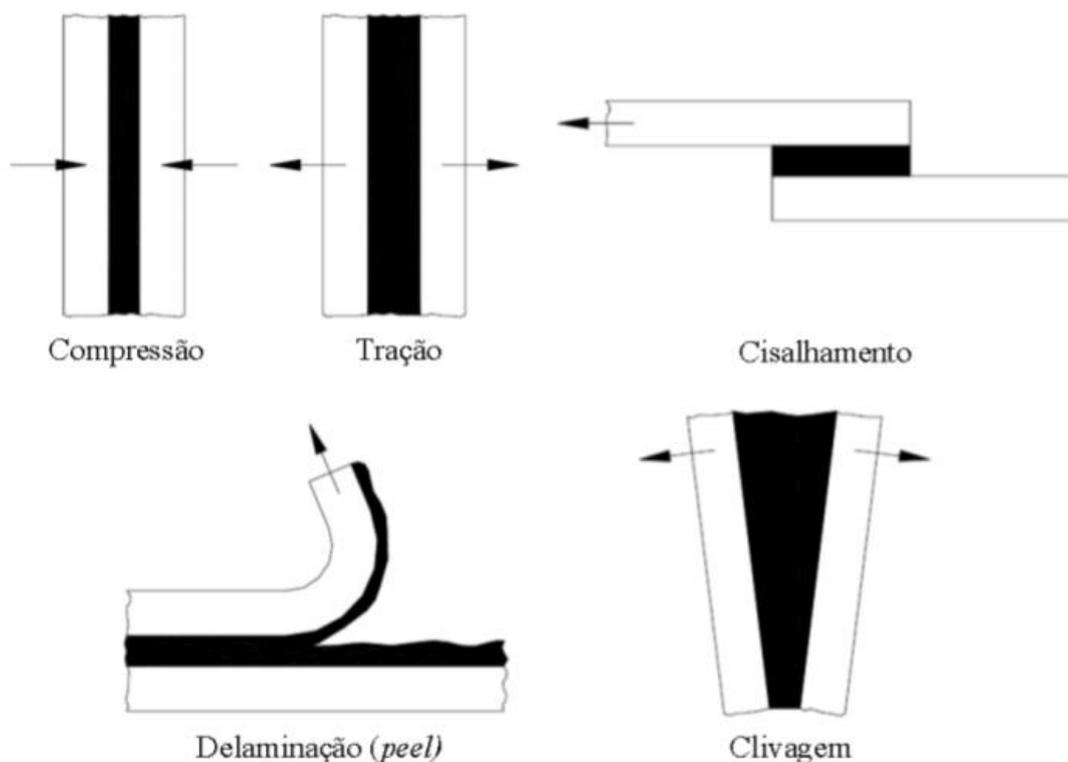
Fonte: MOURA, 2016.

Existem concentrações de tensões nas extremidades das juntas, ou seja, não há uniformidade na distribuição do carregamento na superfície de colagem. O nível de concentração de tensões nas juntas coladas é inferior do que nas juntas parafusadas e rebitadas, porém existem algumas limitações das juntas coladas em comparação com às demais, dentre elas:

- a) difícil desmonte das juntas;
- b) o adesivo pode sofrer influência do meio ambiente;
- c) as superfícies que serão coladas devem estar limpas;
- d) dificuldade de obtenção de algumas propriedades para análise numérica de juntas coladas.

A Figura 3 apresenta as tensões envolvidas em juntas (a figura ilustra as juntas de cisalhamento simples), que podem ser classificadas nas seguintes: compressão, tração, cisalhamento, delaminação e clivagem (NETO, 2016).

Figura 3 - Tipos de tensões nas SLJ



Fonte: NETO, 2016.

Neto (2016), define cada uma dessas tensões:

- compressão: são esforços que dificilmente ocorrem e provavelmente será a última a falhar, quando comparada com outras juntas submetidas a esforços diferentes;
- tração: as tensões na superfície do adesivo e aderente são distribuídas de forma uniforme, quando sobre tração pura. Porém, flexão dos aderentes, deslocamentos na junta, e outras complicações podem causar uma distribuição de tensões não linear, levando ao aparecimento de tensões de delaminação ou clivagem;
- cisalhamento: o tipo mais comum de esforço encontrado em juntas unidas por adesivos. Em cisalhamento puro, o esforço é paralelo ao plano da junta e tenta separar os elementos da junta pelo deslizamento de um deles sobre o outro. Este foi o esforço predominante nos ensaios deste trabalho;
- delaminação ou *peel* (descascamento): é o esforço situado fora do plano da junta e tenta abrir a junta de uma maneira não uniforme, geralmente em uma de suas extremidades. Para ocorrer, um ou ambos os aderentes devem ser flexíveis e poder fletir, desenvolvendo um elevado nível de tensão na interface adesivo-aderente, assim gerando a delaminação. Esse esforço deve ser evitado quando possível;

- e) clivagem: parecido com a delaminação, exceto que as extremidades são forçadas a separar o adesivo e os aderentes necessitam ser rígidos. Ocorre quando um momento ou uma força de tração deslocada é aplicada, dessa forma gerando uma distribuição não uniforme de tensões. Como a delaminação, também deve ser evitado (NETO, 2016).

Dentre essas tensões, as principais geradas nas juntas de cisalhamento simples são as de cisalhamento e as de delaminação (descascamento). As de descascamento por serem as mais prejudiciais, devem ser evitadas.

Existem diversos tipos de juntas coladas, como: junta de sobreposição simples, junta colada de topo, junta colada sobreposta dupla, dentre outras. Neste trabalho foram utilizadas as juntas de sobreposição simples, devido ao seu baixo custo e simplicidade, aliados à sua eficiência, conforme abordado no tópico 1.2.1. As demais juntas que foram citadas, por não terem sido usadas neste trabalho, não serão abordadas nesta dissertação.

1.2.1 Junta de sobreposição simples

As juntas de sobreposição simples ou *single-lap joints (SLJ)* possuem vasta utilização industrial devida a sua eficiência, baixo custo e simplicidade. Sendo também muito usadas para testes de adesivos (DE SOUZA, 2013). As SLJ também são conhecidas como juntas de cisalhamento simples. A Figura 4 mostra uma junta sobreposta simples.

Figura 4 - Single-lap joint

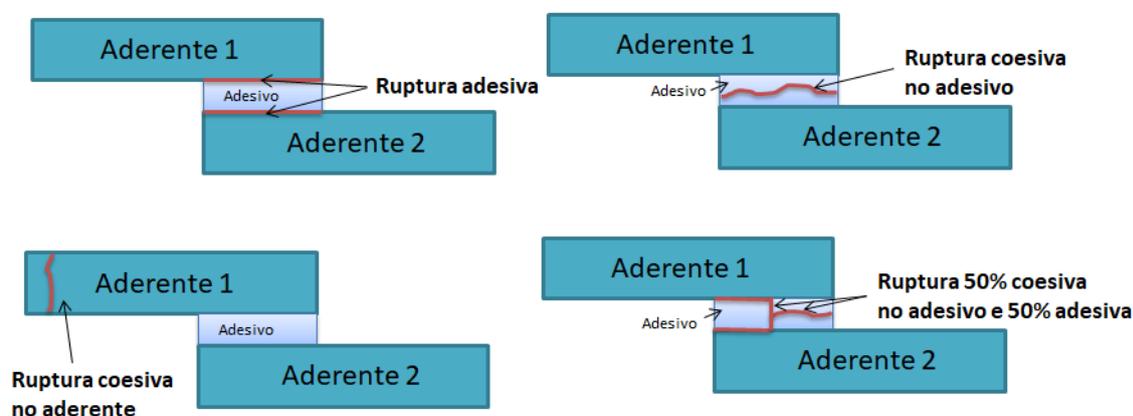


Fonte: A autora, 2019.

1.2.1.1 Tipos de falhas nas juntas

Dois tipos de falhas podem ocorrer nas juntas, a falha adesiva e a coesiva. A falha adesiva ocorre na interface entre adesivo e aderente (SAMPAIO, 1998). A falha adesiva é causada normalmente por uma preparação indevida das superfícies dos aderentes. A falha coesiva indica que a ligação entre o adesivo e o aderente é mais forte que a resistência interna do próprio adesivo. A falha coesiva divide-se em falha coesiva no adesivo e falha coesiva no aderente, dependendo de qual falhar primeiro (NETO, 2011). Uma característica da falha coesiva no adesivo é que uma camada de adesivo permanece em ambos os aderentes (SAMPAIO, 1998). A Figura 5 representa as fraturas coesivas e adesivas. A Figura 6(a) mostra um exemplo de falha predominantemente coesiva no adesivo e a 6(b), predominantemente adesiva.

Figura 5 - Representação das falhas coesivas e adesivas



Fonte: Adaptado de PETRIE, 2000 e DA SILVA, 2018.

Figura 6 - Exemplo de fraturas.



(a)



(b)

Legenda: (a) - fratura predominantemente coesiva no adesivo. (b) - fratura predominantemente adesiva.

Fonte: A autora, 2019.

Um dos fatores mais importantes da falha prematura é o fato de o adesivo não molhar a superfície do substrato por completo. Outros fatores que diminuem a resistência das juntas são as diferentes propriedades físicas do adesivo e aderente e tensões internas das juntas que ocorrem no adesivo no processo de cura, devido à contração. A durabilidade da junta também é reduzida pelas tensões geradas por fatores geométricos e do meio ambiente (SAMPAIO, 1998).

De Souza (2013) afirma que o ambiente externo pode influenciar os adesivos, substratos, até a região de interfase. Essa influência pode gerar mudanças, que podem ocorrer tanto durante a fabricação da junta, quanto durante o tempo em serviço. Como esses processos ocorrem de forma simultânea, é difícil prever a vida de uma junta colada. Existe uma grande possibilidade dessas alterações modificarem o modo de falha, podendo até resultar em uma falha catastrófica e prematura da junta.

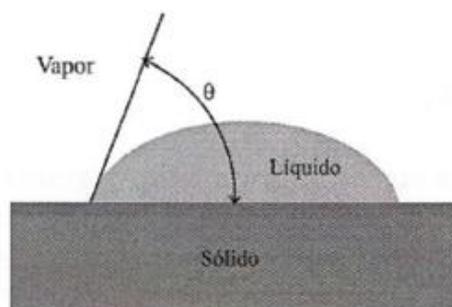
1.2.1.2 Adesão

Adesão é a interação interatômica e intermolecular na interface de duas superfícies. Trata-se de um tópico que inclui química da superfície, física, reologia, química de polímeros, mecânica dos materiais, análises de fratura entre outros (BALDAN, 2012). Alguns conceitos da teoria da adesão serão citados neste trabalho.

A molhagem de uma superfície sólida por um líquido é essencial para uma adesão satisfatória. Molhagem é a capacidade de um líquido se espalhar numa superfície sólida. (Silva, 2007)

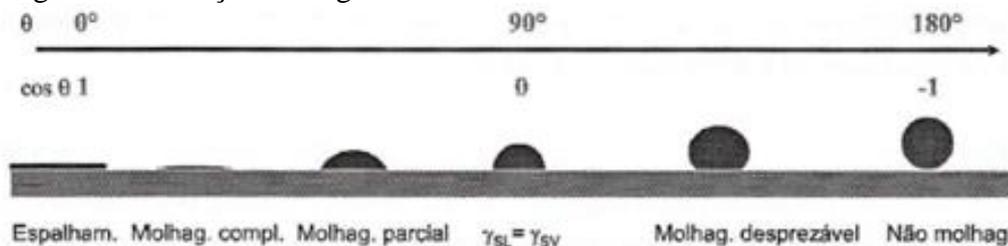
Ainda segundo SILVA, 2007, ângulo de contato é o ângulo entre a superfície sólida e a tangente à superfície do líquido no ponto de contato. O valor de θ pode variar de 0 (molhagem completa pelo líquido), até 180 quando o líquido não molha o sólido. As figuras 7 e 8 representam o ângulo de contato e a sua variação, respectivamente.

Figura 7 - Ângulo de contato



Fonte: Silva, 2007.

Figura 8 - Variação do ângulo de contato



Fonte: Silva, 2007.

Segundo a teoria da adsorção, um material irá aderir por causa das forças interatômicas e intermoleculares que são estabelecidas entre os átomos e moléculas nas superfícies dos adesivos e dos substratos após o seu íntimo contato. Segundo esta teoria, para a colagem ser bem-sucedida, o adesivo deve molhar a superfície a ser colada (aderente). Esta teoria levou ao desenvolvimento de materiais com menor tensão superficial do que a do aderente. (BALDAN, 2012).

1.2.1.3 Preparação da superfície

Conforme afirmado por Sampaio, 1998, é de primordial importância conhecer as propriedades mecânicas básicas do adesivo e substrato para a dedução das tensões nas juntas adesivas. Porém, poucos dados físicos dos adesivos são encontrados em catálogos e livros de propriedades mecânicas. Sampaio, 1998 ainda afirma que uma boa aderência nas estruturas coladas é promovida por meio de microrrugosidades e de rugosidades macroscópicas.

A rugosidade das superfícies reais varia de acordo com a sua preparação. Pode ser expressa pela rugosidade média Ra. Mesmo o menor valor da rugosidade é muito maior que o comprimento das forças de ligação. Logo todos os acabamentos são muito grosseiros. A única forma de um material se aproximar suficientemente de uma superfície rugosa é ele estando líquido, como ocorre nos adesivos (DA SILVA, 2007).

Alguns tratamentos superficiais como o jateamento e a silanização são utilizados para melhorar a rugosidade do substrato, proporcionando uma melhor ligação com o adesivo. Porém, deve-se respeitar as condições ideais de rugosidade de cada adesivo, para não atrapalhar a ligação com a rugosidade em excesso.

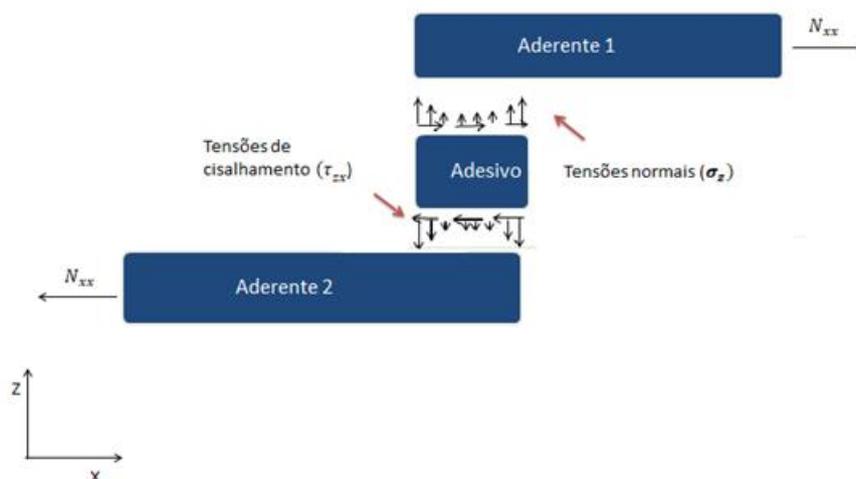
De acordo com Da Silva et al (2009), que analisou os efeitos do material, geometria, tratamento superficial nas juntas de cisalhamento simples, para as condições testadas, as seguintes conclusões foram obtidas:

- a) a resistência ao cisalhamento aumenta com o overlap (45,5% de contribuição);
- b) a resistência ao cisalhamento diminui quando a espessura do adesivo aumenta (18,9% de contribuição);
- c) a resistência ao cisalhamento aumenta quando a espessura do adesivo diminui (18,4% de contribuição);
- d) a resistência ao cisalhamento aumenta com a tensão de escoamento do material (3,8% de contribuição);
- e) o efeito do tratamento de superfície, durabilidade e velocidade do teste são insignificantes;
- f) a resistência ao cisalhamento aumenta quando a dureza diminui (5,5% de contribuição).

1.2.1.4 Estudo das tensões nas juntas

Conforme afirmado por De Souza (2013), para projetar as juntas coladas, necessita-se estimar o nível de esforços e tensões nos aderentes e no adesivo. Sabe-se que o papel do adesivo é transferir o carregamento entre as partes coladas por cisalhamento e resistir a esses esforços. Porém, em alguns tipos de juntas, o adesivo também está exposto a esforços de tração e compressão, além dos esforços cisalhantes. Trata-se de um fator preocupante, pois os adesivos são frágeis quando submetidos a esforços de tração. A junta de cisalhamento simples (SLJ) possui um nível acentuado de esforços de tração no adesivo, devido à excentricidade da carga, que faz surgir um momento secundário e induz tensões de tração no adesivo (σ_z) (DE SOUZA, 2013). A Figura 7 mostra as tensões atuantes em uma SLJ, ilustrando o aparecimento das tensões de cisalhamento e normais no adesivo.

Figura 9 - Esforços em uma junta de cisalhamento simples



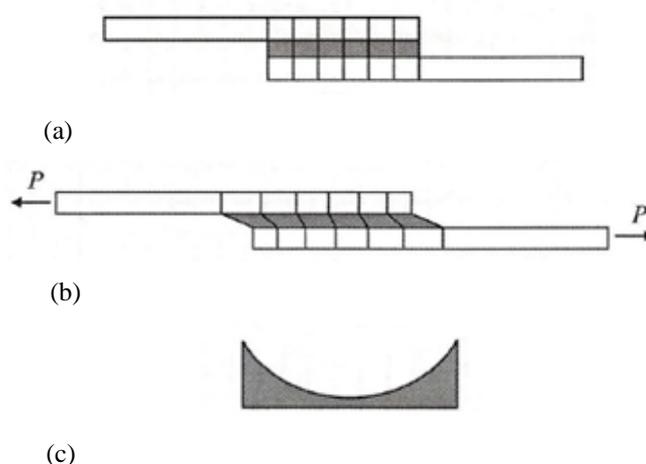
Fonte: Adaptado de RIBEIRO, 2009.

Como um material pode conter defeitos, sejam eles de fabricação ou não, esses defeitos podem ser propagados, atuando como concentradores de tensão e facilitando a geração de falhas.

Alguns modelos analíticos foram desenvolvidos para obter as tensões em juntas de carregamento simples. O modelo mais simples é o de Volkersen (1938). Esta análise considera apenas as tensões cisalhantes devido à deformação diferencial, e despreza as tensões normais devidas à flexão dos aderentes. Este modelo considera que os aderentes estão

submetidos a um carregamento de tração uniaxial e as tensões cisalhantes são analisadas apenas na camada do adesivo, que possui espessura uniforme e cujas extremidades são planas e normais à direção de aplicação da carga (BERRY, 2000). A figura 10 representa este modelo considerando os substratos elásticos, nota-se que ocorre uma distorção apenas nos paralelogramos que representam o adesivo na figura 10b. A figura 10c apresenta o esquema da solução analítica encontrada por Volkersen para a tensão de corte, sendo máxima nas extremidades da junta e mínima no meio (DA SILVA, 2007).

Figura 10 - Representação da análise de Volkersen



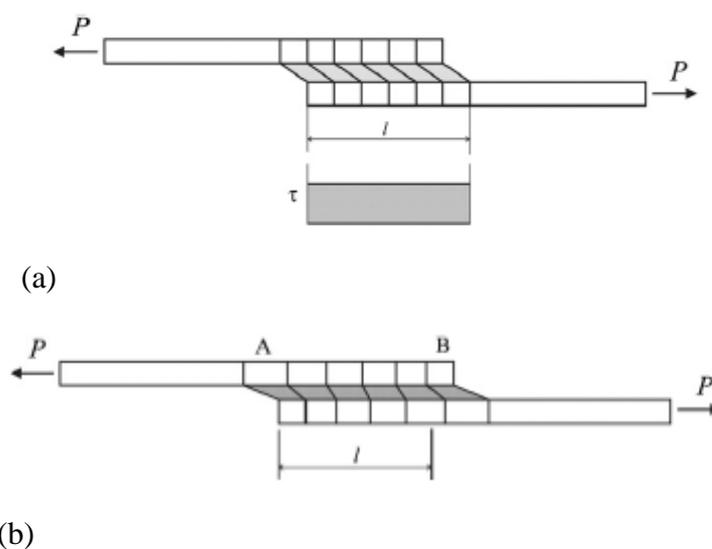
Fonte: Da Silva, 2007.

Legenda: (a) – Sem carga; (b) – Carregado; (c) – Tensão de corte no adesivo (τ).

Em juntas com camadas de adesivo relativamente flexíveis, tanto a tensão cisalhante quanto a tensão normal têm seus valores máximos na borda do sobreposto (BERRY, 2000).

Já as juntas compostas por substratos rígidos, ao ser carregada, não há deformação dos substratos. Não há ponto de tensões máximas e mínimas, seus valores são iguais para qualquer ponto da região colada. A Figura 9 mostra as deformações em juntas de cisalhamento simples com aderentes flexíveis e rígidos, respectivamente. A Figura 10 ilustra a distribuição da tensão de cisalhamento de Volkersen ao longo do comprimento de sobreposição da junta.

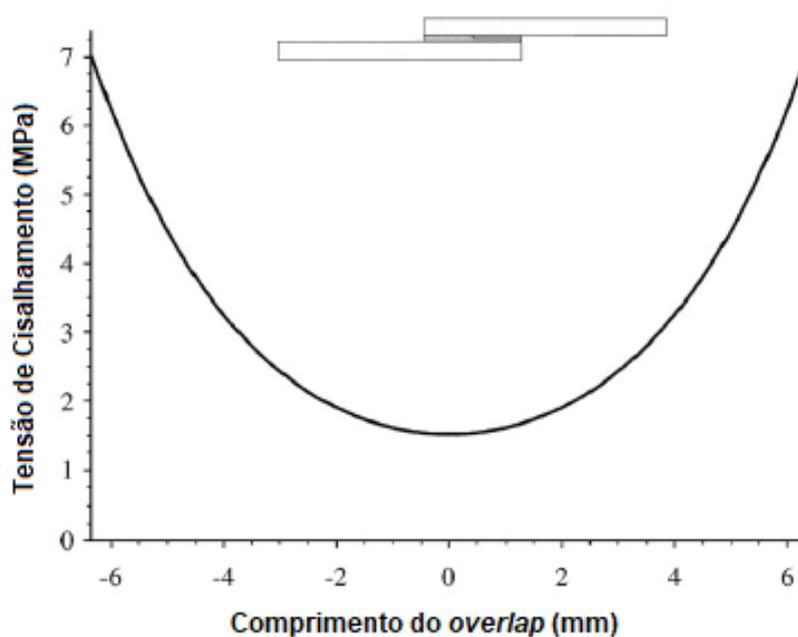
Figura 11 - Deformações em juntas de cisalhamento simples



Fonte: Da Silva et al, 2009.

Legenda: (a) – Deformações em junta de cisalhamento simples com aderente flexível; (b) – Deformação em junta de cisalhamento simples com aderente rígido.

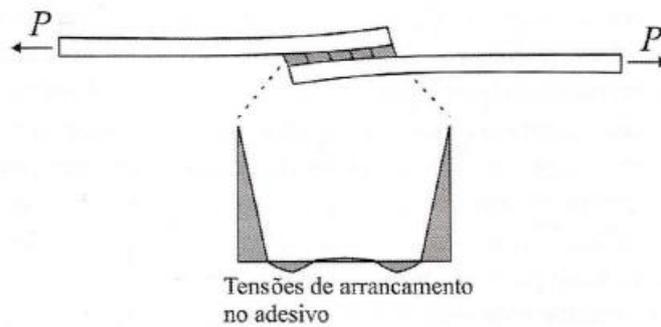
Figura 12 - Distribuição de tensão de cisalhamento de Volkersen



Fonte: Da Silva et. al, 2009.

A análise de Goland e Reissner possui resultados muito semelhantes aos de Volkersen em termos de tensão de corte. Além disso, esta análise permite obter as tensões transversais de arrancamento no adesivo, conforme apresentado na figura 10 (DA SILVA, 2007).

Figura 13 - Representação das tensões de arrancamento em uma SLJ



Fonte: Da Silva, 2007.

Outros diversos modelos foram propostos, porém não há necessidade de aprofundação nestes.

1.3 Fluência

A fluência é um fenômeno geralmente indesejável, que ocorre quando o material é submetido a uma tensão ou carga constante e gera uma deformação que depende do tempo e é permanente (CALLISTER, 2008). Existem duas situações importantes que podem ocorrer a fluência: baixos níveis de tensão durante um período de tempo longo ou elevados níveis de tensão em períodos curtos de tempo (DA SILVA, 2007).

A fluência ocorre em todos os materiais, mas para os metais, só possui importância para temperaturas acima de $0,4 T_f$ (temperatura de fusão) (CALLISTER, 2008). Para os compósitos e polímeros, diferente dos metais e cerâmicos, a temperatura não é um fator importante para ocorrer fluência, podendo ocorrer apenas pela aplicação de uma carga por um longo tempo. Portanto, a temperatura e a tensão possuem um papel importante na taxa de fluência (HIBBELER, 2010).

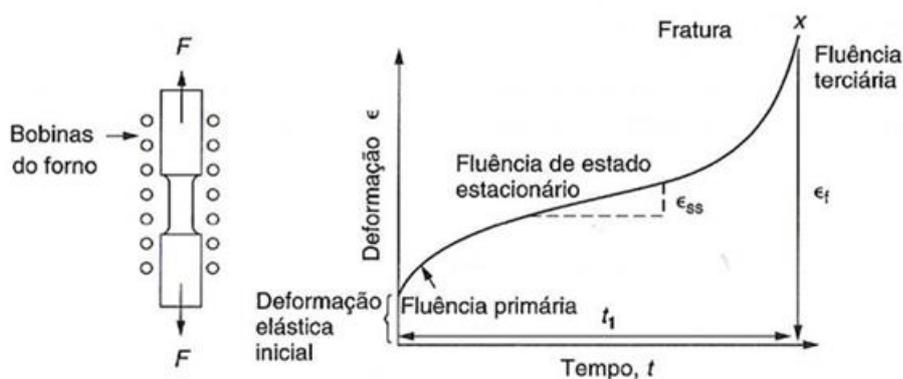
O foco deste trabalho é estudar o comportamento em fluência de juntas coladas com adesivos poliméricos. Devido à grande quantidade de estudo na área dos metais, em contraste com a escassez em juntas coladas, faremos uma breve revisão do estudo da fluência em metais. Desta forma, pode-se aproveitar alguns conceitos importantes que servem para outros materiais.

1.3.1 Ensaio típico de fluência em metais

O ensaio de fluência em metais consiste em manter a temperatura constante e sujeitar o corpo de prova a uma tensão ou carga constante, medindo a deformação pelo tempo (CALLISTER, 2008).

Os ensaios de fluência podem ser realizados mediante a um carregamento de tração ou compressão. Normalmente os materiais metálicos são ensaiados sob tração, mas os ensaios de compressão são utilizados em materiais frágeis. A Figura 8 representa um ensaio de fluência típico para metais, sob uma carga constante e mantendo em um forno com temperatura constante. Este ensaio está de acordo com a norma ASTM E 139 “*Standard Practice for Conducting Creep-Rupture Test of Metallic Materials*”- *Prática padrão para a realização do teste de fluência-ruptura de materiais metálicos*. Notam-se as regiões de fluência primária, secundária e terciária.

Figura 14 - Ensaio e curvas de fluência



Fonte: Adaptado de ASHBY, 2007.

As curvas de fluência normalmente são representadas em deformação por tempo. Segundo Ashby (2007), em uma curva de fluência, como na Figura 8, primeiramente observa-se a deformação elástica instantânea assim que a carga é aplicada, e posteriormente, três estágios bem distintos; a *fluência primária*, *secundária* e *terciária*. A *fluência primária* consiste em uma taxa de fluência decrescente (sendo indicada pelo declínio da curva de fluência com o tempo), sugerindo que o material está apresentando um encruamento (aumento

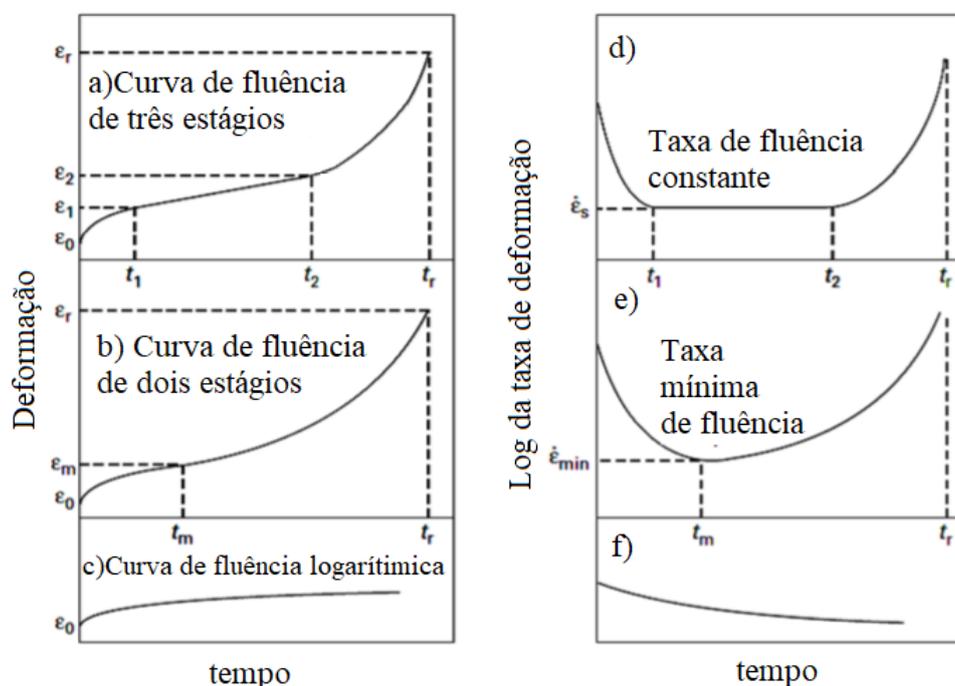
da resistência à fluência). A *fluência secundária* é uma taxa constante da curva de fluência, devido à um equilíbrio entre os processos de encruamento e recuperação, sendo a recuperação o fenômeno no qual o material se torna mais dúctil. A inclinação da região secundária é chamada de taxa de fluência mínima em regime estacionário, sendo o estágio mais importante em um ensaio de fluência, principalmente em aplicações de longo prazo e normalmente a região com maior duração. A *fluência terciária* consiste no estágio em que a velocidade de deformação é acelerada até ocorrer a ruptura do material.

O acúmulo de deformação ao longo do tempo após a fluência secundária é um fator preocupante para projetos que levam em conta a fluência (ASHBY, 2007).

Normalmente a resistência à fluência diminui para tensões ou temperaturas mais altas. Em períodos de tempo longos, é necessário realizar extrapolações nas curvas, o que exige certo conhecimento das propriedades de fluência do material utilizado (HIBBELER, 2010). O tópico 1.4.4 fala sobre a extrapolação de dados.

A Figura 9 apresenta na esquerda, três tipos de curvas de fluência à temperatura e carga de tração constante. Já na direita, as suas respectivas curvas de taxa de fluência.

Figura 15 - Curvas de fluência



Fonte: KAMIMURA, 2009.

Os resultados de ensaios de ruptura por fluência são apresentados na forma do logaritmo da tensão em função do logaritmo do tempo de vida até a ruptura

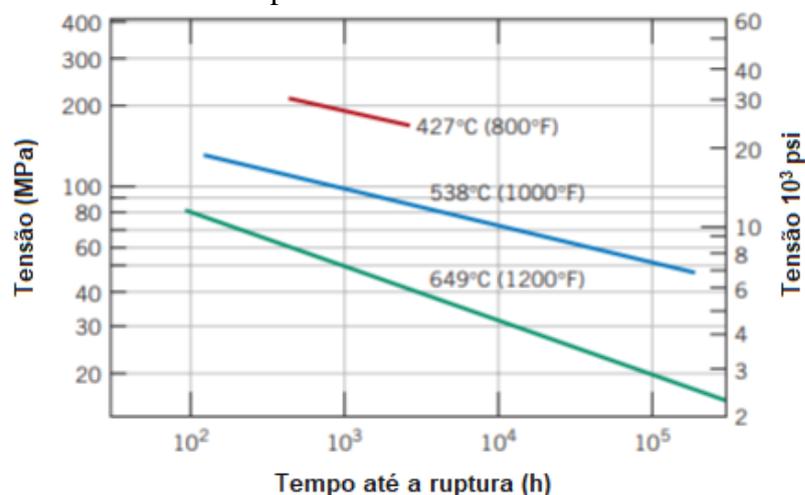
(CALLISTER,2008), como ilustra a Figura 10. A equação 1 apresenta uma reta escrita em escala logarítmica:

$$y = kx^n \quad (1)$$

Onde n é a inclinação da reta e k é igual a y quando x é 1.

A Figura 10 ilustra um gráfico da tensão (escala logarítmica) em função do tempo até a ruptura (escala logarítmica) para uma liga Ni-C em três temperaturas.

Figura 16 – Gráfico da tensão (escala logarítmica) em função do tempo até a ruptura (escala logarítmica) para uma liga Ni-C em três temperaturas

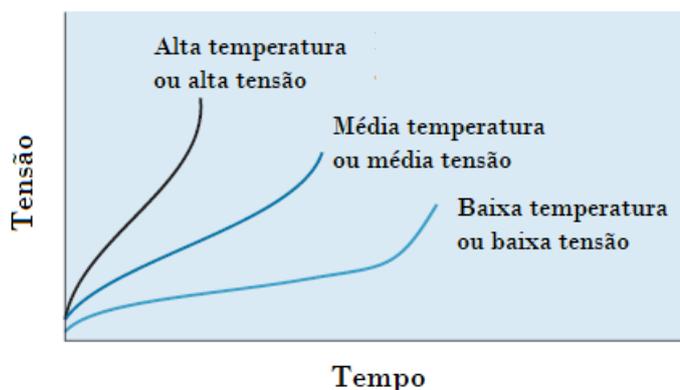


Fonte: CALLISTER, 2008.

1.3.2 Efeitos da temperatura e tensão em metais

O comportamento de um material submetido à fluência será alterado pela temperatura e tensão. Ao aumentar uma dessas variáveis, as seguintes modificações ocorrerão: a) aumento da deformação instantânea ao aplicar a tensão; b) aumento da taxa de fluência no estágio secundário; c) diminuição do tempo de vida até a falha (CALLISTER, 2008). A Figura 11 ilustra a influência da tensão e temperatura de um material sob fluência em função do tempo de vida.

Figura 17 - Influência da tensão e da temperatura sob a fluência em um material em função do tempo de vida



Fonte: ASKELAND, 2010.

Conforme afirmado por Holdsworth (2008), não há uma única equação para representar a deformação por fluência de todos os materiais e em toda a faixa de temperatura. A equação que modelará a deformação por fluência primária, secundária e terciária, para uma dada aplicação, pode variar de acordo com a distribuição de dados e com as características do material.

Dentre as diversas leis de fluência existentes, a mais utilizada é a lei de potência de Norton, pois possui uma análise de tensões mais simples. Independente da tensão, a função possui o mesmo formato (PENNY, 1995). Relações empíricas foram desenvolvidas, onde a taxa de fluência secundária é expressa como função da tensão e temperatura conforme a equação 2, chamada lei de Norton:

$$\dot{\epsilon}_r = K_1 \sigma^n \quad (2)$$

Onde K_1 e n são constantes para um dado material, onde n é a inclinação da reta do logaritmo da tensão (σ) pelo logaritmo da taxa de fluência ($\dot{\epsilon}_r$).

Quando inclui a influência da temperatura, a fórmula torna-se a equação 3:

$$\dot{\epsilon}_r = K_2 \sigma^n \exp\left(-\frac{Q_f}{RT}\right) \quad (3)$$

Onde K_2 e Q_f são constantes, Q_f é a energia de ativação por fluência, R é a constante universal dos gases e T a temperatura.

O valor do expoente n na equação 3 dependerá de alguns fatores, como difusão nos contornos de grão, difusão por lacunas induzidas por tensão, o escorregamento de contorno de grão e movimento de discordâncias (CALLISTER, 2008).

1.3.3 Fluência em polímeros

Segundo Freire (2015), uma boa parte dos adesivos são poliméricos e, portanto, viscoelásticos. Quando sujeitos a cargas permanentes não basta conhecer a resistência estática da junta para caracterizar corretamente a sua capacidade de carga a longo prazo. É importante conhecer a resistência das juntas adesivas à fluência.

Os polímeros em geral mostram efeitos de fluência com tensões e temperaturas muito menores do que cerâmicas e metais. Isso ocorre devido às suas fracas forças de Van der Waals. Nos polímeros, a deformação dependente do tempo é importante mesmo à temperatura ambiente. Dois termos são usados para descrever o comportamento dependente do tempo dos polímeros: fluência e relaxamento da tensão. Na fluência, aplica-se uma tensão constante, e a resposta da tensão é medida em função do tempo. No relaxamento da tensão, aplica-se um esforço constante, e a resposta é medida em termos de uma diminuição da tensão em função do tempo (MEYERS and CHAWLA, 2009).

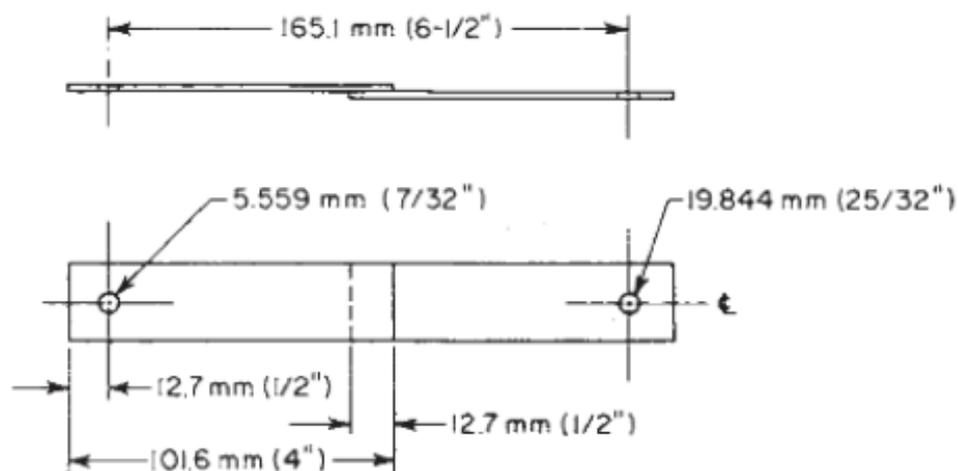
É bem conhecido que uma alteração da temperatura tem um efeito dramático nas propriedades mecânicas dos polímeros, porque é esperada uma mobilidade molecular mais elevada a temperaturas elevadas. A temperatura de transição vítrea (T_g), observada apenas nos materiais poliméricos, indica a mudança estrutural entre o estado vítreo e o estado emborrachado. A T_g é considerada uma temperatura de referência crítica para avaliar o desempenho mecânico de polímeros (FENG, 2004). Descobertas anteriores mostraram que o módulo de tensão da resina epóxi pode cair drasticamente quando as temperaturas se aproximam de T_g . Estes resultados sugerem que as respostas viscoelásticas dos materiais tornam-se essencialmente não lineares quando a temperatura está próxima de T_g e a temperatura de serviço dos adesivos epóxi deve ser estritamente limitada por esta temperatura de transição (MIRAVALLÉS, 2007). Importante ressaltar a necessidade de realizar testes de fluência abaixo da T_g para observar o comportamento dos materiais poliméricos.

1.3.4. Normas para o ensaio de fluência (ASTM D 2294 e ASTM D 1002)

Meios para determinar as propriedades de deformação e ensaiar os aderentes metálicos unidos por adesivos sob fluência em um aparelho de teste estão presentes na norma ASTM D

2294. Os corpos de prova devem estar em conformidade com a forma e as dimensões mostradas na Figura 12. Os corpos de prova presentes na norma ASTM D 2294 são similares aos descritos na norma ASTM D 1002, exceto nos furos mostrados na Figura 12. Ideal testar pelo menos três amostras para cada conjunto de condições de carga, tempo e temperatura.

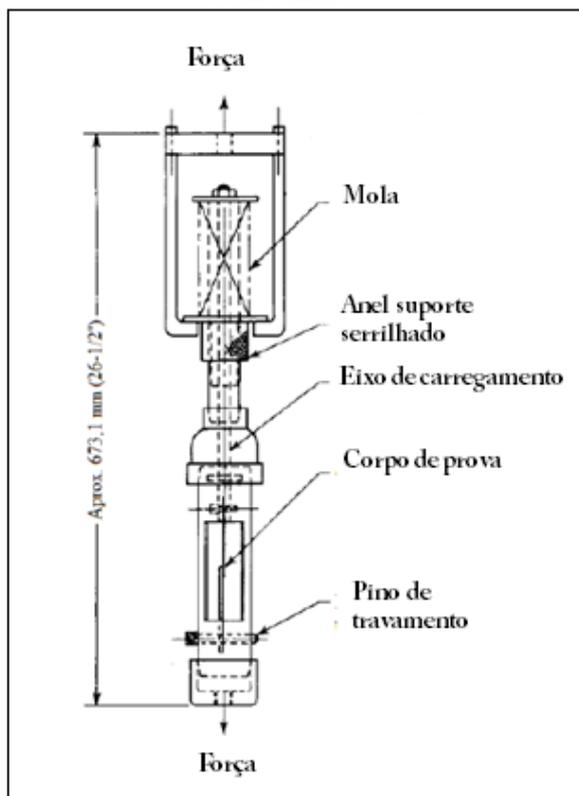
Figura 18 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de fluência



Fonte: ASTM D 2294, 1996.

O aparelho de teste definido pela norma ASTM D 2294, conforme mostrado na Figura 13 deve consistir de uma câmara de carregamento oca, uma mola que resiste à altas temperaturas e uma haste de extensão sólida com provisões para a fixação de corpos de prova. Este método de teste é aplicável à faixa de temperatura de -55 a + 260 ° C. Utiliza-se um microscópio calibrado para ler as medições das deformações das juntas.

Figura 19 - Equipamento para o ensaio de fluência



Fonte: Adaptado de ASTM D 2294, 1996.

O equipamento necessita ser anexado a uma máquina de ensaios universal. Depois de alcançar a carga desejada, deve-se girar o anel de suporte serrilhado para fazer contato com o disco apoiando a mola comprimida. Após o ensaio, a máquina de ensaio pode ser descarregada, todo o aparato de teste de fluência da máquina removido e colocado em condições ambientais apropriadas. Métodos para monitorar a deformação da junta e seus intervalos de execução estão descritos na norma. Durante o ensaio, esse aparelho não prevê um monitoramento da carga aplicada ao corpo de prova.

O equipamento utilizado neste trabalho para os testes de fluência não foi o especificado na norma, porém as indicações da norma foram respeitadas sempre que possível.

1.3.5 Métodos de extrapolação de dados

Os fenômenos de fluência são demorados, logo é complicado fazer uma previsão da resposta através da realização de ensaios experimentais. Uma solução é fazer ensaios de curta duração e recorrer a métodos que permitam fazer uma extrapolação dos resultados para tempos mais longos (DA SILVA, 2007).

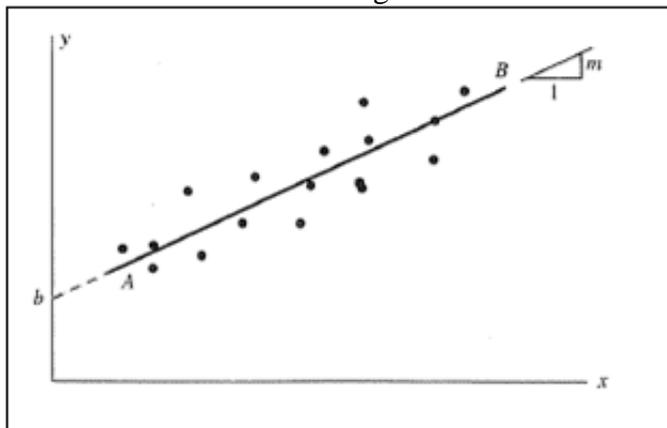
O tema central da ciência e engenharia de materiais é o triângulo estrutura-propriedade-desempenho. A correlação entre propriedades e desempenho em fluência é muito crítica, pois para determinadas aplicações queremos conhecer o desempenho durante um período prolongado (da ordem de anos), enquanto as propriedades (taxa de fluência secundária ou tensão de ruptura) são conhecidas por testes realizados em períodos de tempo menores. Diversos métodos de extrapolação foram desenvolvidos, buscando prever o desempenho de ligas com base em testes realizados em períodos mais curtos (CHAWLA and MEYERS, 2009).

De acordo com Queiroz (2013), para exposições prologadas, são utilizados ensaios de fluência ou ruptura por fluência em temperaturas acima das necessárias, tempos mais curtos e sob um nível de tensão comparável. Dessa forma, pode-se realizar uma extrapolação apropriada para as condições reais de serviço.

1.3.5.1 Técnica de Regressão Linear

De acordo com Budynas e Nisbett (2008), regressão linear é um processo de análise estatística que tem como objetivo obter uma reta que melhor se ajuste a um conjunto de dados. A melhor opção de ajuste é quando a reta minimiza os quadrados dos desvios dos dados obtidos por ela. A Figura 14 mostra um exemplo de um conjunto de pontos de dados aproximados pela reta de regressão AB.

Figura 20 - Conjunto de dados aproximados pela reta de regressão AB



Fonte: BUDYNAS e NISBETT, 2008.

A equação padrão de uma reta é apresentada na equação 4:

$$y = mx + b \quad (4)$$

Onde m é a inclinação da reta e b é a interseção com o eixo y . Considera-se um conjunto N de dados (x_i, y_i) . De forma geral, a reta que melhor se aproxima não irá passar por nenhum ponto do conjunto de dados. Logo, tem-se a equação 5:

$$y_i = mx_i + b + \epsilon_i \quad (5)$$

Onde $\epsilon_i = y_i - y$ é o desvio entre o dado e a reta. A soma dos quadrados dos desvios está apresentada na equação (6):

$$\epsilon = \sum \epsilon_i^2 = \sum (y_i - mx_i - b)^2 \quad (6)$$

Ao minimizar ϵ , a soma dos erros elevado ao quadrado, para se obter um ponto mínimo estacionário, exige que $\delta\epsilon/\delta m = 0$ e $\delta\epsilon/\delta b = 0$. Como resultado tem-se duas equações simultâneas para a inclinação e intersecção no eixo y , chamadas \hat{m} e \hat{b} . Ao resolver essas equações obtemos as equações 7 e 8:

$$\hat{m} = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{\sum x_i y_i - N \bar{x} \bar{y}}{\sum x_i^2 - N \bar{x}^2} \quad (7)$$

$$\hat{b} = \frac{\sum y_i - \hat{m} \sum x_i}{N} = \bar{y} - \hat{m} \bar{x} \quad (8)$$

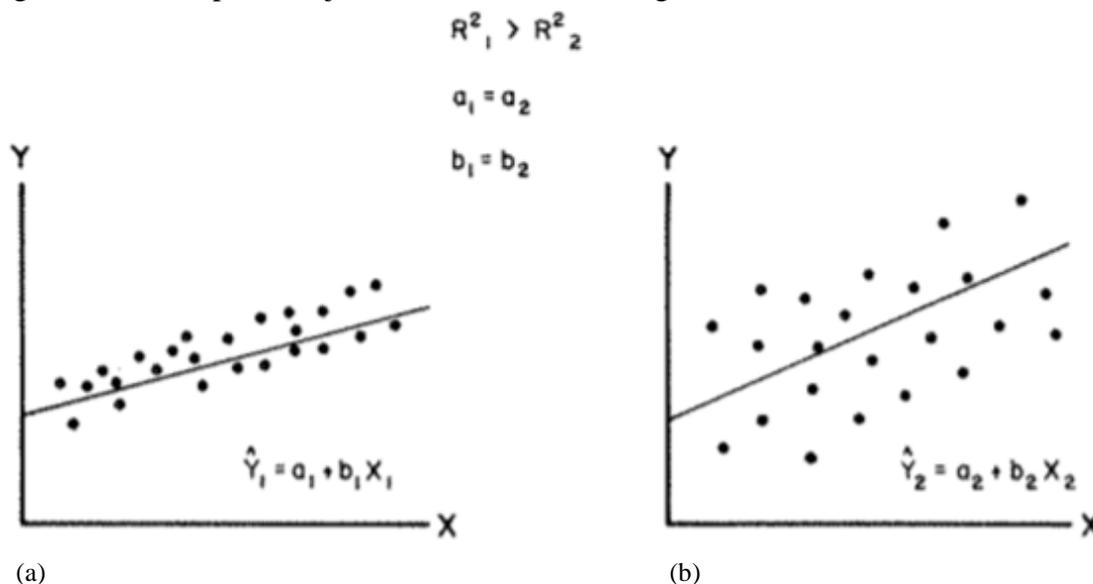
Esta teoria foi adaptada para a escala logarítmica. Sendo a equação padrão da reta em escala logarítmica dada na equação 1 (\hat{n} é o coeficiente de inclinação e \hat{k} é a intersecção com x igual a 1). Logo, temos as equações 9 e 10.

$$\hat{n} = \frac{N \sum [\log x_1 \cdot \log y_1] - \sum [\log x_1 \cdot \log y_1]}{N \sum [\log x_1^2] - [\sum \log x_1]^2} \quad (9)$$

$$\hat{k} = \frac{\sum \frac{y_1}{x_1^{\hat{n}}}}{N} \quad (10)$$

Em uma análise de regressão, é desejável que o R^2 seja alto, pois um R^2 bem alto é essencial para que as previsões sejam precisas. Supõe-se que sejam estimadas os mesmos modelos de regressão bivariáveis para dois exemplos de populações diferentes, 1 e 2. O R^2 do exemplo 1 (Figura 21-a) pode divergir do exemplo 2 (Figura 21-b), embora as estimativas dos parâmetros para cada uma sejam exatamente as mesmas. A mesma equação fornece o melhor ajuste possível para ambos os exemplos, mas é menos satisfatório no exemplo 2. Nota-se que ao comparar a Figura 21(a) com a Figura 21(b), que os pontos são agrupados mais fortemente em torno da linha de regressão da Figura 21(a), indicando que o modelo se ajusta melhor aos dados (LEWIS-BACK, 1980).

Figura 21 - Exemplos de ajustes em uma linha de regressão



Fonte: LEWIS-BACK, 1980.

Legenda: (a) Exemplo 1; (b) Exemplo 2.

1.3.5.2 Parâmetro Larson-Miller

Para aumentar a confiabilidade dos dados encontrados na equação 1, faz-se necessário uma outra técnica que reforce as tendências que foram observadas anteriormente. Uma solução seria a realização de testes de fluência e/ou ruptura por fluência em no mínimo dois níveis de temperatura (QUEIROZ, 2013).

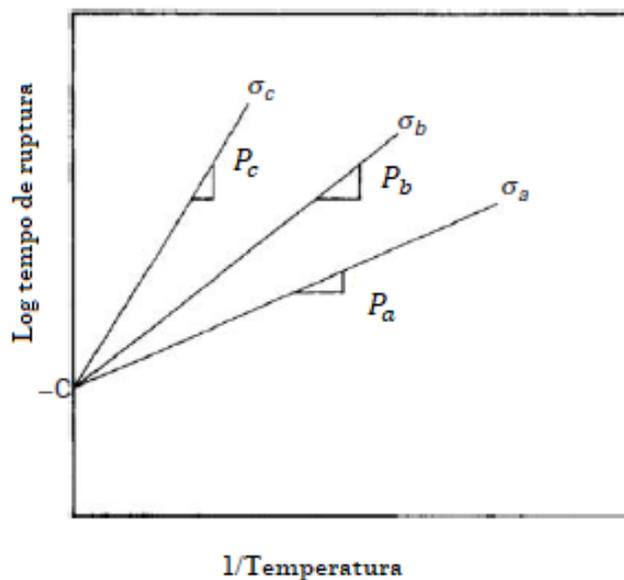
Conforme Castro (2013), uma das técnicas de extrapolação de dados mais usadas é a de Larson-Miller, que incorpora tempo, tensão e temperatura em uma única expressão e é válida para o estágio secundário de fluência. Essa técnica foi desenvolvida na década de 1950, quando Larson e James Miller, trabalhadores da General Electric Company na época, realizavam uma pesquisa sobre a vida de pás de turbinas. Segundo Chawla and Meyers (2009), uma representação desse parâmetro é mostrada na equação 11.

$$P = T(C + \log t_r) \quad (11)$$

Onde P é o parâmetro de Larson-Miller, T é a temperatura em Kelvin, t_r é o tempo até a ruptura em horas. A constante C (normalmente em torno de 20) é determinada para uma liga específica, podendo ser encontrada em um único teste.

A partir deste resultado, pode-se encontrar os tempos de ruptura a qualquer temperatura, desde que a mesma tensão de engenharia seja aplicada. Observa-se na Figura 16 que o tempo de ruptura diminui com a temperatura a uma tensão constante, indicando esquematicamente a família de linhas para diferentes níveis de tensão. Esta figura é a representação gráfica da Equação 11. Pode ser visto na Figura 16 que C não depende da tensão e é a interseção das várias linhas. Por outro lado, cada linha tem uma inclinação diferente P, que depende da tensão (CHAWLA and MEYERS, 2009) e (CALLISTER, 2008). A Figura 17 mostra o parâmetro Larson-Miller para uma liga S-590, baseada em Fe (C = 17) para vários níveis de temperatura.

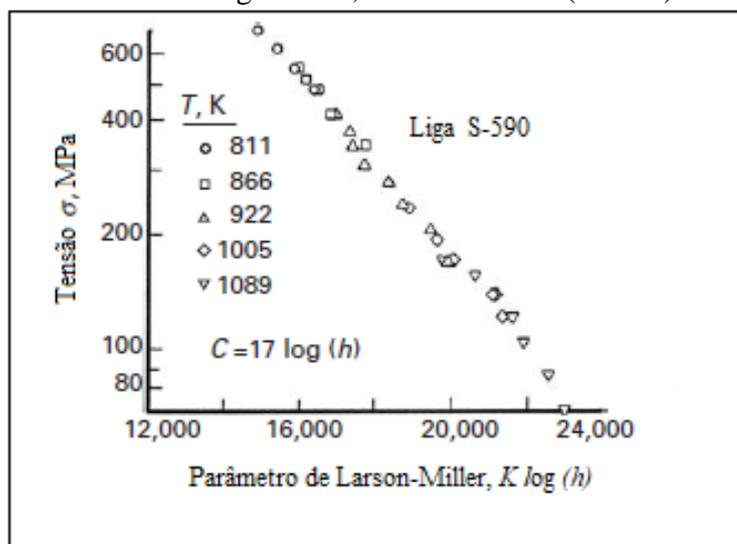
Figura 22 - Relação entre tempo de ruptura e três níveis de tensão, utilizando a equação de Larson-Miller



Nota: $\sigma_a > \sigma_b > \sigma_c$

Fonte: CHAWLA AND MEYERS, 2009.

Figura 23 - Gráfico para o parâmetro Larson-Miller para uma liga S-590, baseada em Fe (C = 17)



Fonte: GOLDHOFF, 1959.

1.4 Equipamento Pneumático de Fluência (EPF)

O ensaio convencional de fluência garante baixa reprodutividade, pois permite poucos ensaios por vez, garantindo assim baixa confiabilidade dos dados estatísticos. O Laboratório de Adesão e Aderência (LAA) criou o Equipamento Pneumático de Fluência, capaz de testar até 10 espécimes diferentes de uma só vez, garantindo uma maior precisão nos dados estatísticos. Os ensaios são realizados ao mesmo tempo, e quando uma das juntas se rompe, a mesma pode ser substituída em alguma das unidades de ensaio, por outra que precise ser testada, não interferindo nos resultados do ensaio. A Figura 18 mostra o EPF.

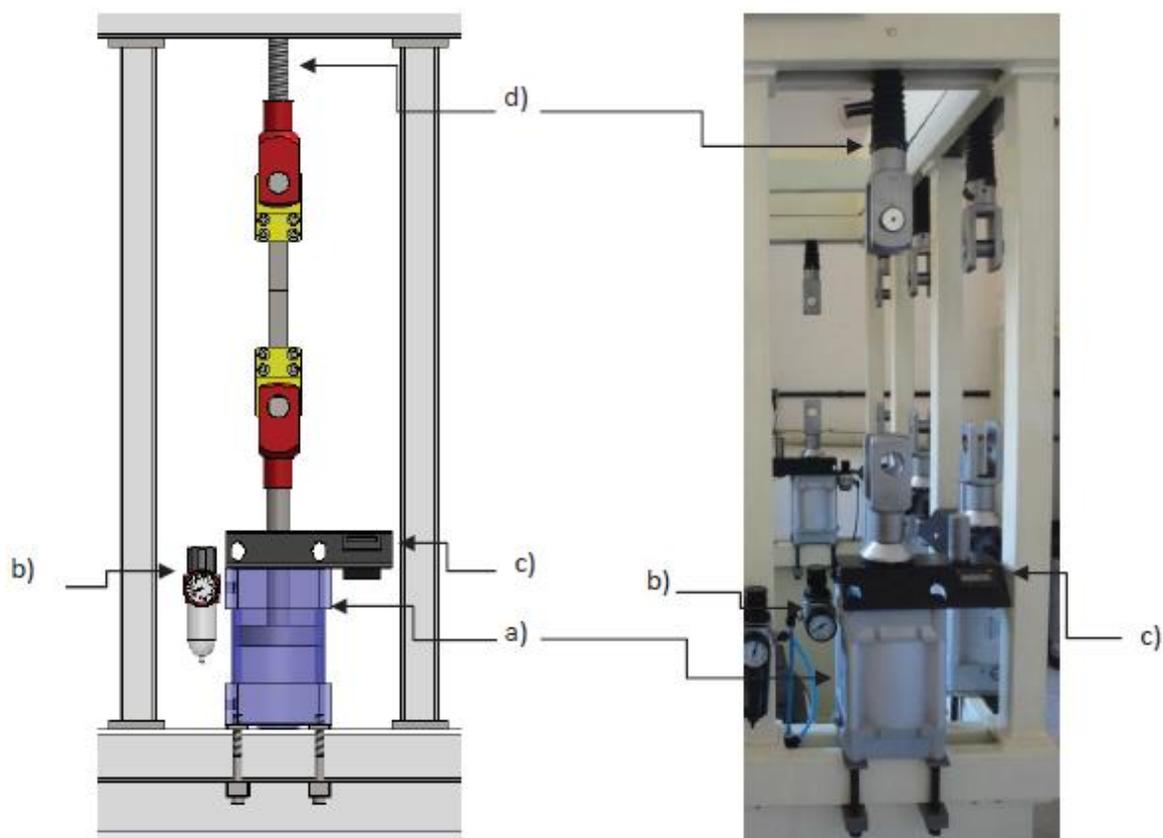
Figura 24 - Equipamento Pneumático de Fluência (EPF)



Fonte: A autora, 2019.

A Figura 19 mostra cada unidade de ensaio da máquina.

Figura 25 – Divisão de partes em cada unidade de ensaio.



Fonte: Queiroz, 2013.

Queiroz (2013), descreve que o equipamento é dividido nas seguintes partes, iguais para as 10 espécies, Figura 25:

- a) cilindro pneumático - Figura 19(a) - que com a pressão fornecida, realiza a tração na peça;
- b) controlador de pressão - Figura 19(b) - composto por um regulador e um manômetro analógico, que ajusta a força que será aplicada na junta, ao ajustar a pressão;
- c) contador de horas - Figura 19(c) - um sensor é acionado no momento em que o corpo de prova é rompido, indicando o término daquele ensaio;
- d) garra superior - Figura 19 (d) - podendo ser ajustada de acordo com o tamanho do corpo de prova a ser ensaiado.

A figura 26 ilustra de forma aproximada cada parte do equipamento.

Figura 26 - Partes de cada unidade de ensaio



(a)



(b)



(c)



(d)

Legenda: (a) – Contador de horas; (b) – Cilindro Pneumático;

(c) – Controlador de Pressão; (d) – Garra superior;

Fonte: A autora, 2019.

Algumas observações:

- a) carga máxima suportada por cada unidade de teste: 1200 kg (12000 N);
- b) este equipamento não possui um controle de monitoramento da temperatura, nem um sistema para medir o deslocamento da junta, avaliando o tempo de vida dos ensaios até a ruptura;
- c) a máquina possui um reservatório de ar que a mantém independente da linha de alimentação, pois caso ocorra algum problema no fornecimento de ar, os testes não sejam interrompidos;
- d) o projeto do equipamento foi adequado pelas normas ASTM D 1002 e ASTM D 638M para juntas padronizadas

- e) a pressão é ajustada manualmente para cada unidade de ensaio. O manômetro trabalha em uma faixa de pressão de 0,4 a 10 bar;
- f) a velocidade adequada para o ensaio de tração das juntas de cisalhamento, de acordo com a norma ASTM D 1002 está na faixa de 80 a 100 kgf/cm² por minuto.

O EPF converte a pressão pneumática de entrada em força aplicada nos corpos de prova. Essa força depende da área útil e da pressão exercida, como a área útil permanece inalterada, ajusta-se a pressão para variar a tensão de tração do ensaio.

1.4.1. Alguns parâmetros de ensaio

Queiroz (2013) afirma que a pressão indicada no manômetro pode ser convertida em força resultante que atua no corpo de prova, de acordo com a equação 12:

$$F_1 = P \cdot k_1 \cdot A_{pis} \quad (12)$$

Onde:

F_1 = força na haste do pistão [kgf];

P = pressão registrada pelo manômetro [bar];

A_{pis} = área útil do pistão sob pressão [mm²];

k_1 = constante de conversão, $1,02 \times 10^{-2}$ [kgf/mm².bar];

Queiroz (2013) desenvolveu a equação 12, obtendo a constante C_1 , que relaciona a pressão mostrada no manômetro com a força resultante no corpo de prova. A área útil (A_{pis}) é em função do diâmetro do pistão (125 mm) menos o diâmetro da haste (32 mm), pois cada cilindro traciona o corpo de prova. Logo, $A_{pis} = 11468,0$ mm². Ao multiplicar o fator de conversão (k_1) pela área (A_{pis}), obtém-se a constante $C_1 = 117$ kgf/bar, conforme a equação 13.

$$F_1 = P \cdot C_1 \quad (13)$$

Conforme informado na ASTM D 1002, a área padrão da região colada (A_{cp}) deve medir 25,4 mm de largura por 12,7 mm de comprimento, assim A_{cp} corresponde a 322,58

mm². Queiroz (2013) também relacionou a pressão registrada no manômetro (p) com a tensão de cisalhamento no corpo de prova (τ), conforme a equação 14:

$$\tau = \frac{P \cdot A_{pis} \cdot k_2}{A_{cp}} \quad (14)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento do corpo de prova [MPa];

k_2 = constante de conversão, $1,0 \times 10^{-1}$ [MPa/bar];

Então, pela equação 13, obtemos a constante $C_2=3,55$ MPa/bar que relaciona a pressão p [bar] registrada no manômetro com a tensão de cisalhamento τ [MPa] resultante no corpo de prova, como mostra a equação 15:

$$\frac{\tau}{p} = \frac{k_2 A_{pis}}{A_{cp}} = C_2 \quad (15)$$

1.5 Método de Elementos Finitos (Finite Element Method - FEM)

Nos últimos anos, o método dos elementos finitos tornou-se uma ferramenta amplamente aceita para a análise estrutural. A vantagem do método dos elementos finitos é a possibilidade de modelar e analisar estruturas de engenharia com geometrias complexas, vários tipos de cargas e condições de contorno (NAUMENKO and ALTENBACH, 2007).

A análise por elementos finitos é um método computacional muito usado para a simulação numérica, consistindo em dividir a estrutura em elementos elásticos pequenos e bem definidos (podendo esta divisão ser triangular, trapezoidal, dentre outras). Esses elementos divididos são interligados por meio de nós, onde são estabelecidas e atribuídas as propriedades elásticas dos materiais, e são aplicadas as forças. As cargas aplicadas são especificadas, assim como as condições de contorno e, por meio de operações matriciais, são determinados os graus de liberdade de deslocamento desconhecidos. Com esses deslocamentos então, pode-se determinar tensões e resistências utilizando as equações de elasticidade constitutivas. Logo, é possível analisar cada pedaço do material separadamente e

após, realizar uma análise do total (BUDYNAS and NISBETT, 2008), (KAWAKAMI, 2011). O MEF consiste no método numérico mais utilizado em juntas adesivas.

Para utilizar o MEF é necessário criar uma malha, que é a rede de elementos e nós que discretiza uma região. Ao colocar mais elementos em uma região, aumenta-se a densidade da malha. Quando, com o objetivo de melhorar os resultados, a malha é alterada de uma análise modelo para a análise seguinte, dá-se o nome de refinamento de malha (BUDYNAS e NISBETT, 2008).

Diversos estudos apresentam uma concordância entre os resultados do método de elementos finitos e os analíticos. Como exemplo, tem-se os estudos de Shih-Chuan, (1999) que realizou uma análise da tensão em uma junta do tipo single-lap com dois compósitos como substrato. Os estudos de Neto (2017) também obtiveram uma boa concordância entre o método de elementos finitos e o experimental, ao variar a largura e o comprimento de colagem em juntas de cisalhamento simples e juntas de carregamento combinado para analisar as suas resistências.

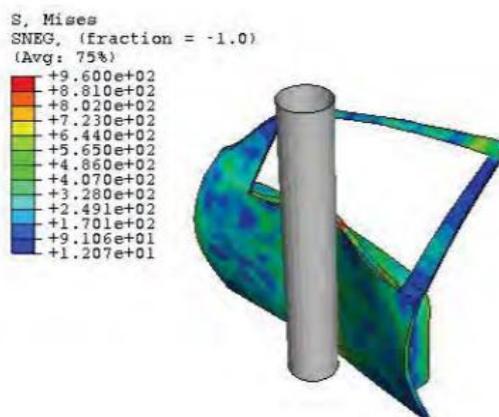
Alguns programas como Abaqus® (utilizado neste trabalho), ANSYS, COSMOS, MARC etc. foram desenvolvidos para resolver vários problemas em mecânica dos sólidos (NAUMENKO and ALTENBACH, 2007).

1.5.1 Abaqus®

Um software comercial que possibilita a utilização do método de elementos finitos (MEF) para a modelagem é o Abaqus®, que foi desenvolvido pela Dassault System's.

Conforme afirmado por Kawakami (2011), devido à grande demanda de novos materiais e novos sistemas utilizados nas indústrias automobilísticas e aeronáuticas, o Abaqus® possui ampla utilização nesses ramos. A sua interface facilita fazer uma simulação numérica, a grande quantidade de modelação de materiais diferentes possibilita simular diversas situações. A Figura 21 mostra um exemplo da modelagem de uma porta de carro no Abaqus®

Figura 27 - Exemplo de uma porta de carro modelada no Abaqus®

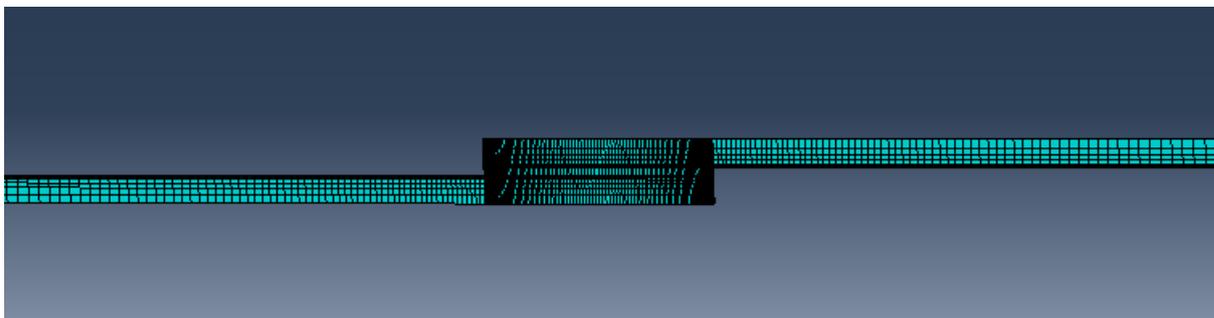


Fonte: ABAQUS MANUAL, 2009.

Para a simulação das deformações plásticas nas juntas coladas, a definição de modelos para o adesivo é necessária, assim como em alguns casos para o aderente. Em substratos metálicos pode ser aplicado o critério de falha de Von Misses. Existem duas formas de modelar as juntas coladas com adesivos, em duas dimensões (2D) e em três dimensões (3D). O estado plano de deformação é usado quando se tem a largura muito maior que a espessura, que ocorre em juntas de cisalhamento simples, onde as deformações na direção da espessura são consideradas nulas (NETO, 2017). Nessa dissertação é utilizada a análise em 2D, pois o esforço e tempo para a análise em 3D é maior, apesar da maior exatidão dos resultados.

A Figura 22 mostra a malha de elementos finitos no Abaqus® para a junta utilizada neste trabalho, em 2D. Já a Figura 23 ilustra o exemplo de uma malha de elementos finitos no Abaqus® para uma junta em 3D.

Figura 28 - Malha de elementos finitos utilizada no Abaqus® para junta de cisalhamento simples (em 2D)



Fonte: A autora, 2019.

Figura 29 - Exemplo de malha em uma junta de cisalhamento simples em 3D no Abaqus®



Fonte: ZEHS AZ, 2014.

1.5.1.1 Leis para o estudo de fluência no Abaqus® (leis de potência)

A lei de potência (*power-law model*) é muito utilizada no Abaqus®, um modelo de fluência que leva em consideração a tensão diferencial (σ) e o tempo (t). Dentro da lei de potência existe a teoria de endurecimento por deformação (*strain-hardening*) e a teoria de endurecimento por tempo transcorrido, (*time-hardening*). A teoria de endurecimento por deformação é mais utilizada quando ocorre variações no estado de tensões e a teoria de endurecimento por tempo transcorrido é mais usada quando a tensão permanece constante. No caso deste trabalho, como a tensão permanece constante, foi utilizada a teoria de endurecimento por tempo transcorrido. O modelo “*power-law model*” do Abaqus® é representado na equação 16 (CAVALCANTE E RAMOS, 2010).

$$\varepsilon = K\sigma^c t^b T^a \quad (16)$$

Onde é σ a tensão diferencial, T é a temperatura, t o tempo, ε a deformação transiente de fluência, K , c , b e a constantes empíricas.

Cavalcante (2012) faz uma breve comparação entre as teorias, afirmando que a Teoria de Endurecimento por Tempo Transcorrido tem sido mais utilizada devido à sua simplicidade matemática, porém a Teoria de Endurecimento por Deformação geralmente apresenta resultados melhores para prever a deformação por fluência tanto para metais quanto para plásticos. Como a teoria de endurecimento por tempo transcorrido é a mais utilizada e foi a teoria usada no trabalho, será a única abordada nesta dissertação.

1.5.1.1.1 Lei de endurecimento pelo tempo transcorrido (*time-hardening*)

O modelo de potência proposto pelo Abaqus® leva em consideração a tensão diferencial (σ) e o tempo (t). A equação 17 apresenta a lei de endurecimento por tempo transcorrido. (CAVALCANTE, 2012).

$$\dot{\varepsilon} = A\tilde{q}^n t^m \quad (17)$$

Onde $\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deformação equivalente uniaxial de fluência ($\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$);

ε é a deformação equivalente uniaxial de fluência;

\tilde{q} é a tensão equivalente uniaxial desviadora;

t é o tempo total;

A , n e m são constantes definidas em função da temperatura;

A constante m precisa estar compreendida entre -1 e 0 e as constantes A e n devem ser positivas para que a deformação no tempo tenha significado.

Como condição inicial, \tilde{q} sendo uma tensão diferencial constante ao longo do tempo e resolvendo a equação diferencial (17), chega-se na equação 18.

$$\varepsilon = \frac{(t^{m+1}) \cdot Aq_c^n}{m+1} \quad (18)$$

Cavalcante (2012), aconselha utilizar o modelo de endurecimento pelo tempo transcorrido para prever deformações em tempos muito longos, onde o estado de tensões varia mais lentamente. O cálculo da taxa de deformação dependerá da atualização das variáveis naquele dado instante.

Conforme Cavalcante e Ramos (2010) afirmam, os dados de entrada para determinar os parâmetros de fluência da equação do Abaqus® são as deformações obtidas nos ensaios de fluência, a tensão diferencial (MPa) e faixa de extração da fluência estacionária (h). O resultado para a equação de fluência do Abaqus® são os parâmetros A , n e m .

O método de elementos finitos é uma ferramenta poderosa para prever o comportamento das juntas adesivas. No entanto, para realizar análises confiáveis, modelos adequados de materiais e dados precisos das propriedades dos materiais são requeridos.

Lubowiecka et al, (2012) realizou experimentos e modelagem no Abaqus® para materiais hiperelásticos (adesivos e aderentes) em juntas de cisalhamento simples. Dois tipos de aderentes, alumínio e poliuretano foram utilizados com um adesivo elástico (adesivo com base de polímero silano modificado). Foi observada uma boa concordância entre o experimental e numérico. Foi observado que quanto maior a espessura do aderente, menor a deformação da junta antes de falhar.

2 METODOLOGIA

Os ensaios realizados nesta dissertação seguiram uma recomendação técnica para a produção dos CPs e ensaios, RT TMEC 003/08 – “*Qualificação de Adesivo para Reparo Estrutural*”, da Petrobrás. Recomendação esta criada pelo Laboratório de Adesão e Aderência (LAA) do IPRJ-UERJ, em parceria com o CENPES.

Foram empregadas 3 amostras no mínimo para cada condição de ensaio, em conformidade com a norma ASTM D 1002, usada para a fabricação dos corpos de prova. Porém em casos com maior dispersão dos resultados, utiliza-se uma quantidade maior destes corpos de prova.

A tensão de ruptura foi obtida pela Máquina de Ensaio Universal AG-X plus SHIMADZU disponibilizada pelo TECPOL do IPRJ em paralelo com o EPF. Após a determinação da tensão máxima, foram realizados ensaios de fluência no EPF para as juntas coladas com ambos os adesivos.

Foi utilizado o jateamento como tratamento superficial nos corpos de prova, devido à padronização dos ensaios para fins de comparações entre os adesivos testados no trabalho e os testados anteriormente no LAA. Foi utilizado o lixamento apenas para dois lotes do Masterpur Estrutural 300®, com a finalidade de realizar comparações entre esta técnica de preparação da superfície e o jateamento.

Os lotes foram separados de acordo com a colagem, sendo cada lote composto por 10 juntas.

Após adquiridos os resultados, foi realizada uma comparação entre as juntas ensaiadas e as juntas coladas com adesivos de mesma base ensaiadas anteriormente pelo LAA. Foram feitas algumas considerações da modelagem no Abaqus®, explicando os passos necessários.

2.1 Planejamento dos Experimentos

Com o objetivo de realizar comparações com os adesivos de base epóxi e poliuretano estudados em projetos anteriores no LAA, foram escolhidos o adesivo rígido de base epóxi e flexível de base poliuretano, NVT 201E® e Masterpur Estrutural 300®, respectivamente. Dessa forma, foi possível a análise do comportamento sob fluência de juntas coladas com

essas bases de adesivos, encontrando as tensões médias de ruptura e realizando testes para alguns níveis dessas tensões.

As tensões médias de ruptura das juntas τ_u , representam a tensão máxima admissível aos corpos de prova. Foi obtida a média das tensões de ruptura encontradas nos ensaios da Máquina de Ensaio Universal e do Equipamento Pneumático de Fluência (EPF).

Os corpos de prova foram fabricados em conformidade com a norma ASTM D 1002. O comprimento do *overlap*, a espessura da camada adesiva, o procedimento de preparo e ensaio e a geometria do substrato foram similares para todas as juntas que foram fabricadas.

Os testes se iniciaram com carregamentos em níveis de 70% da τ_u , ajustando a porcentagem da τ_u até os testes ultrapassarem 1000 horas em ensaio sem ruptura. Para cada nível de tensão foram ensaiadas em fluência no mínimo três amostras.

O tempo de vida até a ruptura para cada tensão representa o tempo médio para a ruptura de um grupo de juntas ensaiadas nesse mesmo nível de tensão.

2.2 Características dos adesivos

2.2.1 NVT 201E®

O adesivo NVT 201E® é um adesivo estrutural rígido de base epóxi, sendo usado em conjunto com o sistema de reparos PIPEFIX e fornecido pela NOVATEC. O NVT 201E® é indicado para: recuperação de dutos, colagem de chapas metálicas, nivelador de superfícies, preenchimento de partes desgastadas, vedações de dutos, tanques, colagem de diferentes tipos de materiais, revestimento anticorrosivo. As tabelas 3, 4 e 5 indicam, respectivamente, as informações técnicas de cura, os dados técnicos e as propriedades deste adesivo. Essas informações foram concedidas pelo fornecedor do adesivo.

Tabela 3 – Informações Técnicas de Cura

Temperatura	Tempo de aplicação	Cura inicial	Cura funcional
25°C	35 min	120 min	24 horas
35°C	28 min	120 min	24 horas

Fonte: Novatec, 2019.

Tabela 4 – Dados técnicos do adesivo NVT 201E®

Características do adesivo NVT 201E®	
Temperatura de Aplicação	25°C ou 35°C
Tempo de aplicação	35 min (25°C) ou 28 min (35°C)
Densidade (g/cm ³)	1,24
Razão de mistura volumétrica	2:1
Razão de mistura mássica	100:43
Base polimérica	Epóxi
Presença de cargas	Não

Fonte: Novatec, 2019.

Tabela 5 – Propriedades do adesivo NVT 201E®

Parâmetros	Norma	Valores
Tensão Máxima(MPa)	ASTM D638	27,25
Tensão de Cisalhamento(MPa)	ASTM D1002	16
Dureza - (Shore D)	ASTM D2240	60
Teste de Abrasão (% de perda de massa)	DIN 53516	0,45
Perda de Massa -TGA (°C)		>300
Módulo de Elasticidade (GPa)		2,085

Fonte: Novatec, 2019.

O adesivo NVT 201E® possui dois componentes, o A e o B, conforme mostrado na Figura 24. Os componentes são misturados para uso, de acordo com as proporções indicadas na tabela 4.

Figura 30 - Componentes A e B do NVT 201E®



Fonte: A autora, 2019.

2.2.2 Masterpur Estrutural 300®

De acordo com o fornecedor, o adesivo Masterpur Estrutural 300® é formulado para a colagem de substratos de PRFV (polímeros reforçados com fibra de vidro, *fiberglass*) entre si, sobre superfícies metálicas (alumínio, aço carbono, e superfícies galvanizadas) ou para colagem de conjuntos metálicos. O tempo de manuseio, relativamente curto, é ideal para aplicação por sistema mecanizado, embora seja possível sua utilização também por sistema manual. Depois de curado, o produto tem excelente resistência mecânica e não é sensível à água ou umidade. As propriedades cedidas pelo fornecedor para este adesivo estão apresentadas na tabela 6 e as informações técnicas, na tabela 7.

Tabela 6 – Propriedades do Masterpur Estrutural 300®

Propriedade	Resultado	Método	Observação
Resistência cisalhamento Aço carbono KTL	15 MPa	ISO 4587	Falha coesiva KTL
Resistência cisalhamento Aço carbono zincado	12 MPa	ISO 4587	Falha coesiva
Resistência cisalhamento Aço Carbono	12,5 MPa	ISO 4587	Falha coesiva
Resistência cisalhamento Alumínio	12 MPa	ISO 4587	Falha coesiva
Tensão de ruptura	12MPa	ASTM D638	
Alongamento na ruptura	25%	ASTM D638	
Dureza Shore A	80	ASTM 2240	
Módulo elasticidade	92 MPa		

Fonte: Masterpol, 2018.

Tabela 7 – Informações técnicas do Masterpur Estrutural 300®

Parâmetro	Valor
Mistura em massa	1:0,25
Gel time (35C)	3-6 minutos

Fonte: Masterpol, 2018.

O Masterpur Estrutural 300® é composto pelas partes A e B, devendo ser misturadas de acordo com as proporções indicadas na tabela 7. O informativo técnico afirma que a cura ocorre transcorridas 24 horas após a colagem. A Figura 25 ilustra os componentes do adesivo.

Figura 31 - Componentes A e B do Masterpur Estrutural 300®

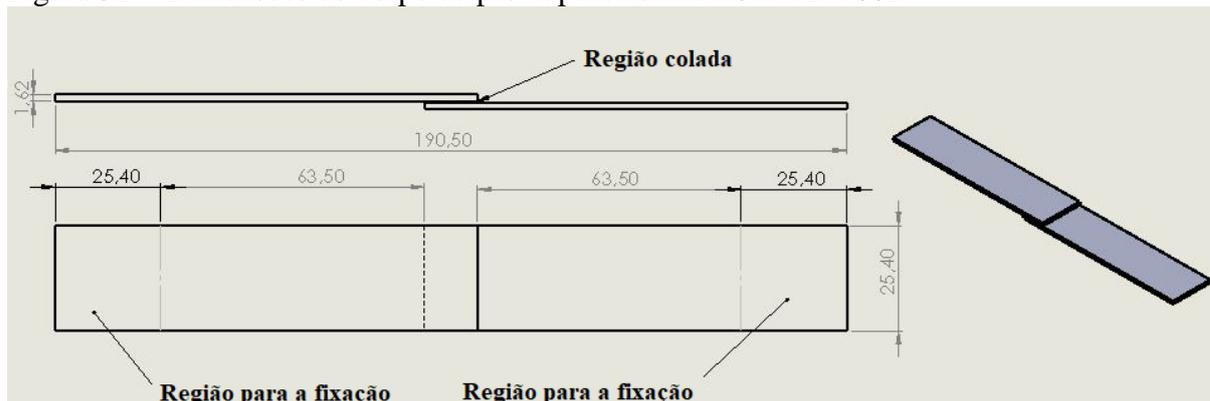


Fonte: A autora, 2019.

2.3 Cálculo da tensão cisalhante máxima admitida nas juntas

As juntas utilizadas nesta dissertação foram fabricadas de acordo com a norma ASTM D 1002 e com o procedimento de colagem RT TMEC nº003/08 / PETROBRAS. A Figura 26 indica as dimensões definidas na norma ASTM D 1002.

Figura 32 - Dimensões do corpo de prova pela norma ASTM D 1002



Fonte: Adaptado de QUEIROZ, 2013.

A equação 19, instituída pela norma ASTM D 1002, mostra a relação entre o comprimento do *overlap* (L) e a espessura do substrato (t). Pode ocorrer uma variação entre esses valores, desde que a força para romper os corpos de prova não ultrapasse o limite de escoamento do substrato. Sendo o *overlap* a região colada da junta.

$$L = \sigma_{xy} \frac{t}{1,5\tau_f} \quad (19)$$

Onde:

L = comprimento do *overlap*, [mm];

σ_{xy} = tensão de escoamento do material do substrato, [MPa];

t = espessura do substrato, [mm];

τ_f = tensão cisalhante de fratura da junta, [MPa].

O gabarito utilizado para a colagem das juntas restringe a variação da espessura do substrato e do comprimento do *overlap*. O aço ASTM A36 foi escolhido como o substrato metálico, assim o limite de escoamento é fixo. Como o limite de escoamento do substrato é de 250 MPa, a espessura do substrato é 1,5 mm e o comprimento do *overlap* é 12,7 mm, logo é possível a fabricação de juntas cujas tensões cisalhantes não ultrapassem 19,5 MPa.

2.4 Usinagem dos corpos de prova

A Figura 27 mostra o corpo de prova antes da colagem (substrato), utilizado nos ensaios. Para a fabricação dos substratos, chapas laminadas a frio foram cortadas para se obter as dimensões desejadas, que são 25,4 mm por 101,6 mm por 1,5 mm.

Figura 33 - Substrato



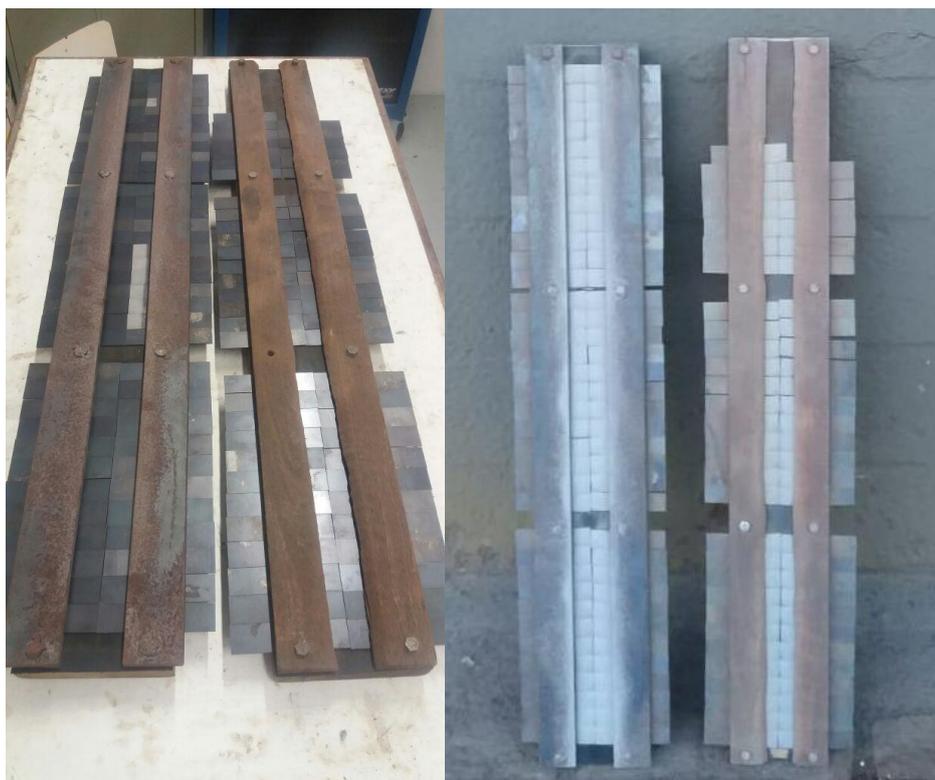
Fonte: A autora, 2019.

2.5 Tratamento superficial

2.5.1 Jateamento

O jateamento foi executado pela empresa MacSeal em Macaé-RJ. Primeiramente, os corpos de prova e os equipamentos foram higienizados para a remoção de óleos e poeiras presentes. Após, os corpos de prova foram posicionados cuidadosamente nos dois gabaritos utilizados para facilitar o jateamento, como ilustrado na Figura 28.

Figura 34 - Corpos de prova antes e após o jateamento



Fonte: A autora, 2019.

A granalha utilizada no jateamento foi a G25, conforme descrito no anexo N-9, como a que consegue o nível de rugosidade exigido (R_t) maior que $85\mu\text{m}$.

As chapas foram aprovadas na inspeção visual, seguindo o critério N-9 Petrobras, item 3.4.3, padrão de limpeza Sa3. Observou-se um leve empenamento das chapas, devido à pressão do jato sob a superfície.

Para desempenar as chapas, foi analisado se houve uma grande variação nas rugosidades medidas entre as chapas empenadas e as chapas desempenadas. Elas foram desempenadas em uma morsa com o auxílio de duas placas de PVC, formando uma espécie de sanduíche. Todas as análises de rugosidade realizadas estão indicadas no tópico 2.4.3.

2.5.2 Lixamento

Para fins de comparação, foi feito o lixamento para a segunda arremessa dos corpos de prova a serem colados com o adesivo Masterpur Estrutural 300®. Foi utilizada a lixa 50 para aços, conforme recomendado pelo fornecedor, não houve direção preferencial para o

lixamento. Também foram realizadas análises de rugosidade para os corpos de prova lixados, conforme indicado no tópico 2.4.3.

2.5.3 Análise de rugosidade das juntas

Para esta etapa, foi utilizado o rugosímetro tridimensional TalyScan 150 Taylor Hobson, conforme ilustrado na Figura 29. Em conformidade com a norma ISO 4288:1996, para todas as medições de rugosidade, foram empregadas velocidades de 1000 $\mu\text{m/s}$, precisões de malha x-y 1 x 10 μm , e áreas de medição 4 x 1 mm. De acordo esta mesma norma, o número de amostras de cada lote separadas aleatoriamente para a análise de rugosidade deverá ser calculado conforme a equação 20. A Figura 30 mostra o resultado tridimensional de uma análise de rugosidade realizada com o TalyScan 150.

$$N_a = \sqrt{N_t} \quad (20)$$

Onde:

N_a = número de amostras a serem analisadas;

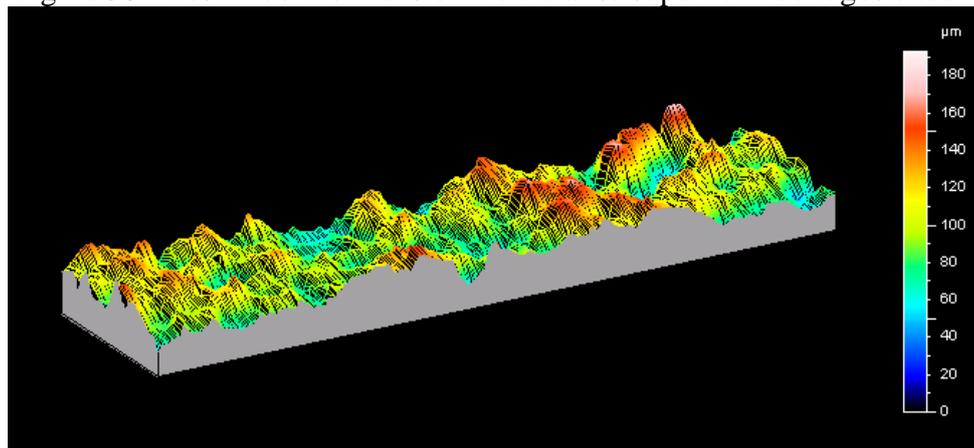
N_t = quantidade de itens do lote.

Figura 35 - Rugosímetro
TalyScan 150



Fonte: A autora, 2019.

Figura 36 - Resultado tridimensional da análise superficial de rugosidade



Fonte: A autora, 2019.

Conforme afirmado no tópico 2.3.1, foram avaliadas as rugosidades de alguns corpos de prova empenados após o jateamento e dos corpos de prova desempenados com as chapas de PVC. Por meio da comparação entre esses valores, foi observado que não ocorreu uma significativa divergência entre eles, ocorrendo uma redução da rugosidade média (R_t) de $87,0 \pm 12,6 \mu\text{m}$, para $83,2 \pm 15,5 \mu\text{m}$, isto equivale à 4,4 % do R_t . Portanto, todos os corpos de prova foram desempenados seguindo esta técnica.

A rugosidade foi analisada em duas etapas, antes e após a silanização. Para os corpos de prova que foram lixados antes de serem colados com o Masterpur Estrutural 300®, foram avaliadas também as rugosidades antes e após a silanização.

Conforme realizado por Queiroz (2013), foi utilizado para fins de comparações, o parâmetro de rugosidade R_t , que corresponde à distância entre o pico mais alto e o vale mais baixo do perfil de rugosidade. O parâmetro R_a que corresponde à rugosidade média, também foi medido.

As rugosidades dos corpos de prova jateados e lixados foram comparadas. Para os substratos jateados, o R_t médio antes da silanização encontrado foi de $73,8 \pm 13,3 \mu\text{m}$. Já para os lixados, o R_t foi de $7,5 \pm 1,5 \mu\text{m}$. De acordo com estes dados, a média das rugosidades dos corpos de prova jateados são muito maiores que a média dos lixados, logo as tensões de ruptura das juntas com os corpos de prova jateados tendem a ser maiores que as dos lixados.

2.5.4 Revestimento com o silano

Queiroz (2013) realizou um ataque químico com ácido nítrico-fosfórico para a preparação da superfície. Neste trabalho optou-se por utilizar o silano, pois de acordo com a pesquisa realizada por Limaverde (2008), a silanização apresentou um maior fator de influência na tensão máxima das juntas coladas, com um grau de influência superior a 99,9%, já o ataque químico apresentou um grau de influência de apenas 18,7%. Além disso, Passos (2016) relatou a vantagem de utilizar o *primer* de silano hidrolisado, pela facilidade do método de borrifação e baixo custo. O silano além de realizar o ataque químico, também aumenta o poder de união.

Primeiramente utilizou-se acetona para a limpeza dos corpos de prova. Após, foi aspergido silano 1% hidrolisado conforme mostra a Figura 31. Para se obter o silano hidrolisado, o mesmo necessita ser batido em água hidrolisada por trinta e cinco minutos. Todo procedimento ocorreu em uma capela, com a utilização de luvas e máscaras. Optou-se pela aspersão de silano e não pelo banho, para simular melhor a situação em campo, pois utiliza-se mais a primeira forma. O ph da solução foi conferido, sendo considerado ideal, pois estava entre 3 e 4 (Figura 32).

Figura 37 - Aspersão de Silano 1%



Fonte: A autora, 2019.

Figura 38 - Controle do ph da solução



Fonte: A autora, 2019.

Para os corpos de prova que seriam colados com o adesivo Masterpur Estrutural 300®, foi utilizado um *primer* especial concedido pelo representante do adesivo. Este *primer* também possui o silano como composição básica.

Foi realizada outra análise de rugosidade, após um tempo mínimo de trinta minutos, para a completa secagem. A tabela 8 ilustra uma comparação entre as análises antes e após a

silanização. A rugosidade média (Rt) foi de 87,0 μm sem silano e 83,2 μm com silano. Observa-se na tabela 8 e no Apêndice A, que não ocorre uma mudança substancial no Rt nem no Ra após a silanização. Normalmente, por meio da corrosão, o silano provoca uma pequena redução no Rt (diminuindo os picos de rugosidade) e cria microrugosidades que contribuem para aumentar a tensão de ruptura do material.

Tabela 8 – Análise das rugosidades antes e após silanização

	Pós tratamento superficial		Pós silanização	
	Ra(μm)	Rt(μm)	Ra(μm)	Rt(μm)
Média	11,7	87,0	11,6	83,2
Desvio padrão (%)	11,9	11,6	9,6	7,3

Fonte: A autora, 2019.

O ANEXO-A mostra todas as aferições de rugosidade realizadas (para todos os lotes).

2.6 Colagem das juntas

Foi empregado um gabarito de colagem, ilustrado na Figura 33, podendo fabricar lotes com 10 juntas por etapa de colagem, com as tolerâncias normatizadas pela ASTM D 1002.

Figura 39 - Elementos do gabarito de colagem



(a)

(b)

Legenda: (a) – Base do gabarito e contrapesos; (b) – chapas para controle de espessura.

Fonte: A autora, 2019.

As condições climáticas, como temperatura e umidade, foram controladas para a colagem das juntas, de acordo com a norma ASTM E 337, conforme mostrado na tabela 9.

Tabela 9 – Condições climáticas para a colagem

Condição	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)
1	16 a 20	<55
2	21 a 25	<70
3	26 a 31	<75
4	32 a 38	<80

Fonte: Adaptado de ASTM E337, 1996.

A tabela A.15 localizada no ANEXO-A apresenta temperatura, umidade e tempo de trabalho para cada lote de junta de cisalhamento colada.

Para iniciar a etapa de colagem, foi aplicado um desmoldante no gabarito, ferramentas e acessórios, para o adesivo não grudar em locais indesejados. Após, realizou-se o posicionamento das dez chapas para o controle de espessura, como mostrado na Figura 34.

Figura 40 - Posicionamento das chapas para controle de espessura



Fonte: A autora, 2019.

Após o posicionamento das chapas para controle de espessura, foram misturados os compostos dos adesivos nas proporções indicadas pelo fabricante (tabelas 4 e 7). Então, o adesivo pôde ser aplicado sobre cada substrato com o auxílio de uma espátula e após, ser colado no segundo substrato, conforme ilustra a Figura 35.

Figura 41 - Colagem dos substratos



Fonte: A autora, 2019.

Após a montagem das dez juntas, removeu-se o excesso de adesivo, conforme mostrado na Figura 36.

Figura 42 - Remoção do excesso de adesivo



Fonte: A autora, 2019.

Em seguida da remoção do excesso de adesivo, foram posicionadas as chapas complementares para o controle da espessura. Barras de distribuição de carga e contrapeso também foram adicionadas para auxiliar na colagem (Figura 37).

Figura 43 - Barras de distribuição de carga e contrapeso



Fonte: A autora, 2019.

O gabarito com as dez juntas e totalmente montado foi colocado na estufa para a secagem à 40°C por 24h (Figura 38), para a total cura do adesivo.

Figura 44 - Gabarito com as juntas na estufa para a cura do adesivo



Fonte: A autora, 2019.

Após o adesivo estar totalmente curado, foi realizado um desbastamento mecânico para a remoção do excesso do adesivo em torno da região do *overlap*. A tabela 10 indica as condições finais das juntas após a colagem.

Tabela 10 – Condições finais das juntas após a colagem

PARÂMETROS	VALORES
Comprimento total [mm]	192,0 ($\pm 0,0$)
Largura [mm]	24,9 ($\pm 0,2$)
Comprimento <i>overlap</i> [mm]	12,9 ($\pm 0,2$)
Espessura adesivo [mm]	0,5 ($\pm 0,1$)

Fonte: A autora, 2019.

A nomenclatura das juntas consiste na letra “L”, simbolizando lote e seguida por 2 números: o 1º número representa o número do lote no qual o corpo de prova foi fabricado, o 2º indica o número do corpo de prova dentro daquele lote (1 a 10 para cada lote). As juntas do adesivo Masterpur Estrutural 300® que foram lixadas ao invés de jateadas receberam a letra L no final da nomenclatura.

Exemplo: L147L – junta fabricada no lote 14, corpo de prova 7 e lixada.

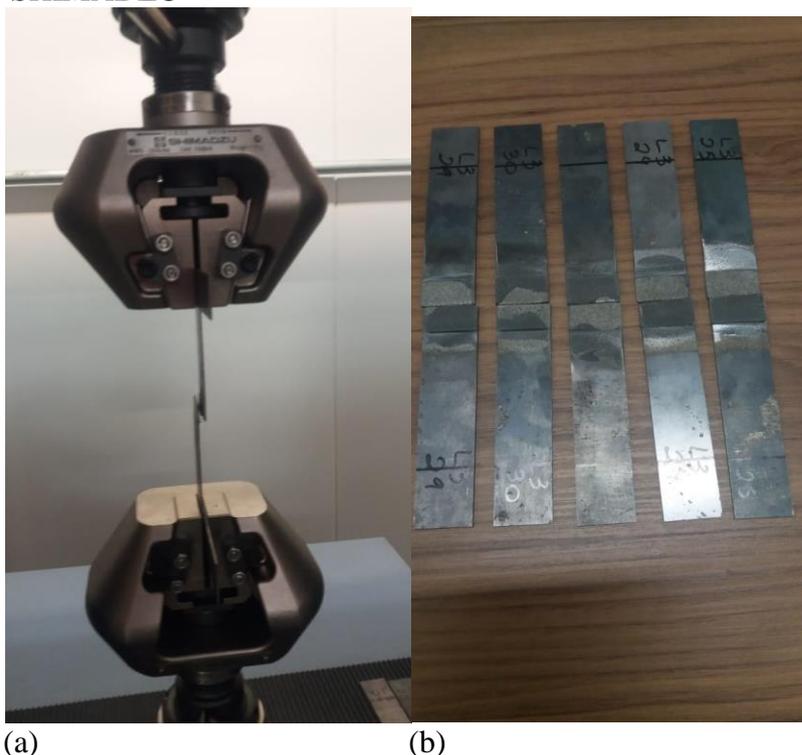
2.7 Ensaios

Para se obter os valores da tensão média de ruptura das juntas (τ_u) para as juntas coladas com ambos os adesivos, foram realizados ensaios de cisalhamento na Máquina de Ensaio Universal AG-X plus SHIMADZU. Após estes testes, foram feitos ensaios de ruptura no EPF para comparar a τ_u com a encontradas pela AG-X plus SHIMADZU, para então se iniciar os ensaios de fluência. Os ensaios foram realizados em temperatura ambiente, sendo 20°C para os realizados na máquina universal de ensaios e 25°C os realizados no Equipamento Pneumático de Fluência.

2.7.1 Testes de ruptura com a máquina universal de ensaios

A Figura 39(a) mostra um ensaio de cisalhamento realizado na máquina universal de ensaios AG-X SHIMADZU e a Figura 39(b) alguns corpos de prova rompidos após o ensaio.

Figura 45 - Máquina universal de ensaios AG-X SHIMADZU



(a) (b)
Legenda: (a) – ensaio de tração na Máquina Shimadzu, (b) – alguns corpos de prova rompidos após o ensaio
Fonte: A autora, 2019.

Os ensaios realizados na máquina universal utilizaram velocidade de 1,3 mm/min, conforme a norma ASTM D 1002. O comprimento inicial l_0 foi 140 mm, que é o comprimento total da junta menos 25 mm das extremidades presas as garras. A área considerada para o cálculo da tensão foi de 322,58 mm². Não foi utilizado extensômetro, o deslocamento foi informado pela máquina de ensaio.

2.7.2 Testes de ruptura com o EPF

Com o objetivo de montar as juntas nas garras, as garras do equipamento e os dois pinos de fixação são retirados. A montagem necessita ser realizada sobre uma bancada plana. A junta é centralizada com o auxílio de um suporte. Conforme afirmado na norma ASTM D 1002, o comprimento da junta preso às garras deve ser de 25 mm. Marcam-se linhas na distância indicada. Após, os parafusos são apertados e o conjunto é fixado na unidade de ensaio. A altura é ajustada no momento da montagem no EPF, para conseguir encaixar o pino

de acoplamento entre a garra do cilindro e a garra do corpo de prova. A Figura 40 ilustra os corpos de prova montados nas garras do EPF.

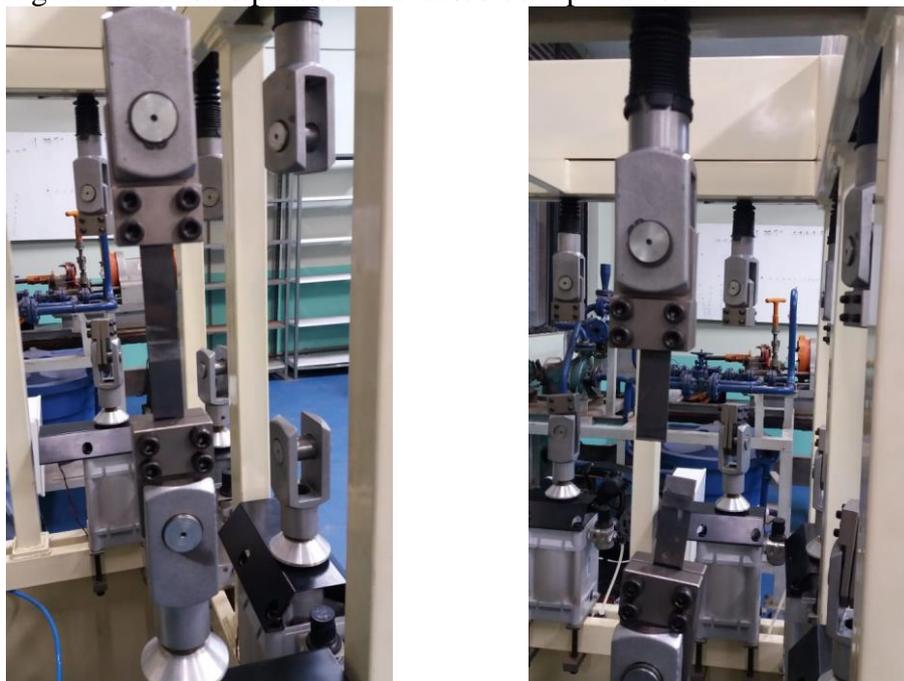
Figura 46 - Corpos de prova montados nas garras



Fonte: A autora, 2019.

A norma ASTM D 1002 estipula a velocidade de ensaio de tração em juntas de cisalhamento em 142 kPa/s, isto significa incrementos de 0,2 bar a cada 5 segundos. Essa velocidade não se mostrou suficiente para ajustar a pressão manualmente e estabilizar a tensão no corpo de prova. Os testes realizados neste trabalho foram com velocidade de 47,3 kPa/s, o que significa incrementos de 0,2 bar a cada 15 segundos, velocidade que se mostrou adequada para os ensaios. Segundo os testes realizados por Queiroz (2013), mesmo a velocidade sendo diferente da normatizada, se mantida a mesma em todos os testes, não influencia de forma significativa nos resultados. A Figura 41 ilustra um ensaio para obter a tensão de ruptura no EPF.

Figura 47 - Ensaio para obter a tensão de ruptura no EPF



Fonte: A autora, 2019.

2.7.3 Ensaio de fluência com o EPF

A τ_u representa um referencial inicial, que corresponde a 100% de carregamento (limite máximo). As tensões menores para a execução dos testes correspondem a percentuais que podem variar entre 0 e 100% da τ_u , como demonstrado na equação 21.

$$p = 100 \frac{\tau}{\tau_u} \quad (21)$$

Onde

p = percentual do carregamento [%];

τ_u = tensão média de ruptura das juntas [MPa];

τ = tensão em fluência [MPa].

Os testes de fluência foram realizados para aproximadamente 70%, 60%, 50%, 45% e 40% da tensão de ruptura (τ_u) para ambos os adesivos. Como o ajuste do equipamento é manual, não houve uma excelente precisão, logo essas porcentagens da tensão de ruptura variaram um pouco. Iniciou-se os testes considerando 70% da τ_u e este valor foi reduzido até a junta ultrapassar o tempo máximo de 1000 horas, sem ocorrer a ruptura. Após este tempo, foi realizada uma extrapolação dos dados com o auxílio da técnica de regressão linear.

Foi necessário converter as tensões utilizadas no ensaio de fluência em pressões a serem ajustadas no equipamento, conforme apresentado na equação 15. Essas pressões foram ajustadas manualmente até se obter o valor desejado. Todas as unidades de ensaio foram ajustadas com as pressões desejadas. A Figura 42 ilustra um lote de juntas em teste de fluência no EPF.

Figura 48 - Juntas em teste de fluência no EPF



Fonte: A autora, 2019.

2.8 Ensaio de tração do Masterpur Estrutural 300®

Para observar o comportamento do adesivo em tração, foram realizados ensaios de tração em corpos de prova fabricados puramente com o adesivo Masterpur Estrutural 300®. A Figura 43 mostra o molde para a fabricação dos corpos de prova padronizados (norma ASTM D638) utilizados nos ensaios de tração.

Figura 49 - Molde para a fabricação dos corpos de prova para ensaios de tração



Fonte: A autora, 2019.

2.9 Modelagem da fluência no Abaqus®

Alguns artigos utilizam a lei de potência no Abaqus® para modelar a fluência da halita (um tipo de rocha salina que é perfurada para armazenamento de gás), como Cavalcante e Ramos (2010), Ruiz (2015), dentre outros. Neste trabalho, foi utilizada esta lei para realizar algumas considerações com relação à modelagem em fluência no Abaqus®.

Primeiramente a lei de potência do Abaqus® foi testada para o adesivo de base epóxi ensaiado neste trabalho (NVT 201E®), assim como foram utilizadas nos estudos de Miravalles, 2007 e Zehsaz (2013) para outros adesivos de base epóxi, conforme citado a seguir. O tópico 1.6.2.1 fala sobre essa lei.

Miravalles (2007) realizou testes de fluência em tração uniaxial com dois adesivos epóxis em diferentes níveis de tensão em temperatura ambiente, testando também esses adesivos com reforço de fibra de carbono. Foi observado que os adesivos reforçados com fibra de carbono obtiveram menor deformação em fluência. Miravalles utilizou a modelagem

em duas dimensões no Abaqus® (utilizando a teoria “*time-hardening*”) para simular o comportamento do adesivo, obtendo boa concordância com o experimental.

Zehsaz (2014) analisou o comportamento em fluência das juntas de cisalhamento simples. Através dos ensaios triaxiais de fluência em temperatura ambiente, obteve equações constitutivas para o adesivo. Foi utilizada a teoria “*time-hardening*” para modelar a fluência, obtendo boa concordância com o experimental. Zehsaz notou que durante o processo de fluência, as tensões nos cantos das juntas diminuem e a deformação de fluência aumenta, tendendo a separar o adesivo do aderente. Como solução, Zehsaz propôs um aumento da espessura do adesivo e a utilização de juntas filetadas.

Gengross (2007) utilizou a lei de potência como um dos métodos para modelar a fluência em balões atmosféricos com uma fina camada de polietileno da NASA no Abaqus®. Esse modelo foi escolhido por ser utilizado neste trabalho para o epóxi e para poder comparar o comportamento deste adesivo com o de base epóxi.

Para realizar os ensaios de fluência no Abaqus® para os adesivos NVT 201E® e Masterpur Estrutural 300®, precisa-se encontrar os parâmetros A , n e m da equação 17 ou 18. Miravalles (2007) utilizou o *software* Matlab® para encontrar estes parâmetros. É necessário utilizar os valores da deformação em fluência, tensão aplicada no teste de fluência (MPa) e faixa de extração da fluência estacionária (h) dos adesivos para encontrar os parâmetros desejados, conforme afirmado no tópico 1.5.1.1.1.

É importante relatar a dificuldade de encontrar literatura que utilize os parâmetros de fluência no Abaqus® para adesivos e com uma explicação detalhada. Além disso, o EPF não possui um equipamento para o monitoramento da deformação. Devido a estes motivos, ainda não foram obtidos os parâmetros de fluência para os adesivos testados neste trabalho. Porém já está sendo providenciado pelo LAA um equipamento para a leitura dos “*strain gauges*” que serão acoplados nos corpos de prova de adesivos que serão testados no EPF. Pelo menos 3 corpos de prova necessitam ser monitorados.

De início, enquanto os testes dos adesivos ainda não foram realizados, foram utilizados valores de outros ensaios como parâmetros de fluência no Abaqus® para o NVT 201E®. Foi escolhido o adesivo Epidian 53:PAC=100:80, do trabalho de Zehsaz (2014). Este adesivo possui base epóxi e com o módulo de elasticidade o mais próximo possível do NVT 201E® (Epidian®-2232 GPa, NVT®-2085 GPa) dentre os artigos encontrados. A tabela 11 apresenta as propriedades e parâmetros de fluência deste adesivo.

Tabela 11 – Propriedades e parâmetros de fluência do Epidian 53:PAC=100:80®

Propriedades Epidian 53:Pac=100:80®	
Módulo elasticidade [GPa]	2232
Poison	0,4
Parâmetros de fluência	
A	2,232E-06
N	2,776
M	-0,647

Fonte: A autora, 2019.

Com esses parâmetros, foram descritos nesta dissertação os passos necessários para a modelagem no Abaqus®. Esses passos utilizados para a modelagem no Abaqus® foram baseados no trabalho de Neto (2017) e encontram-se no ANEXO-E.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Tensões de ruptura das juntas

3.1.1 Tensão média de ruptura das juntas coladas com o adesivo NVT 201E®

A tabela 12 mostra os resultados dos ensaios de cisalhamento realizados na Máquina universal para as juntas coladas com o NVT 201E®. Já a tabela 13 apresenta os resultados dos ensaios de cisalhamento para as juntas coladas com o mesmo adesivo no EPF.

Tabela 12 – Resultados dos ensaios de cisalhamento realizados na máquina universal de ensaios para o NVT 201E®

Corpo de prova	Força de ruptura [N]	Tensão de ruptura [MPa]	Deslocamento [mm]	Deformação [%]	Velocidade [mm/min]	Tempo [s]
L11	5659,6	17,5	0,6	0,4	1,3	20,5
L12	5738,2	17,8	0,6	0,4	1,3	16,2
L13	5680,4	17,6	0,5	0,4	1,3	16,1
L14	5997,6	18,6	0,6	0,4	1,3	18,5
L15	5862,9	18,2	0,6	0,4	1,3	19,2
Média	5787,7	17,9	0,6	0,4	1,3	18,1
Desvio Padrão	141,5	0,4	0,0	0,0	0,0	1,9
Desvio %	2,4	2,4	5,9	5,9	0,0	10,5

Fonte: A autora, 2019.

Tabela 13 – Resultado dos ensaios de cisalhamento do EPF para o NVT 201E®

Corpo de prova	Pressão de ruptura [bar]	Tensão de ruptura [MPa]	Tempo [s]	Taxa aplicação pressão [bar/min]	Taxa aplicação tensão [kPa/s]
L16	4,8	17,0	360,0	0,8	47,2
L17	5,0	17,8	372,0	0,8	47,8
L18	5,0	17,8	380,0	0,8	46,8
L19	5,3	18,8	390,0	0,8	48,2
L110	5,0	17,8	383,0	0,8	46,5
Média	5,0	17,8	377,0	0,0	47,3
Desvio Padrão	0,2	0,6	11,5	0,0	0,7
Desvio %	3,6	3,6	3,0	0,0	1,5

Fonte: A autora, 2019.

Conforme observado nas tabelas 12 e 13, as tensões de ruptura em cisalhamento encontrada nos dois ensaios foram relativamente próximas da tensão indicada na ficha técnica do produto (16 MPa), mostrando-se cerca de 12% maior. Nota-se um baixo desvio padrão para as tensões obtidas (máximo de 3,6%). Foi considerada como tensão de ruptura uma média entre os dois ensaios, 17,9MPa.

3.1.2 Tensão média de ruptura das juntas coladas com o adesivo Masterpur Estrutural 300®

A tabela 14 apresenta os resultados dos ensaios de tração realizados pela máquina universal para as juntas coladas com o Masterpur Estrutural 300®. Já a tabela 15 apresenta o resultado do ensaio de tração do EPF para as juntas coladas com o Masterpur Estrutural 300®.

Tabela 14 – Resultado dos ensaios de cisalhamento da máquina universal para o Masterpur Estrutural 300®

Corpo de prova	Força de ruptura [N]	Tensão de ruptura [MPa]	Deslocamento [mm]	Deformação [%]	Velocidade [mm/min]	Tempo [s]
L41	1432,2	4,4	0,7	0,5	1,3	128,9
L42	1429,8	4,4	0,7	0,5	1,3	134,5
L43	1606,9	5,0	0,6	0,4	1,3	98,4
L44	1547,0	4,8	0,7	0,5	1,3	127,0
L45	1476,8	4,6	0,6	0,4	1,3	113,0
Média	1498,5	4,6	0,7	0,5	1,3	120,4
Desvio Padrão	77,0	0,3	0,0	0,0	0,0	14,6
Desvio %	5,1	5,7	6,0	6,4	0,0	12,1

Fonte: A autora, 2019.

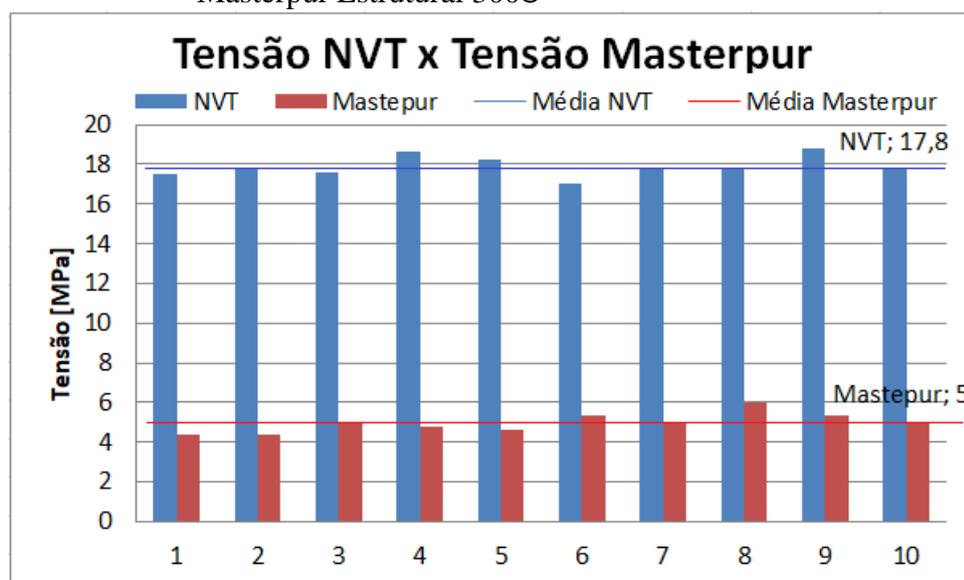
Tabela 15 – Resultado do ensaio de cisalhamento do EPF para o Masterpur Estrutural 300®

Corpo de prova	Pressão de ruptura [bar]	Tensão de ruptura [MPa]	Tempo [s]	Taxa aplicação pressão [bar/min]	Taxa aplicação tensão [kPa/s]
L66	1,5	5,3	101,0	0,8	52,7
L67	1,4	5,0	98,0	0,8	50,7
L68	1,7	6,0	113,0	0,8	53,4
L69	1,5	5,3	102,0	0,8	52,2
L610	1,4	5,0	89,0	0,8	55,8
Média	1,5	5,3	100,6	0,8	47,3
Desvio Padrão	0,1	0,4	8,6	0,0	1,9
Desvio %	8,2	8,2	8,6	0,0	4,0

Fonte: A autora, 2019.

Os valores dos ensaios do EPF para o Masterpur Estrutural 300® (média de 5,3 MPa) assemelharam-se aos valores dos ensaios da máquina universal para o mesmo adesivo (média de 4,6 MPa). Logo a tensão de ruptura em cisalhamento para este adesivo foi considerada $5,0 \pm 0,4$ MPa, como uma média entre os ensaios das duas máquinas. Figura 44 apresenta uma comparação entre as tensões de ruptura das juntas coladas com o NVT 201E® e com o Masterpur Estrutural 300®.

Figura 50 - Comparação das tensões de ruptura do NVT 201E® e Masterpur Estrutural 300®

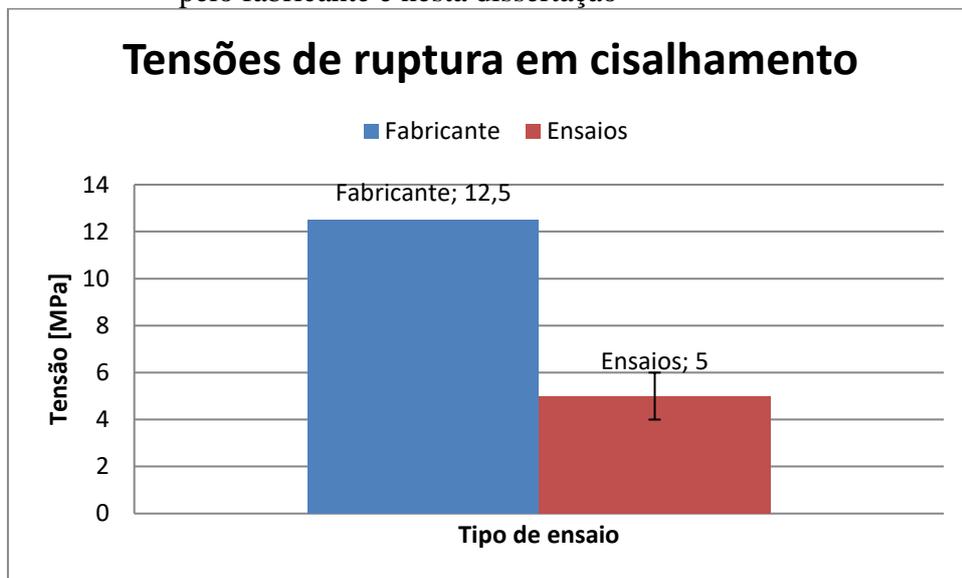


Fonte: A autora, 2019.

De acordo com os ensaios realizados, o adesivo flexível Masterpur Estrutural 300® apresenta uma tensão de ruptura em cisalhamento muito inferior à tensão de ruptura do adesivo rígido NVT 201E®, além de não se enquadrar como um adesivo estrutural, como apresenta o tópico 1.1.

A tensão média de ruptura em cisalhamento da junta colada com adesivo Masterpur Estrutural 300® informada pelo fabricante foi 12,5MPa, conforme indicado na tabela 6. Conforme citado anteriormente, o valor encontrado pelos testes foi de 5 MPa. A Figura 45 ilustra essa divergência entre as tensões de ruptura em cisalhamento encontradas para as juntas coladas com o Masterpur Estrutural 300® nos ensaios realizados pelo fabricante e nesta dissertação.

Figura 51 - Comparação das tensões de ruptura em cisalhamento das juntas coladas com o Masterpur Estrutural 300® realizados pelo fabricante e nesta dissertação



Fonte: A autora, 2019.

3.1.2.1 Tensão média de ruptura das juntas lixadas e coladas com o adesivo Masterpur Estrutural 300®

Devido a divergência das tensões de ruptura obtidas pelo fornecedor do adesivo e pelos ensaios, foram realizados novos testes para as juntas coladas com o Masterpur Estrutural 300®. Foi utilizado o lixamento (tratamento superficial utilizado nos testes realizados pelo fabricante) no lugar do jateamento (tratamento superficial utilizado neste trabalho). De acordo com o fornecedor, o Masterpur Estrutural 300® é muito empregado no ramo automobilístico, onde o método mais comum é o lixamento. Embora descoberto em testes anteriores do LAA que o jateamento produz uma rugosidade muito superior ao lixamento, esse tratamento foi realizado para um lote do adesivo Masterpur Estrutural 300®, pois este adesivo poderia exibir um comportamento diferente dos ensaiados anteriormente.

A tabela 16 apresenta os resultados do ensaio de cisalhamento na máquina universal para as juntas lixadas e coladas com o Masterpur Estrutural 300®.

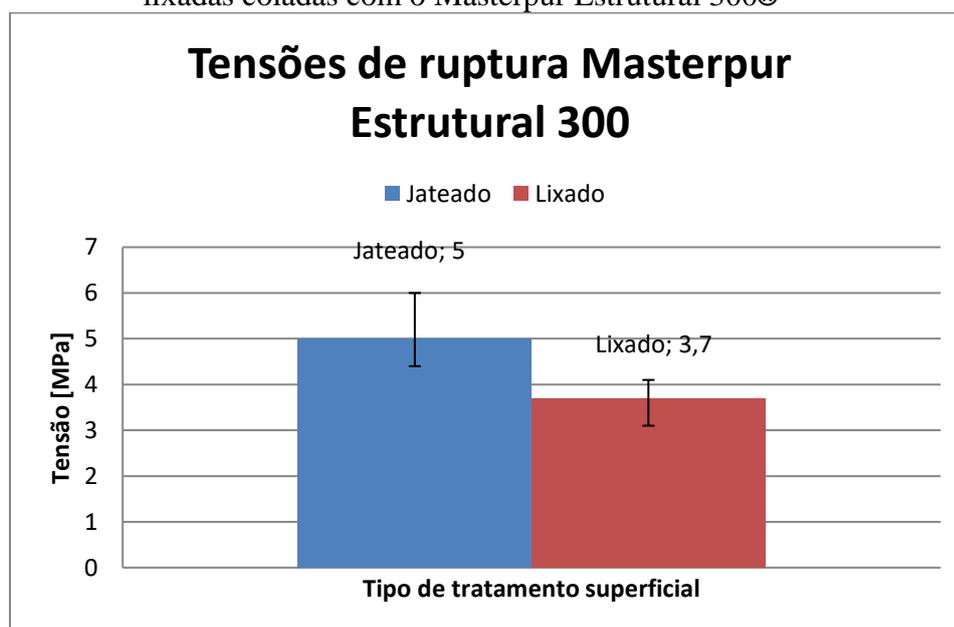
Tabela 16 – Resultado do ensaio de cisalhamento para o Masterpur Estrutural 300® para a superfície lixada

Corpo de prova	Força de ruptura [N]	Tensão de ruptura [MPa]	Deslocamento [mm]	Deformação [%]	Velocidade [mm/min]	Tempo [s]
L11L	1072,7	3,3	1,1	0,8	1,3	82,3
L12L	986,9	3,1	1,2	0,8	1,3	78,6
L13L	1233,5	3,8	1,2	0,9	1,3	82,3
L14L	1334,5	4,1	1,2	0,8	1,3	78,6
L15L	1322,3	4,1	1,2	0,9	1,3	78,2
Média	1190,0	3,7	1,2	0,8	1,3	80,0
Desvio Padrão	156,4	0,5	0,0	0,0	0,0	2,2
Desvio %	13,1	13,1	2,8	2,8	0,0	2,7

Fonte: A autora, 2019.

Conforme observado nas tabelas 15 e 16, as juntas que foram jateadas apresentaram uma tensão média de ruptura (5,0 MPa) maior que as lixadas (3,7 MPa), conforme ilustrado na Figura 46. Logo, o lixamento reduziu ainda mais a tensão média de ruptura das juntas.

Figura 52 - Comparação das tensões médias de ruptura das juntas jateadas e lixadas coladas com o Masterpur Estrutural 300®



Fonte: A autora, 2019.

3.1.2.2 Influência da espessura dos adesivos e do tempo de cura para o Masterpur Estrutural 300®

A norma utilizada pelo fabricante para obter a tensão média de cisalhamento das juntas metálicas coladas com o Masterpur Estrutural 300® foi a ISO 4587, conforme indicada na tabela 6, já a norma utilizada para os testes neste trabalho foi a ASTM D1002. A utilização de normas diferentes pode ter causado essa divergência nas tensões médias de ruptura, pois a espessura indicada na norma ISO 4587 e usada nos ensaios pelo fabricante é 0,2 mm e a usada neste trabalho foi 0,5 mm. Conforme afirmado por Nascimento, 2013, no tópico 1.2 *Juntas coladas com adesivos estruturais*, quanto maior a espessura do adesivo, menor a força de ruptura da junta. Logo, para a espessura utilizada pelo fabricante do adesivo, de 0,2 mm, a tensão de ruptura deve ser maior que para a espessura de 0,5 mm.

O informativo técnico alega que a cura total do adesivo Masterpur Estrutural 300® ocorre após 24 horas da colagem. Porém, foi observada uma maior tensão de ruptura em cisalhamento após períodos maiores de cura. Novos testes foram realizados para comparar a tensão de ruptura após tempos maiores de cura deste adesivo, conforme indicado na tabela 17 para os corpos de prova jateados e na tabela 18 para os corpos de prova lixados. Outros ensaios anteriores foram utilizados como comparação.

Tabela 17 – Tensão de ruptura das juntas jateadas coladas com o Masterpur Estrutural 300® após 4 meses de cura

Corpo de prova	Força de ruptura [N]	Tensão de ruptura [Mpa]	Deslocamento [mm]	Deformação [%]	Velocidade [mm/min]	Tempo [s]
L121	2739,4	8,5	0,5	0,4	1,3	39,1
L122	2708,4	8,4	0,5	0,3	1,3	45,2
L123	2619,0	8,1	0,6	0,4	1,3	39,0
Média	2688,9	8,3	0,5	0,4	1,3	41,1
Desvio Padrão	62,5	0,2	0,0	0,0	0,0	3,5

Fonte: A autora, 2019

Tabela 18 – Tensão de ruptura das juntas lixadas coladas com o Masterpur Estrutural 300® após 2 semanas de cura

Corpo de prova	Força de ruptura [N]	Tensão de ruptura [Mpa]	Deslocamento [mm]	Deformação [%]	Velocidade [mm/min]	Tempo [s]
L16L	1338,6	4,1	0,6	0,5	1,3	59,3
L17L	1631,6	5,1	0,7	0,5	1,3	60,0
L18L	1607,9	5,0	0,7	0,5	1,3	59,0
L19L	1431,6	4,4	0,7	0,5	1,3	59,0
L110L	1267,1	3,9	0,6	0,5	1,3	58,0
Média	1455,4	4,5	0,7	0,5	1,3	59,1
Desvio Padrão	161,2	0,5	0,1	0,0	0,0	0,7

Fonte: A autora, 2019.

A tabela 19 apresenta a tensão média de ruptura para diferentes tempos de cura.

Tabela 19 – Tempo de cura e tensão de ruptura do Masterpur Estrutural 300®

Lote	Tempo de cura [horas]	Tensão [MPa]
4 (Cps 1 a 5)	648,0	4,6±0,3
4 (Cps 6 a 10)	1440,0	7,2±0,5
6 (Cps 1 a 5)	480,0	5,2±0,6
6 (Cps 6 a 10)	672,0	5,3±0,4
12 (Cps 1 a 10)	2880,0	8,3±0,2
1L (Cps 1 a 5)	24,0	3,7±0,5
1L (Cps 6 a 10)	312,0	4,5±0,5

Legenda: Cps – Corpos de prova.

Fonte: A autora, 2019.

Com base na tabela 19 pode-se observar que nas juntas que foram jateadas, para tempos de cura de 1440 horas (2 meses), a sua tensão de ruptura aumenta em um valor considerável (de aproximadamente 5,0±0,4MPa para 7,2±0,5MPa). Para tempos de cura de 2880 horas (4 meses), a tensão aumentou para 8,3±0,2MPa.

Já para as juntas lixadas, em tempos de cura de 24 horas, a tensão foi de 3,7±0,5MPa. Para tempos de cura de 312 horas (quase 2 semanas) a tensão aumentou para 4,5±0,5 MPa.

Com base nesses dados, conclui-se que ocorre um aumento significativo nas tensões de ruptura das juntas coladas com o adesivo Masterpur Estrutural 300® ao longo do tempo. Para os substratos lixados, essa cura aparenta ser mais rápida.

Com os novos valores apresentados nos ensaios para os substratos jateados acima de 1400 horas, o adesivo Masterpur Estrutural 300® se enquadra em um adesivo estrutural, conforme apresentado no tópico 1.1, embora ainda esteja abaixo do valor encontrado pelo fabricante (12,5 MPa).

Logo, conclui-se que tanto a variação de espessura utilizada no pelo fabricante com a utilizada neste trabalho, quanto o tempo de cura podem ter sido fatores de grande influência na variação da tensão de ruptura em cisalhamento das juntas coladas com este adesivo.

3.1.2.3 Comparação juntas lixadas com Masterpur Estrutural 300® com e sem aspersão de silano

Foi realizada uma análise extra para comprovar o aumento na tensão de ruptura proporcionado pela silanização. A tabela 20 apresenta o resultado do ensaio de cisalhamento com a máquina universal para as juntas coladas com o Masterpur Estrutural 300® com a superfície lixada e sem a aspersão do silano. A tabela 18 apresentou o resultado do mesmo ensaio, mas com a aspersão do silano.

Tabela 20 – Resultado do ensaio de cisalhamento na máquina universal para o Masterpur Estrutural 300® para a superfície lixada sem silano

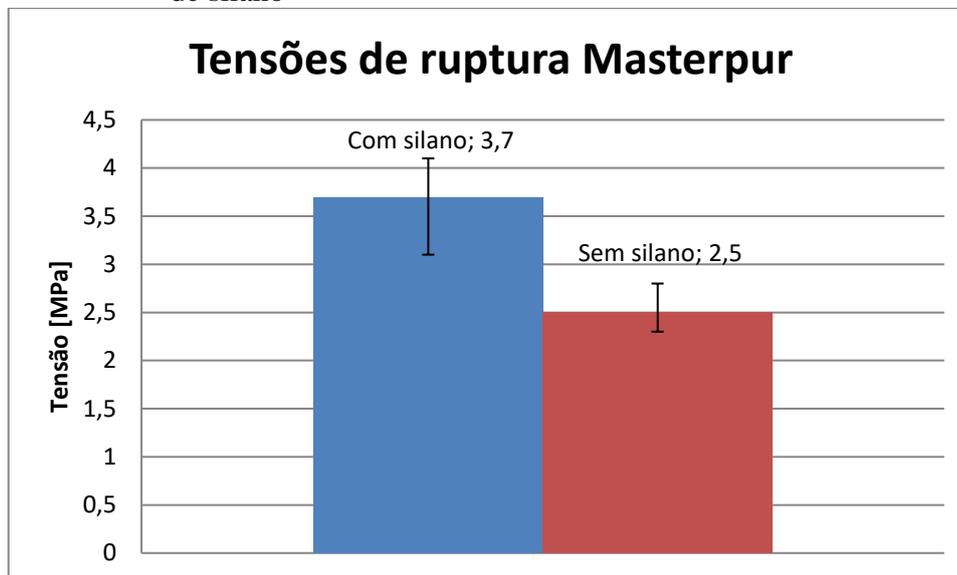
Corpo de prova	Força de ruptura [N]	Tensão de ruptura [MPa]	Deslocamento [mm]	Deformação [%]	Velocidade [mm/min]	Tempo [s]
L25L	794,8	2,5	1,2	0,8	1,3	83,8
L26L	904,7	2,8	1,1	0,8	1,3	73,6
L29L	735,5	2,3	1,2	0,8	1,3	68,2
Média	811,7	2,5	1,1	0,8	1,3	75,2
Desvio Padrão	85,9	0,3	0,1	0,0	1,3	7,9
Desvio %	10,6	10,6	5,1	5,1	0,0	10,5

Fonte: A autora, 2019.

Conforme apresentado na tabela 20, a tensão de ruptura média para as juntas coladas com o Masterpur Estrutural 300® para a superfície lixada sem aspersão do silano foi de $2,5 \pm 0,3$ MPa, já para as juntas lixadas com a aspersão de silano foi $3,7 \pm 0,5$ MPa, conforme ilustrado na tabela 18. Esses resultados indicam que a aspersão de silano contribui para um

aumento na tensão média de ruptura em cisalhamento do Masterpur Estrutural 300®, neste caso de 48%. A Figura 47 ilustra uma comparação entre essas tensões de ruptura.

Figura 53 - Comparação das tensões médias de ruptura das juntas lixadas coladas com o Masterpur Estrutural 300® com e sem aspensão de silano

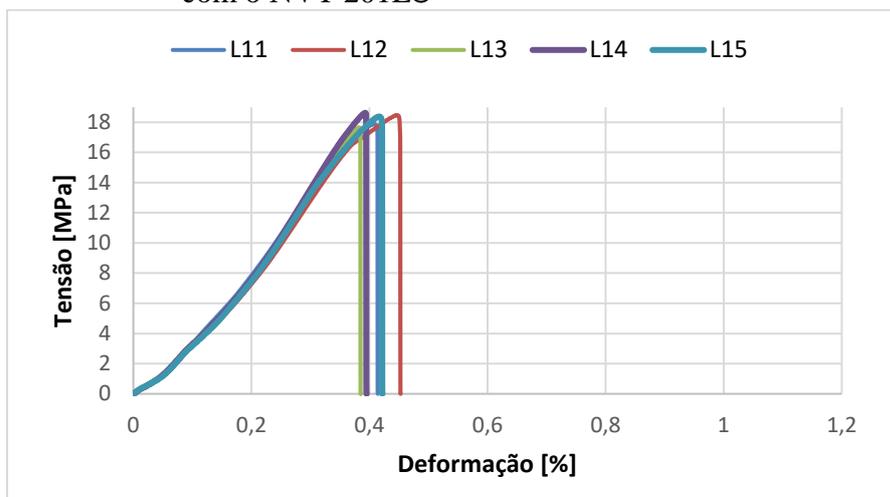


Fonte: A autora, 2019.

3.1.3 Comparação entre os ensaios de cisalhamento das juntas realizados pela máquina de ensaios universal

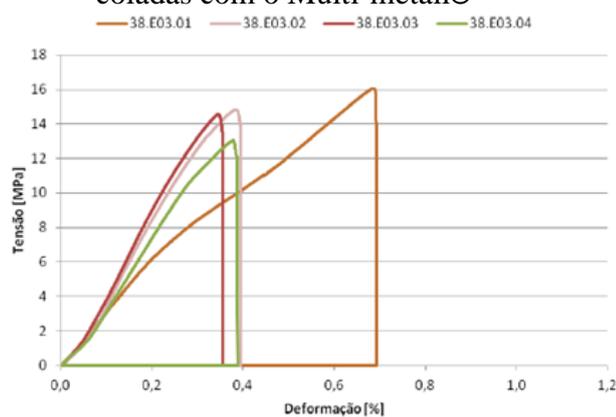
Realiza-se neste tópico, uma comparação entre os gráficos dos ensaios de cisalhamento realizados neste trabalho (NVT 201E® e Masterpur Estrutural 300®) e os encontrados no trabalho de Queiroz (2013), (Multi-metall® e Fusor®). As Figuras 48, 49, 50 e 51 apresentam os gráficos dos ensaios de tração para juntas coladas com os adesivos NVT 201E®, Multi-metall®, Masterpur Estrutural 300® e Fusor®, respectivamente.

Figura 54 - Gráfico do ensaio de cisalhamento para juntas coladas com o NVT 201E®



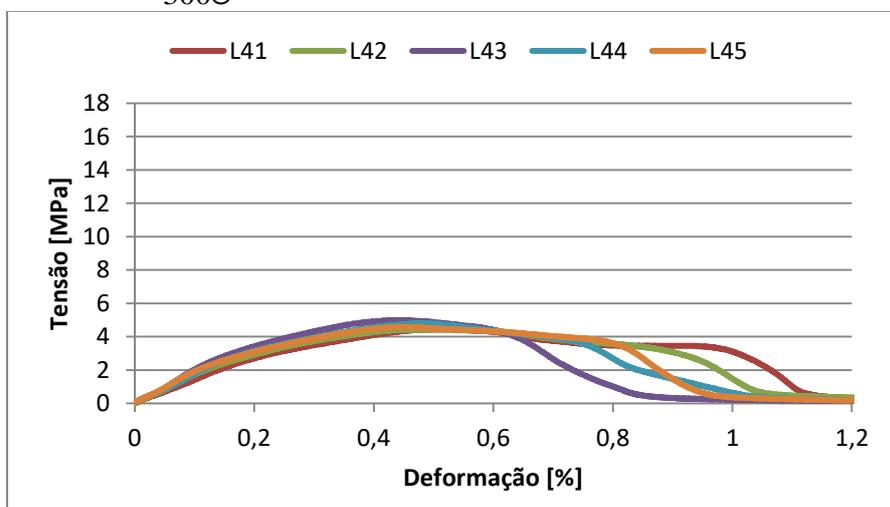
Fonte: A autora, 2019.

Figura 55 - Gráfico do ensaio de cisalhamento para juntas coladas com o Multi-metall®



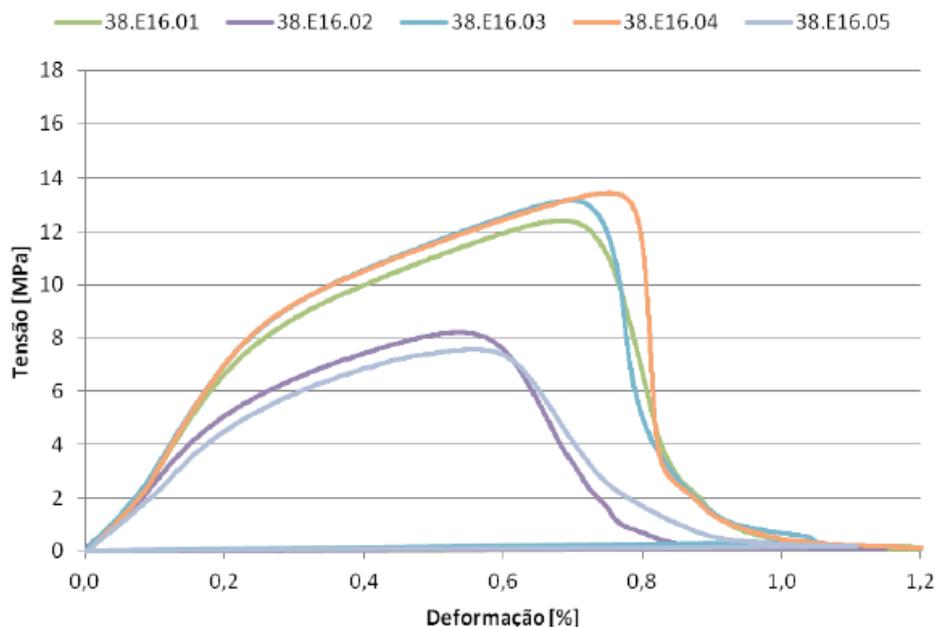
Fonte: QUEIROZ, 2013.

Figura 56 - Resultados dos ensaios de cisalhamento feitos na máquina universal das juntas coladas com o Masterpur Estrutural 300®



Fonte: A autora, 2019.

Figura 57 - Resultados dos ensaios de cisalhamento feitos na máquina universal das juntas coladas com o Fusor®



Fonte: QUEIROZ, 2013.

A tabela 21 apresenta uma comparação entre a tensão x deformação das juntas compostas por esses adesivos.

Tabela 21 – Tensão e deformação médias para as juntas coladas com cada adesivo

ADESIVOS	Tensão (MPa)	Deformação (%)
NVT 201E®	17,9	0,4
Multi-metall®	14,6	0,4
Masterpur Estrutural 300®	4,6	1,9
Fusor®	11	1,2

Fonte: A autora, 2019.

De acordo com a tabela 21, as tensões e deformações apresentadas pelo NVT 201E® e Multi-metall® foram próximas, significando que o comportamento em tração das juntas coladas com os dois adesivos de base epóxi são similares.

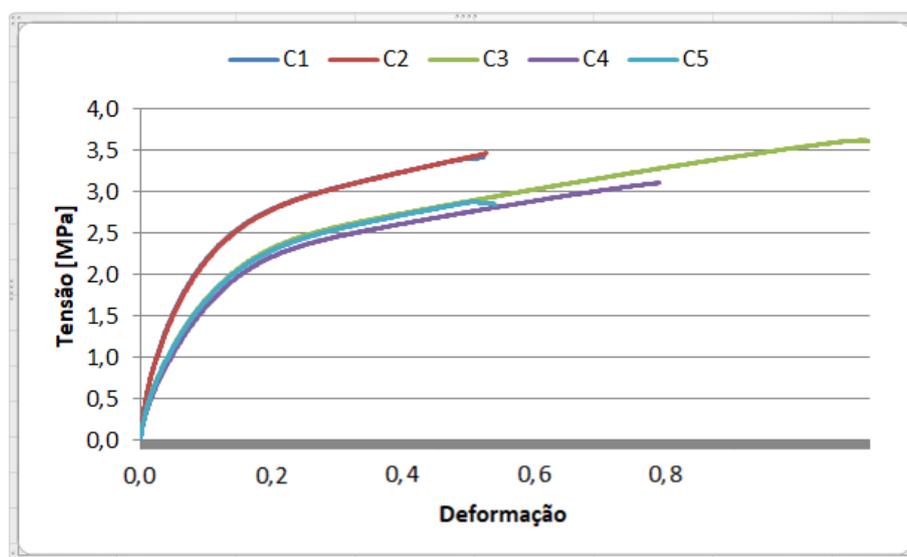
Conforme apresentado na tabela 21, a tensão de ruptura das juntas coladas com o Masterpur Estrutural 300® foi considerada muito baixa (4,6 MPa) ao comparada com a do Fusor® (10,97 MPa). De acordo com o tópico 3.1.3.1, *Influências da espessura dos adesivos*

e do tempo de cura, as tensões de ruptura das juntas coladas com o Masterpur Estrutural 300® apresentam um aumento ao longo do tempo de cura.

3.2 Comparação entre os módulos de elasticidade dos adesivos

A Figura 52 ilustra o gráfico tensão x deformação para o ensaio de tração puramente do adesivo Masterpur Estrutural 300®, realizado neste trabalho.

Figura 58 - Gráfico tensão x deformação para o Masterpur Estrutural 300®



Fonte: A autora, 2019.

A tabela 22 mostra os valores da comparação da tensão, deformação e módulo de elasticidade dos adesivos.

Tabela 22 – Comparação entre tensão, deformação e módulo de elasticidade dos adesivos

TRAÇÃO	Tensão de ruptura (MPa)	Deformação	Módulo de Elasticidade (GPa)
NVT 201E®	27,28	0,011	2,09
Multi-metall®	40,25	0,003	14,00
Masterpur Estrutural 300®	6,8	0,615	0,09
Fusor®	15,60	0,038	0,88

Fonte: A autora, 2019.

Conforme observado na tabela 22, o adesivo Multi-metall® demonstra ser muito resistente à tração, apresentando assim um comportamento frágil. O NVT 201E® já se apresenta mais flexível que o Multi-metall®. O Fusor®, por sua vez, aparenta ser muito mais rígido que o Masterpur Estrutural 300®.

3.3 Ensaios de fluência

3.3.1 NVT 201E® e comparação com Multi-metall®

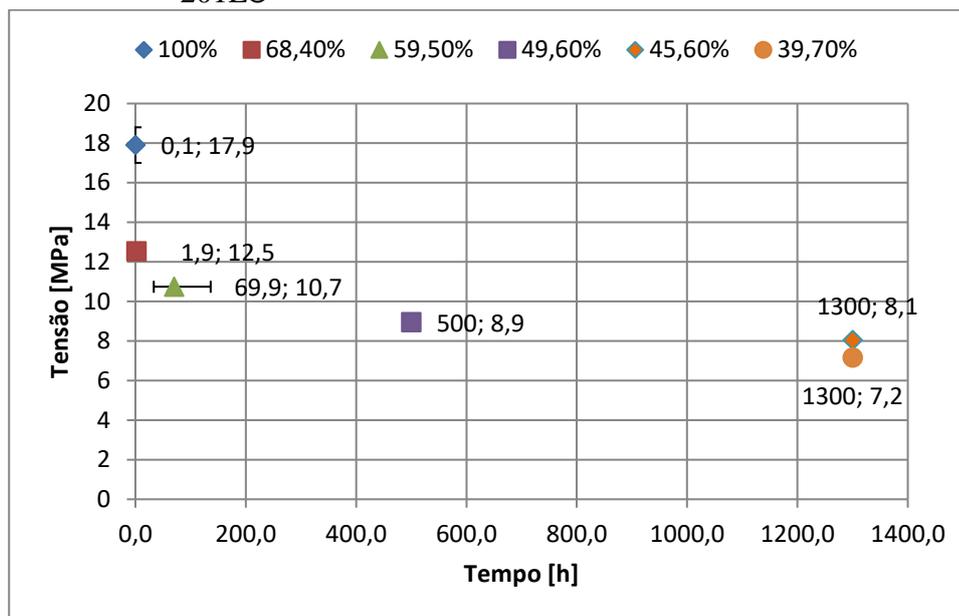
Os ensaios de fluência foram realizados para as juntas. A tabela 23 e a Figura 53 mostram os resultados dos ensaios de fluência para as juntas coladas com o adesivo NVT 201E®. O anexo apresenta os resultados dos ensaios de fluência para cada porcentagem (%) da tensão de ruptura (τ_u).

Tabela 23 – Resultado dos ensaios de fluência para as juntas coladas com o NVT 201E®

% da Tensão (τ_u)	Tensão [MPa]		Tempo até a ruptura [horas]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
100,0	17,9	2,9	0,1	3,0
68,4	12,5	0,0	1,9	71,2
59,5	10,7	0,0	69,9	47,8
45,6	8,1	0,0	>1300,0	0,0
39,7	7,2	0,0	>1300,0	0,0
49,6	8,9	0,0	Teste	0,0

Fonte: A autora, 2019.

Figura 59 - Resultados dos ensaios de fluência para as juntas com o NVT 201E®



Fonte: A autora, 2019.

As juntas testadas com 39,7% da τ_u foram retiradas após aproximadamente 1300 horas sem romper. Para as juntas testadas com 45,6% da τ_u , a tensão foi aumentada para 49,6% após 1300 horas de ensaio (sem rompimento) e os testes estão em andamento, já ultrapassando 700 horas de ensaio com esta última carga.

A tabela 24 apresenta os resultados encontrados por Queiroz (2013) para a fluência nas juntas coladas com o Multi-metall®.

Tabela 24 – Resultado dos ensaios de fluência para as juntas coladas com o Multi-metall®

% da Tensão	Tensão [MPa]		Tempo até a ruptura [horas]	
	Média	Desvio padrão (%)	Média	Desvio padrão (%)
100,0	14,1	5,2	0,2	5,5
80,9	11,4	0,0	8,0	169,7
70,2	9,9	0,0	1280,8	47,8
60,3	8,5	0,0	2334,0	0,0

Fonte: QUEIROZ, 2013.

Observa-se um comportamento bem distinto com relação à porcentagem da tensão de ruptura em fluência. Para as juntas coladas com o NVT 201E®, os testes em fluência ultrapassam as 1000 horas nas tensões de no mínimo 45,6% da τ_u (8,1 MPa). Já nas juntas

coladas com o Multi-metall® os testes ultrapassam as mesmas 1000 horas à partir de 60,3% τ_u .

Nota-se também, que em relação às tensões de ruptura em fluência, as juntas com ambos os adesivos apresentam resultados próximos. A porcentagem de 45,6% da τ_u das juntas com o NVT 201E® equivale a 8,1 MPa, e a de 60,3% da τ_u das juntas com o Multi-metall®, equivale a 8,5 MPa.

3.3.2 Masterpur Estrutural 300® e comparação com o Fusor®

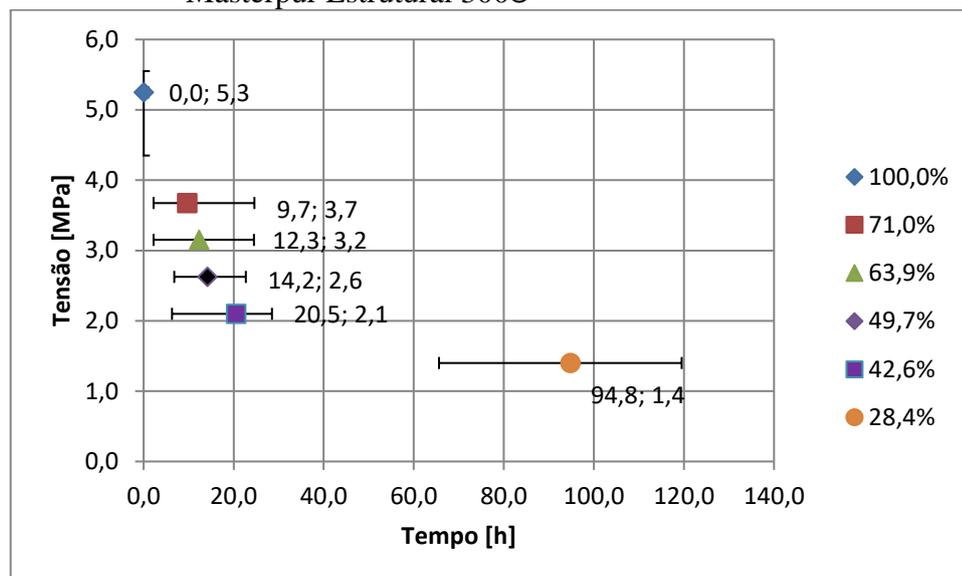
Os ensaios de fluência foram realizados as juntas coladas com o Masterpur Estrutural 300®. A tabela 25 e a Figura 54 mostram os resultados dos ensaios de fluência para as juntas coladas com o adesivo Masterpur Estrutural 300®.

Tabela 25 – Resultado dos ensaios de fluência para as juntas coladas com o Masterpur Estrutural 300®

%	Tensão [MPa]		Tempo [h]		
	Média	Desvio padrão (%)	Média	Desvio padrão (%)	Tempo cura (h)
100	5,3	8,2	0	6,1	672
71	3,7	–	9,7	108,9	2160
63,9	3,2	–	12,3	63,3	1920
49,7	2,6	–	14,2	56,1	2160
42,6	2,1	–	20,5	48,2	2568
28,4	1,4	–	94,8	27,3	2520

Fonte: A autora, 2019.

Figura 60 - Resultados para os ensaios de fluência para as juntas com o Masterpur Estrutural 300®



Fonte: A autora, 2019.

Conforme afirmado na tabela 19, a tensão de ruptura em cisalhamento para o Masterpur Estrutural 300® aumentou com o tempo de cura. Foi avaliado o tempo de cura de cada lote das juntas testadas em fluência, conforme mostra a tabela 26.

Tabela 26 – Tempo de cura e tempo de ruptura do Masterpur Estrutural 300® testado em fluência

% da τ_u	Lote	Tempo de cura [horas]	Tempo ruptura [horas]
71,0	8 (Cps 1 a 5)	1224,0	9,7
62,9	11 (Cps 6 a 10)	1728,0	12,6
49,7	11 (Cps 1 a 5)	2112,0	14,1
43,6	8 (Cps 6 a 10)	2712,0	20,3
28,4	12 (Cps 4 a 6)	2880,0	94,8

Legenda: Cps – corpos de prova

Fonte: A autora, 2019.

Conforme ilustrado na tabela 26, mesmo para tempos de cura na faixa de 2000 horas, os valores do tempo nos ensaios de fluência foram baixos. Devido a este fator e à tensão média de ruptura do Masterpur Estrutural 300® ter sido muito baixa, não foi possível completar os ensaios até encontrar a tensão que equivalesse a um tempo superior às 1000 horas do ensaio de fluência. O valor mínimo marcado no EPF é 0,4 bar, que equivale à

28,4% da τ_u (menor valor possível), e ainda assim proporcionou um tempo de ruptura extremamente baixo, de 94,8 horas.

A tabela 27 apresenta os resultados dos ensaios de fluência para as juntas coladas com o Fusor®, encontrados por Queiroz (2013).

Tabela 26 – Resultado dos ensaios de fluência para as juntas coladas com o Fusor®

% da Tensão	Tensão [MPa]		Tempo até a ruptura [horas]	
	Média	Desvio padrão (%)	Média	Desvio padrão (%)
100,0	15,0	3,9	0,2	5,2
71,3	10,7	0,0	0,5	15,3
66,0	9,9	0,0	0,1	20,1
61,0	9,2	0,0	6,2	60,4
52,0	7,8	0,0	62,9	44,3
47,3	7,1	0,0	137,8	72,9
42,7	6,4	0,0	535,0	11,7
33,3	5,0	0,0	432,0	28,0

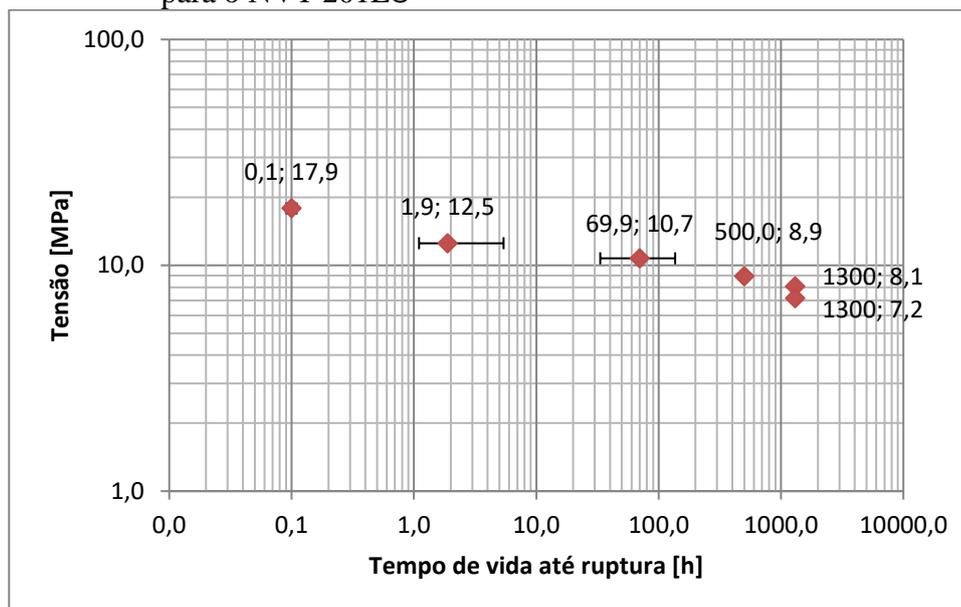
Fonte: QUEIROZ, 2013.

Nota-se que o comportamento em fluência das juntas coladas com o Masterpur Estrutural 300® e Fusor® apresentam resultados muito diferentes.

3.4 Dados experimentais do NVT 201E® em escala logarítmica

A Figura 55 mostra o gráfico dos logaritmos da tensão (MPa) em função do tempo de vida até a ruptura (h) para as juntas coladas com o NVT 201E®. Observou-se uma tendência de alinhamento dos dados experimentais, de tal forma que uma reta pudesse ser traçada. Para esta análise, foram descartados o ponto (500;8,9) pois representa os testes que ainda estão em andamento, e os pontos (1300;8,1) e (1300;7,2) que respresenta os pontos em que os ensaios foram finalizados em 1300 horas sem ruptura.

Figura 61 - Gráfico log da tensão em função do log do tempo até a ruptura para o NVT 201E®



Fonte: A autora, 2019.

Os coeficientes da equação 1 foram determinados com o auxílio da técnica de Regressão Linear, conforme descrito na seção 1.3.5.1 *Técnica de Regressão Linear*.

Algumas adaptações da equação 1 foram feitas. Houve a substituição da variável y pela tensão de carregamento das juntas, τ . A variável x foi substituída pelo tempo de vida até a ruptura, t_r e as constantes k e n por k_1 e n_1 . A relação entre a tensão de carregamento das juntas e o tempo de vida para o adesivo NVT 201E é apresentada na equação 19.

$$\tau = k_1 t_r^{n_1} \quad (19)$$

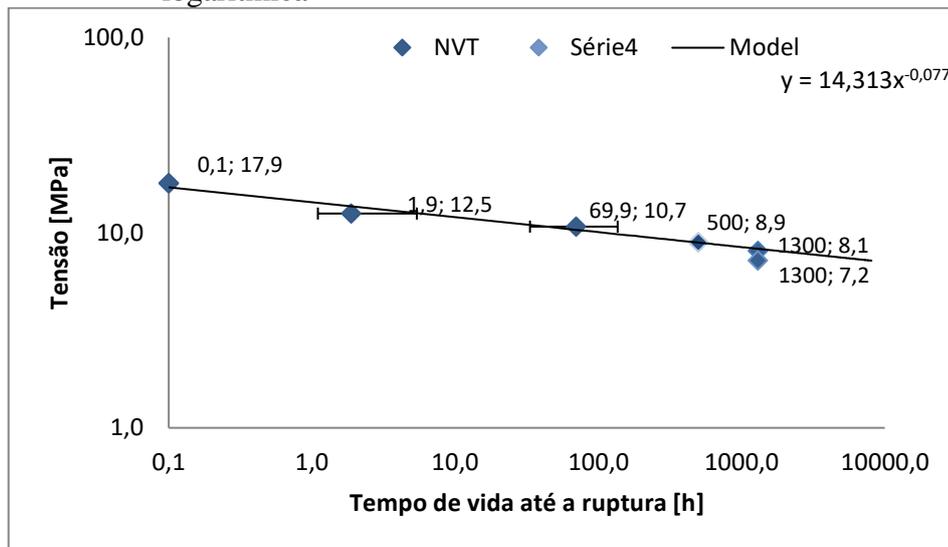
Onde por meio da Regressão Linear, os seguintes valores foram encontrados:

$$n_1 = -0,077;$$

$$k_1 = 14,313 \text{ MPa/h.}$$

A Figura 56 apresenta a curva gerada pela equação 19 em escala logarítmica. É possível notar a aproximação dos dados obtidos experimentalmente (os pontos do gráfico) com o modelo proposto.

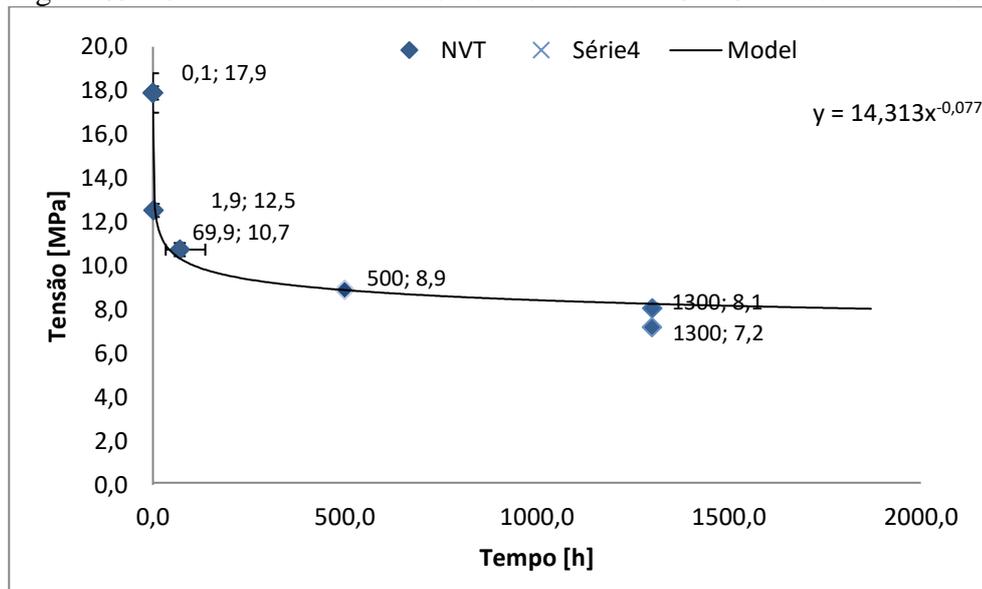
Figura 62 - Curva modelo e dados dos ensaios do NVT 201E® em escala logarítmica



Fonte: A autora, 2019.

O comportamento das juntas em escala cartesiana é apresentado na Figura 57.

Figura 63 - Curva modelo e dados do ensaio NVT 201E® em escala cartesiana



Fonte: A autora, 2019

Por meio da equação 20, pode-se estimar de forma teórica o tempo de vida das juntas em função da tensão aplicada.

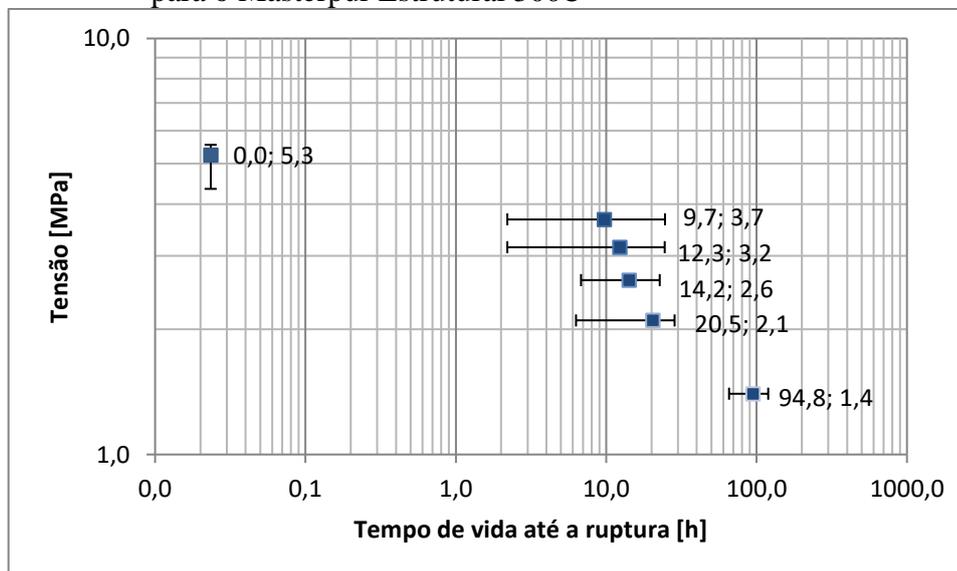
$$t_r = \frac{n_1 \sqrt{\tau}}{\sqrt{k_1}} \quad (20)$$

Assim, por meio da equação 20, o tempo de vida das juntas submetidas à tensão de 8,9 MPa pôde ser estimado, mesmo não ocorrendo ruptura. O resultado para o t_r das juntas foi aproximadamente 478,35 horas, porém as juntas carregadas com esse nível de tensão já ultrapassaram 500 horas em teste. Já para a tensão de 8,1 MPa, foi encontrado um t_r de 1625,48 horas. Para uma estimativa mais precisa seria necessário utilizar um outro método para comparar com os resultados teóricos obtidos pela equação, como o parâmetro de Larson-Miller, apresentado no tópico 1.4.5.2.

Queiroz (2013) encontrou uma estimativa do tempo de vida das juntas coladas com o Multi-metall® e com o carregamento de 60,5% da τ_u (8,5 MPa), que foi aproximadamente 48.000 horas ou 5,5 anos.

A Figura 58 apresenta o gráfico dos logaritmos da tensão (MPa) em função do tempo de vida até a ruptura (h) para as juntas coladas com o Masterpur Estrutural 300®. As figuras 59 e 60 apresentam a curva modelo dos dados dos ensaios do Masterpur Estrutural 300® em escala logarítmica e cartesiana, respectivamente. Para esta análise, foram descartados os pontos (0,0;5,3) e (94,8;1,4), pois encontraram-se fora da curva.

Figura 64 - Gráfico log da tensão em função do log do tempo até a ruptura para o Masterpur Estrutural 300®



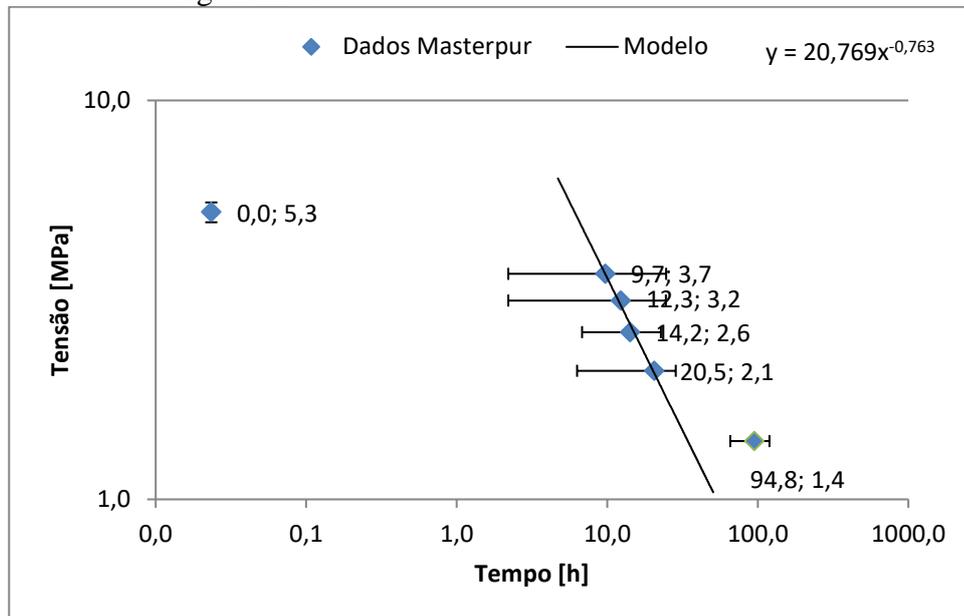
Fonte: A autora, 2019.

Substituindo na equação 19, encontra-se os seguintes valores para o Masterpur Estrutural 300®:

$$n_1 = -0,763;$$

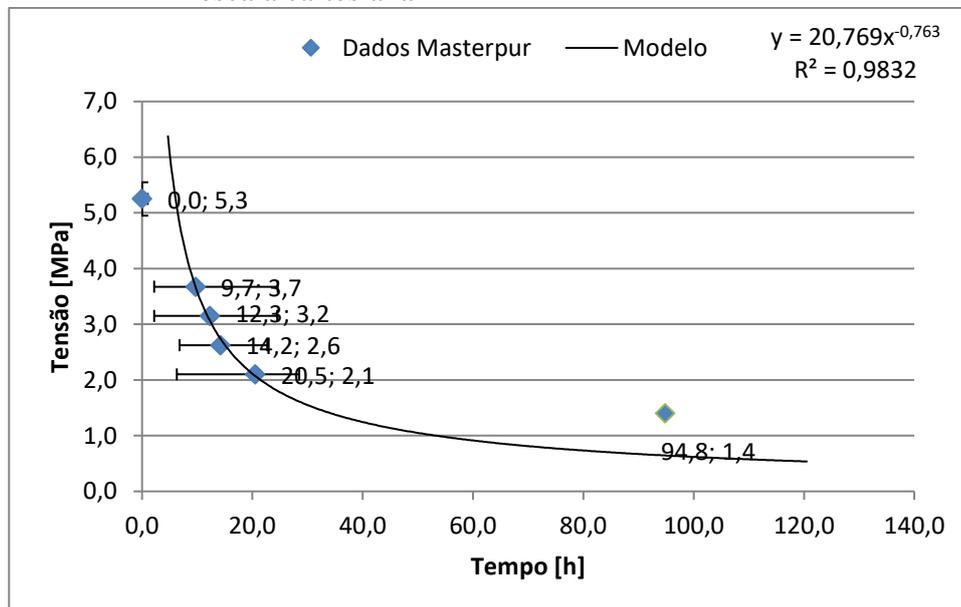
$$k_1 = 20,769 \text{ MPa/h.}$$

Figura 65 - Curva modelo e dados Masterpur Estrutural 300® em escala logarítmica



Fonte: A autora, 2019.

Figura 66 - Curva modelo e dados do Masterpur Estrutural 300® em escala cartesiana



Fonte: A autora, 2019.

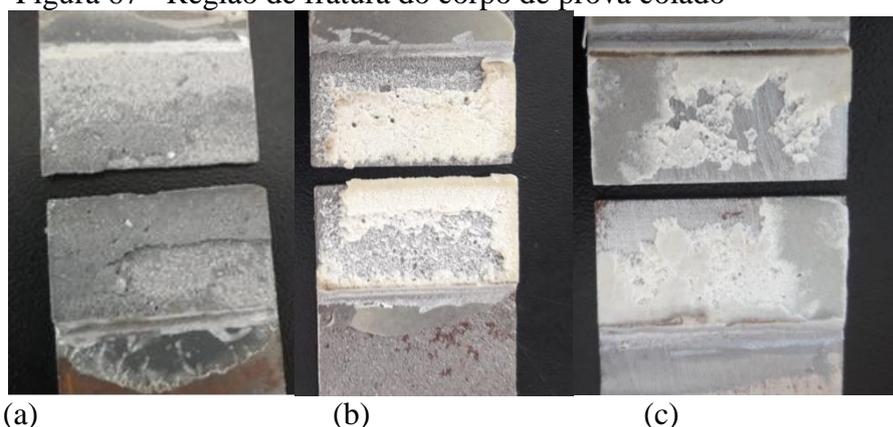
Para as juntas coladas com o adesivo Masterpur Estrutural 300® foi inviável calcular o tempo de ruptura, pois as mesmas foram rompidas no limite mínimo de carregamento possível para analisar no EPF, que foi 28,4% τ_u com apenas 94,8 horas.

Para as juntas coladas com o Fusor®, Queiroz (2013) encontrou uma estimativa de 42.000 horas ou 4,8 anos, utilizando o carregamento de 33,3% da τ_u (5,0 MPa).

3.5 Qualificação das fraturas das juntas

As fraturas dos corpos de prova colados com o NVT 201E® apresentaram falha mista (coesiva e adesiva) enquanto com o Masterpur Estrutural 300® foram predominantemente adesivas, como mostrado nas Figuras 61(a), 61(b) e 61(c). Essas fraturas foram encontradas tanto nos ensaios de tração quanto nos de fluência. Conforme afirmado no tópico 1.3.1.2 *Tipos de falhas nas juntas*, a fratura coesiva indica que a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte que a resistência interna do adesivo. Já a falha adesiva é causada normalmente por uma preparação indevida das superfícies dos substratos.

Figura 67 - Região de fratura do corpo de prova colado



Legenda: (a) – NVT 201E®; (b) – Masterpur Estrutural 300® com os substratos jateados; (c) – Masterpur Estrutural 300® com os substratos lixados.
Fonte: A autora, 2019.

O APÊNDICE-D apresenta fotos dos corpos de prova fraturados após todos os ensaios realizados.

3.6 Resultados das considerações de Fluência no Abaqus®

Para a modelagem da fluência no Abaqus® faz-se necessário realizar ensaios de fluência puramente dos adesivos NVT 201E® e Masterpur Estrutural 300®. Com o monitoramento da deformação em fluência, junto com a tensão e o tempo de ruptura, torna-se possível a modelagem da fluência no programa.

CONCLUSÃO

Essa dissertação avaliou o comportamento em fluência de juntas de metal coladas com um adesivo à base de epóxi e outro à base de poliuretano. Os testes foram realizados no Equipamento Pneumático de Fluência (EPF). Com os resultados dos testes do EPF, foi possível obter equações que representam o comportamento de fluência das juntas. Com o auxílio da técnica de regressão linear, o comportamento a longo prazo das juntas foi previsto para a temperatura ambiente. Foram realizadas comparações entre os adesivos utilizados nos testes e os adesivos utilizados em testes anteriores no LAA.

Foi constatado que para os ensaios que ultrapassaram as 1000 horas, o Multi-metall® e o NVT 201E®, ambos adesivos de base epóxi, apresentaram tensões de ruptura em fluência não muito distintas. Apesar das juntas coladas com o NVT 201E® ultrapassarem as 1000 horas de ensaio com 45,6% da τ_u e as juntas com Multi-metall® 60,3% da τ_u , essas porcentagens correspondem à tensões de ruptura de 8,1 MPa e 8,5 MPa, respectivamente. Porém, o tempo de ruptura encontrado pela regressão linear das juntas coladas com o NVT 201E® foi 1625,0 horas, enquanto pelo Multi-metall® foi 48000,0 horas. Para uma maior confiabilidade, recomenda-se utilizar outro método de extrapolação, como o Larson-Miller.

O Fusor® apresentou uma maior resistência à fluência que o Masterpur Estrutural 300®. Mesmo o Masterpur Estrutural 300® apresentando uma forte alteração na tensão de ruptura em tração com um tempo de cura maior que 1400 horas, a sua resistência à fluência foi significativamente baixa mesmo para tempos de cura elevados.

Nota-se, que para as juntas lixadas coladas com o Masterpur Estrutural 300®, o jateamento demonstra um resultado muito mais satisfatório que o lixamento, pois aumenta a rugosidade, aumentando assim a tensão média de ruptura.

As fraturas apresentadas nos corpos de prova após os ensaios de tração e fluência nas juntas coladas com o NVT 201E® foram mistas e nas coladas com o Masterpur Estrutural 300® predominantemente adesivas.

Para a modelagem da fluência no Abaqus®, é necessário realizar ensaios de fluência puramente dos adesivos para encontrar os dados a serem inseridos no programa. Com esse fim, o LAA está providenciando um equipamento para monitorar a deformação nos testes. Após adquirir estes dados experimentais, acredita-se ser possível avançar na modelagem da fluência no Abaqus® e realizar comparações entre o numérico e o experimental.

Como ainda não foram encontrados os parâmetros de fluência do Abaqus® para os adesivos testados, foram adaptados os dados de um outro adesivo de base epóxi com propriedades similares ao adesivo NVT 201E®. Desta forma, pôde-se apresentar os passos utilizados para a modelagem em fluência no Abaqus.

Sugestões para trabalhos futuros:

- a) utilizar um leitor de *strain gauges* existente no LAA para monitorar a deformação nos testes em fluência puramente dos adesivos NVT 201E® e Masterpur Estrutural 300® para a obtenção das curvas de fluência e a possível execução da completa modelagem no Abaqus;
- b) utilizar diferentes modelos no Abaqus® para a fluência de adesivos flexíveis para modelar o Masterpur Estrutural 300® e comparar com o modelo de potência;
- c) projetar um novo EPF capaz de monitorar as deformações dos ensaios e aplicar temperatura;
- d) analisar o comportamento em fluência de juntas coladas com adesivos epóxis e poliuretanos submetidos à diferentes temperaturas;
- e) realizar a modelagem em fluência no Abaqus® dos adesivos Fusor® e Multi-metall® testados por Queiroz (2013), para comparar com o experimental.

REFERÊNCIAS

ABAQUS. Dassault Systems, 2017.

ABAQUS. *Analysis user's guide*. Dassault Systems, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM A 36*: Standard specification for carbon structural steel. 1996a. 3 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D 1002*: Apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal to metal). West Conshohocken, 2005a. 5 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E 337*: Standard test method for measuring humidity with a psychrometer (the measurement of wet- and dry-bulb temperatures, West Conshohocken, PA, 2015a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D368M ASTM E139*. Standard practice for conducting creep, creep-rupture test of metallic materials. West Conshohokem, 1998a, 10 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D2294-96*. Standard Test Method for Creep Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading (Metal-to-Metal). West Conshohokem, 1996^a.

ASHBY, M. and JONES, D.R.H. *Engenharia de materiais: Uma Introdução a Propriedades, Aplicações e Projeto*. vol. 1. Rio de Janeiro: Elsevier Ltda, 2007.

ASKELAND, D. R. and FULAY, P. P. *Essentials of materials science and engineering*. 2 ed. Stamford: Cengage Learning, 2010. 627 p.

BALDAN, A. *Adhesion phenomena in bonded joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, v.38, p. 95-116, 2012.

BERRY, N. G.; D'ALMEIDA, J. R. M. *Efeito da presença de defeitos no comportamento mecânico de juntas coladas carbono-epóxi*. Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia, v.10, n.2, p.138-148, 2000.

BUDYNAS, R. G. NISBETT, J. K. *Elementos de máquinas de Shigley*. New York: Mcgraw Hill, 2008. 962 p.

CALLISTER, W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais*. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 705 p.

CAVALCANTE, A. D. S. *Modelagem numérica de escavações de túneis em maços evaporíticos*. 2012. 162 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

CAVALCANTE, A.D.S.; RAMOS, V.C.L. *Ajuste de parâmetros para modelos viscoelásticos de fluência com aplicações em rochas salinas*, 2010. Associação Argentina de Mecânica Computacional, Buenos Aires, 2010.

CARBAS R. J. C. *Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi*. 2008. 87 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

DA SILVA, R. L. R. M. *Estudo do desempenho térmico e mecânico de adesivo epóxi modificado com nanotubos de carbono e grafeno*. 2018. 131 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais). Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2018.

DA SILVA, L.F.M., MAGALHÃES, A.G. de; MOURA, M.F.S.T. de. *Juntas adesivas estruturais*. 1 ed. Porto: E. Publindústria, 2007, 358 p.

DA SILVA, L.F.M., DAS NEVES, P.J.C., ADAMS, R.D., SPELT, J.K. *Analytical models of adhesively joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, v.29, p. 319-330, 2009.

DA SILVA, L.F.M., et al. *Effect of material geometry, surface treatment, and environment on the shear strength of single lap joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, v.29 p. 621-632, 2009.

DEAN, G.D. and BROUGHTON, W.R.. *A review of creep modelling for toughened adhesives and thermoplastics*. National Physical Laboratory Hampton Road, Teddington, Middlesex, 2005.

DE SOUZA, C. A. O. *Análise de tensões e vida em fadiga de juntas coladas em estruturas aeronáuticas metálicas*. 2013. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade de Campinas, Campinas, 2013. 191 p.

DUNCAN, B. C.; OGILVIE-ROBB K., 1999. *Creep of Flexible Adhesive Joints*. Performance of adhesive joints programme. 1999.

FENG, C. *Predictions of long-term creep behavior of epoxy adhesives for structural applications*. 2004. Thesis (Master in Mechanical Engineering). Texas A&M University. Texas, United States, 2004.71 p.

FILHO, D. F. et al. *O que fazer e o que não fazer com a Regressão: pressupostos e aplicações do modelo linear de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO)*. Revista Política Hoje, v. 20, n.1, p.44-99, 2011.

FREIRE, H. M. *Desenvolvimento de um dispositivo experimental para medir a resistência à fluência de ligações adesivas*. 2015. 82 f. Dissertação (Mestrado integrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2015.

GENGROSS, Y; PELLEGRINO, Xu S. *Viscoelastic behavior of pumpkin balloons*. Science Direct, Advances in Space Research, v. 42, n. 10, p. 1683-1690, 2008.

GOLDHOFF, R. M. *Which method for extrapolating stress-rupture data?* Mater Design Eng., 49(4), 93, 1959.

HIBBELER, R.C. *Resistência dos materiais*. 7 ed. Cambridge: Pearson, 2010. 637 p.

HOLDSWORTH, S. et al. *Factors influencing creep model equation selection*. International Journal of Pressure Vessels and Piping. v.85, n.1-2, p.80-88, 2008.

JESUS, A. *Modelo de Elementos Finitos para simulação de juntas sobrepostas coladas em compósitos laminados*. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2003.

JÚNIOR, J. G. de O. *Estudo do reparo com chapa colada em tubulações de aço com diferentes tratamentos superficiais*. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais), Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2017.

KHALILI S.M.R.; JAFARKARIMI, M.H.; ABDOLLAHI, M.A. 2009. *Creep analysis of fiber reinforced adhesives in single lap joints – experimental study*. International Journal of Adhesion & Adhesives. v. 29, n. 6, p. 656-661.

KAWAKAMI, M. S. *Estudo da fluência dos aços inoxidáveis ferríticos estabilizados ao titânio e nióbio e simulação numérica do processo no Abaqus*, 2011. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em engenharia mecânica). Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

LEWIS-BECK, M. *Applied Regression: na introduction*. Series Quantitative Applications in the Social Sciences. SAGE, 1980.

LIMAVERDE, A.M. et al., *Estudo da influência de diferentes tratamentos superficiais na resistência mecânica de juntas de aço carbono coladas com adesivo epóxi*. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DOS MATERIAIS, 2008, Nova Friburgo. Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia dos Materiais. Nova Friburgo, 2008.

LUBOWIECKA, I., et al. *Experimentation, material modelling and simulation of bonded joints with a flexible adhesive*. International Journal of Adhesion & Adhesives.v.37, p.56-64, 2012.

McGEORGE, D. *Inelastic fracture of adhesively bonded overlap joints*. Engineering Fracture Mechanics v.77, p.1–21, 2010.

MASTERPOL. Informativo Técnico, 2018.

MATLAB. Mathworks, 2019.

MEYERS, M., CHAWLA, K. *Mechanical behavior of materials*, 2. ed. E.Cambridge University Press, United Kingdon, 2009. 882 p.

- MIRAVALLS, M. and DHARMAWAN, I. *The creep behavior of adhesives*. 2007. 86 p. Thesis (Master in the International Master's Programme Structural Engineering). Chalmers University of Technology. Goteborg, Sweden, 2007.
- MOURA, L. S., 2016. *Colagem de estruturas metálicas*. 2016. 109 f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em engenharia mecânica). Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- NASCIMENTO, A. N. S. *Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação materiais compósitos*. 2013. 73 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica Ramo de Produção, Desenvolvimento e Engenharia Automóvel). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- NAUMENKO, K., ALTENBACH, H. *Modeling of creep for structural analysis*. New York: Springer Berlin Heidelberg New York, German, 2007. 220 p.
- NETO, A. S. *Estudo de tensões e modos de falha no desenvolvimento de adesivos nanomodificados e juntas coladas*. 2016. 122 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2016.
- NETO, J. A. B. P. *Estudo paramétrico de juntas adesivas em material compósito*. 2011. 87 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.
- NETO, R. M. C. *Análise numérica e experimental de juntas coladas em duas configurações: junta de cisalhamento simples e junta de carregamento combinado*. 2017. 159 f. Tese (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais), Instituto Politécnico, Universidade do Estado Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2017.
- NOVATEC. Informativo Técnico, 2019.
- PASSOS, A. C. V. *Estudo do comportamento mecânico de juntas coladas de material pultrudado em matriz poliéster*. 2016. 157 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais). Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2016.
- PENNY, R. K.; MARRIOTT, D.L. *Design for Creep*. 2. ed. E.Springer Science+Business Media Dordrecht, 1995. 291 p.
- PETRIE, E. M. *Handbook of Adhesives and Sealants*. London, UK: E.McGraw-Hill, 2000.
- PETROBRAS. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br>>, Acesso em 15 junho de 2018.
- PIZZI, A.; MITTAL, K.L. *Handbook of adhesive technology, revised and expanded*. 2013. 2.New York: E.Marcel Dekker, 2013. 1031 p.
- QUEIROZ, R. A. *Estudo do comportamento em fluência de juntas metálicas coladas*. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais). Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2013.

QUINI, J. G. *Adesivos estruturais uretânicos aplicados a combinações de compósitos, plásticos e metais*. 2011. 141 f. Dissertação (Doutorado em Tecnologia Nuclear – Materiais). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

RIBEIRO, M. L. *Programa para análise de juntas coladas: compósito compósito e metal compósito*. 2009. 163 f. Disertação (Mestrado de Engenharia Mecânica). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

SAMPAIO, E. M.. *Um modelo de dano em juntas coladas*. 1998. 111 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

SAMPAIO, E.M.; et al. *Aderência de juntas metálicas de cisalhamento coladas com adesivos epoxídicos de baixa e alta viscosidade*. Anais do 17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz de Iguaçu, 2006.

SHIUH-CHUAN. *Stress analysis of adhesively bonded lap joints*. Composite Structures 47, 1999, 678 p.

SU, N. and MACKIE, R. I. *Two-dimensional creep analysis of structural adhesive joints*. *International J. of Adhesion and Adhesives* v. 13, n.1, p. 33-40, 1993.

ZEHSAZ, Mohammad; VAKILI-TAHAMI, Farid; SAIEIMI-SADIGH, Mohammad-Ali. *Creep analysis of adhesively bonded single lap joint using finite element method*. *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 28, n.6, p. 2743-2748, 2014.

APÊNDICE-A – RUGOSIDADE

Tabela A.1 – Rugosidade para as juntas empenadas e desempenadas

Amostra	Empenado		Desempenado PVC	
	Ra(μm)	Rt(μm)	Ra(μm)	Rt(μm)
1	12,0	86,0	13,2	91,9
2	13,5	98,5	10,7	82,8
3	10,8	74,1	11,1	79,7
4	10,4	89,5	11,3	78,5
Média	11,7	87,0	11,6	83,2
Desvio Padrão (%)	11,9	11,6	9,6	7,3

Fonte: A autora, 2019.

Tabela A.2 – Rugosidade após o jateamento 1 e após a silanização para o lote 1

Amostra	Lote 1 - 23/05/19 Jateamento 1		Pós jateamento abrasivo		Pós silanização	
	Ra(μm)	Rt(μm)	Ra(μm)	Rt(μm)	Ra(μm)	Rt(μm)
1	9,9	91,7	9,0	69,2	9,0	69,2
2	9,2	81,2	10,6	78,1	10,6	78,1
3	11,4	87,9	9,0	69,3	9,0	69,3
Média	10,2	86,9	9,5	72,2	9,5	72,2
Desvio Padrão (%)	11,1	6,1	9,6	7,1	9,6	7,1

Fonte: A autora, 2019.

Tabela A.3 – Rugosidade após o jateamento 1 e após a silanização para o lote 2

Amostra	Lote 2 - 23/05/19 Jateamento 1		Pós jateamento abrasivo		Pós-silanização	
	Ra(μm)	Rt(μm)	Ra(μm)	Rt(μm)	Ra(μm)	Rt(μm)
1	11,9	91,7	10,3	74,6	10,3	74,6
2	10,3	71,6	10,4	68,8	10,4	68,8
3	10,4	74,8	11,7	78,8	11,7	78,8
Média	10,9	79,4	10,8	74,1	10,8	74,1
Desvio Padrão (%)	8,2	13,6	7,2	6,8	7,2	6,8

Fonte: A autora, 2019.

Tabela A.4 – Rugosidade após o jateamento 1 e após a silanização para o lote 3

Lote 3 - 23/05/19 Jateamento 1 Amostra	Pós jateamento abrasivo		Pós-silanização	
	Ra(μm)	Rt(μm)	Ra(μm)	Desvio
1	10,6	73,3	9,2	17,9
2	11,3	81,2	11,2	16,0
3	11,6	75,6	10,3	11,3
Média	11,2	76,7	10,2	15,1
Desvio Padrão (%)	4,6	5,3	9,7	22,6

Fonte: A autora, 2019.

Tabela A.5 – Rugosidade após o jateamento 1 e após a silanização para o lote 4

Lote 4 - 23/05/19 Jateamento 1 Amostra	Pós jateamento abrasivo		Pós-silanização	
	Ra(μm)	Rt(μm)	Ra(μm)	Rt(μm)
1	11,7	74,1	10,1	78,8
2	9,1	65,2	11,4	85,4
3	10,1	75,9	11,7	81,6
Média	10,3	71,7	11,1	81,9
Desvio Padrão (%)	12,6	8,0	7,7	4,0

Fonte: A autora, 2019.

Tabela A.6 – Rugosidade após o jateamento 2 e após a silanização para o lote 5

Lote 5 - 23/05/19 Jateamento 2 Amostra	Pós jateamento abrasivo		Pós silaização	
	Ra(μm)	Rt(μm)	Ra(μm)	Rt(μm)
1	9,9	75,5	9,8	78,0
2	10,7	75,9	10,1	70,4
3	11,3	78,2	11,5	17,4
Média	10,6	76,5	10,5	55,3
Desvio Padrão (%)	6,9	1,9	8,6	59,7

Fonte: A autora, 2019.

Tabela A.7 – Rugosidade após o jateamento 2 e após a silanização para o lote 6

Lote 6 - 23/05/19 Jateamento 2 Amostra	Pós jateamento abrasivo		Pós silanização	
	Ra(μm)	Rt(μm)	Ra(μm)	Rt(μm)
1	11,6	83,4	11,1	79,0
2	10,9	79,1	9,9	70,7
3	10,2	79,3	9,9	77,3
Média	10,9	80,6	10,3	75,7
Desvio Padrão (%)	6,4	3,0	6,9	5,8

Fonte: A autora, 2019.

Tabela A.8 – Rugosidade após o jateamento 2 e após a silanização para o lote 7

Lote 7 - 23/05/19 Jateamento 2 Amostra	Pós jateamento abrasivo		Pós silanização	
	Ra(μm)	Rt(μm)	Ra(μm)	Rt(μm)
1	10,8	75,0	10,4	74,5
2	9,3	65,4	9,8	70,5
3	9,0	59,9	9,5	64,5
Média	9,7	66,8	9,9	69,8
Desvio Padrão (%)	10,1	11,4	4,6	7,2

Fonte: A autora, 2019.

Tabela A9 – Rugosidade após o jateamento 2 e após a silanização para o lote 8

Lote 8 - 23/05/19 Jateamento 2 Amostra	Pós jateamento abrasivo		Pós silanização	
	Ra(μm)	Rt(μm)	Ra(μm)	Rt(μm)
1	10,3	66,2	9,9	63,9
2	10,7	78,7	10,9	79,3
3	9,7	67,4	10,5	71,8
Média	10,2	70,8	10,4	71,7
Desvio Padrão (%)	5,1	9,7	4,7	10,7

Fonte: A autora, 2019.

Tabela A.10 – Rugosidade após o jateamento 2 e após a silanização para o lote 9

Lote 9 - 23/05/19 Jateamento 2 Amostra	Pós jateamento abrasivo		Pós silanização	
	Ra(μm)	Rt(μm)	Ra(μm)	Rt(μm)
1	10,0	66,3	9,8	67,9
2	9,3	71,4	9,3	69,6
3	9,2	62,4	9,5	65,7
Média	9,5	66,7	9,5	67,7
Desvio Padrão (%)	4,4	6,8	2,5	2,9

Fonte: A autora, 2019.

Tabela A.11 – Rugosidade após o jateamento 2 e após a silanização para o lote 10

Lote 10 - 23/05/19 Jateamento 2 Amostra	Pós jateamento abrasivo		Pós silanização	
	Ra(μm)	Rt(μm)	Ra(μm)	Rt(μm)
1	9,9	67,3	10,2	79,8
2	9,6	72,2	9,3	66,3
3	10,0	71,9	9,8	72,2
Média	9,8	70,5	9,8	72,8
Desvio Padrão (%)	2,1	3,9	4,5	9,3

Fonte: A autora, 2019.

Tabela A.12 – Rugosidade após o jateamento 2 e após a silanização para o lote 11

Lote 11 - 23/05/19 Jateamento 2 Amostra	Pós jateamento abrasivo		Pós silanização	
	Ra(μm)	Rt(μm)	Ra(μm)	Rt(μm)
1	8,6	72,0	8,3	61,4
2	9,2	64,6	9,1	63,3
3	10,6	72,8	10,6	76,7
Média	9,5	69,8	9,4	67,1
Desvio Padrão (%)	10,9	6,5	12,3	12,4

Fonte: A autora, 2019.

Tabela A.13 – Rugosidade após o jateamento 2 e após a silanização para o lote 12

Lote 12 - 23/05/19 Jateamento 2	Pós jateamento abrasivo		Pós silanização	
	Amostra	Ra(μm)	Rt(μm)	Ra(μm)
1	10,1	69,1	9,1	65,7
2	11,0	81,1	11,3	82,2
3	11,1	79,1	11,6	85,6
Média	10,7	76,4	10,7	77,8
Desvio Padrão (%)	5,1	8,4	13,0	13,7

Fonte: A autora, 2019.

Tabela A.14 – Rugosidade após o lixamento e após a silanização para o lote 13

Lote 13 - 17/06/19	Pós jateamento abrasivo		Pós silaização	
	Amostra	Ra(μm)	Rt(μm)	Ra(μm)
1	0,6	6,3	0,4	4,6
2	0,7	6,9	0,5	6,4
3	0,8	9,2	0,5	5,3
Média	0,7	7,5	0,5	5,4
Desvio Padrão (%)	13,7	20,3	13,7	17,1

Fonte: A autora, 2019.

Tabela A.15 – Condições de colagem

Lote	Temperatura [°C]	Umidade [%]	Data	Adesivo	Tempo Trabalho [min]
L1	23,4	60,0	29/11/2018	NVT	15,0
L2	23,1	62,0	04/12/2018	NVT	15,0
L3	23,0	60,0	05/12/2018	NVT	15,0
L4	23,6	59,0	12/12/2018	Master	10,0
L5	23,6	64,0	05/02/2019	NVT	15,0
L6	22,0	68,0	06/02/2019	Master	10,0
L7	21,4	74,0	07/02/2019	NVT	15,0
L8	22,0	68,0	11/02/2019	Master	10,0
L9	24,0	70,0	12/02/2019	NVT	10,0
L10	24,9	75,0	19/02/2019	NVT	10,0
L11	24,0	70,0	25/02/2019	Master	10,0
L12	24,0	72,0	26/02/2019	Master	10,0
Média	23,3	66,8	-		12,1

Fonte: A autora, 2019.

APÊNDICE-B – ENSAIOS DE FLUÊNCIA PARA O NVT 201E®

Tabela B.1 – Resultados do ensaio de fluência a 68,4% da tensão máxima para o NVT 201E®

Corpo de prova	Pressão [bar]	Tensão [MPa]	Tempo [h]	% da τ_u	Data atualização	Equipam. de teste
L21	3,5	12,4	1,5	68,4	12/12/2018	EPF
L22	3,5	12,4	5,4	68,4	12/12/2018	EPF
L23	3,5	12,4	1,1	68,4	12/12/2018	EPF
L24	3,5	12,4	2,2	68,4	12/12/2018	EPF
L25	3,5	12,4	1,5	68,4	12/12/2018	EPF
L26	3,5	12,4	1,3	68,4	12/12/2018	EPF
L27	3,5	12,4	1,3	68,4	12/12/2018	EPF
L28	3,5	12,4	N.I.	68,4	12/12/2018	EPF
L29	3,5	12,4	1,5	68,4	12/12/2018	EPF
L210	3,5	12,4	1,3	68,4	12/12/2018	EPF
Média	3,5	12,4	1,9	68,4		
Máximo	3,5	12,4	5,4	68,4		
Mínimo	3,5	12,4	1,1	68,4		
Desv. Pad. [%]	0	0	71,5	0		

Fonte: A autora, 2019.

Tabela B.2 – Resultados do ensaio de fluência a 59,5% da tensão máxima para o NVT 201E®

Corpo de prova	Pressão [bar]	Tensão [MPa]	Tempo [h]	% da τ_u	Data atualização	Equipam. de teste
L31	3	10,7	33,3	59,5	18/12/2018	EPF
L32	3	10,7	100,3	59,5	18/12/2018	EPF
L33	3	10,7	59,4	59,5	18/12/2018	EPF
L34	3	10,7	39,3	59,5	18/12/2018	EPF
L35	3	10,7	91,5	59,5	18/12/2018	EPF
L36	3	10,7	51,3	59,5	18/12/2018	EPF
L37	3	10,7	91,2	59,5	18/12/2018	EPF
L38	3	10,7	136,4	59,5	18/12/2018	EPF
L39	3	10,7	42,4	59,5	18/12/2018	EPF
L310	3	10,7	53,6	59,5	18/12/2018	EPF
Média	3	10,7	69,9	59,5		
Máximo	3	10,7	5,4	59,5		
Mínimo	3	10,7	1,1	59,5		
Desv. Pad. [%]	0	0	47,8	0		

Fonte: A autora, 2019.

Tabela B.3 – Resultados do ensaio de fluência a 49,6% da tensão máxima para o NVT 201E®

Corpo de prova	Pressão [bar]	Tensão [MPa]	Tempo [h]	% da τ_u	Data atualização	Equipam. de teste
L71	2,5	8,9	198,4	49,6	21/02/2019	EPF
L72	2,5	8,9	56,1	49,6	21/02/2019	EPF
L73	2,5	8,9	N.I.	49,6	21/02/2019	EPF
L74	2,5	8,9	67,3	49,6	21/02/2019	EPF
L75	2,5	8,9	199,2	49,6	21/02/2019	EPF
Média	2,5	8,9	130,3	49,6		
Máximo	2,5	8,9	199,2	49,6		
Mínimo	2,5	8,9	56,1	49,6		
Desv. Pad. [%]	0	0	60,9	0		

Fonte: A autora, 2019.

Tabela B.4 – Resultados do ensaio de fluência a 45,6% da tensão máxima para o NVT 201E®

Corpo de prova	Pressão [bar]	Tensão [MPa]	Tempo [h]	% da τ_u	Data atualização	Equipam. De teste
L51	2,3	8,2	>1300	45,6	02/05/2019	EPF
L52	2,3	8,2	>1300	45,6	02/05/2019	EPF
L53	2,3	8,2	>1300	45,6	02/05/2019	EPF
L54	2,3	8,2	>1300	45,6	02/05/2019	EPF
L55	2,3	8,2	>1300	45,6	02/05/2019	EPF
L56	2,3	8,2	>1300	45,6	02/05/2019	EPF
L57	2,3	8,2	>1300	45,6	02/05/2019	EPF
L58	2,3	8,2	>1300	45,6	02/05/2019	EPF
L59	2,3	8,2	>130	45,6	02/05/2019	EPF
L510	2,3	8,2	>1300	45,6	02/05/2019	EPF
Média	2,3	8,2	>1300	45,6		
Máximo	2,3	8,2	>1300	45,6		
Mínimo	2,3	8,2	>1300	45,6		
Desv. Pad. [%]	0	0	0	0		

Fonte: A autora, 2019.

Tabela B.5 – Resultados do ensaio de fluência a 39,7% da tensão máxima para o NVT 201E®

Corpo de prova	Pressão [bar]	Tensão [MPa]	Tempo [h]	% da τ_u	Data atualização	Equipam. De teste
L91	2	7,1	>1300	39,7	20/03/2018	EPF
L92	2	7,1	>1300	39,7	20/03/2018	EPF
L93	2	7,1	>1300	39,7	20/03/2018	EPF
L94	2	7,1	>1300	39,7	20/03/2018	EPF
L95	2	7,1	>1300	39,7	20/03/2018	EPF
L96	2	7,1	>1300	39,7	20/03/2018	EPF
L97	2	7,1	>1300	39,7	20/03/2018	EPF
L98	2	7,1	>1300	39,7	20/03/2018	EPF
L99	2	7,1	>1300	39,7	20/03/2018	EPF
L910	2	7,1	>1300	39,7	20/03/2018	EPF
Média	2	7,1	>1300	39,7		
Máximo	2	7,1	>1300	39,7		
Mínimo	2	7,1	>1300	39,7		
Desv. Pad. [%]	0	0	0	0		

Fonte: A autora, 2019.

APÊNDICE-C – ENSAIOS DE FLUÊNCIA PARA O MASTERPUR ESTRUTURAL 300®

Tabela C.1 – Resultados do ensaio de fluência a 71% da tensão máxima para o Masterpur Estrutural 300®

Corpo de prova	Pressão [bar]	Tensão [MPa]	Tempo [h]	% da τ_u	Data atualização	Equipam. de teste
L81	1	3,6	10,3	71	02/05/2019	EPF
L82	1	3,6	24,6	71	02/05/2019	EPF
L83	1	3,6	5	71	02/05/2019	EPF
L84	1	3,6	2,2	71	02/05/2019	EPF
L85	1	3,6	3,5	71	02/05/2019	EPF
Média	1	3,6	9,7	71		
Máximo	1	3,6	24,6	71		
Mínimo	1	3,6	2,2	71		
Desv. Pad. [%]	0	0	108,8	0		

Fonte: A autora, 2019.

Tabela C.2 – Resultados do ensaio de fluência a 63,9% da tensão máxima para o Masterpur Estrutural 300®

Corpo de prova	Pressão [bar]	Tensão [MPa]	Tempo [h]	% da τ_u	Data atualização	Equipam. De teste
L116	0,9	3,2	10,3	63,9	03/05/2019	EPF
L117	0,9	3,2	24,5	63,9	03/05/2019	EPF
L118	0,9	3,2	2,2	63,9	03/05/2019	EPF
L119	0,9	3,2	3,5	63,9	03/05/2019	EPF
L1110	0,9	3,2	N.I.	63,9	03/05/2019	EPF
Média	0,9	3,2	12,3	63,9		
Máximo	0,9	3,2	24,5	63,9		
Mínimo	0,9	3,2	2,2	63,9		
Desv. Pad. [%]	0,0	0,0	101,3	63,9		

Fonte: A autora, 2019.

Tabela C.3 – Resultados do ensaio de fluência a 49,7% da tensão máxima para o Masterpur Estrutural 300®

Corpo de prova	Pressão [bar]	Tensão [MPa]	Tempo [h]	% da τ_u	Data atualização	Equipam. De teste
L111	0,7	2,5	19,24	49,7	23/05/2019	EPF
L112	0,7	2,5	22,42	49,7	23/05/2019	EPF
L113	0,7	2,5	N.I.	49,7	23/05/2019	EPF
L114	0,7	2,5	8,06	49,7	23/05/2019	EPF
L115	0,7	2,5	6,48	49,7	23/05/2019	EPF
Média	0,7	2,5	14,1	49,7		
Máximo	0,7	2,5	22,7	49,7		
Mínimo	0,7	2,5	6,8	49,7		
Desv. Pad. [%]	0,0	0,0	56,7	0,0		

Fonte: A autora, 2019.

Tabela C.4 – Resultados do ensaio de fluência a 42,6% da tensão máxima para o Masterpur Estrutural 300®

Corpo de prova	Pressão [bar]	Tensão [MPa]	Tempo [h]	% da τ_u	Data atualização	Equipam. De teste
L86	0,6	2,1	21,3	42,6	06/06/2019	EPF
L87	0,6	2,1	25,5	42,6	06/06/2019	EPF
L88	0,6	2,1	N.I.	42,6	06/06/2019	EPF
L89	0,6	2,1	6,2	42,6	06/06/2019	EPF
L810	0,6	2,1	28,3	42,6	06/06/2019	EPF
Média	0,6	2,1	20,3	42,6		
Máximo	0,6	2,1	28,5	42,6		
Mínimo	0,7	2,1	6,3	42,6		
Desv. Pad. [%]	0,0	0,0	48,5	0,0		

Fonte: A autora, 2019.

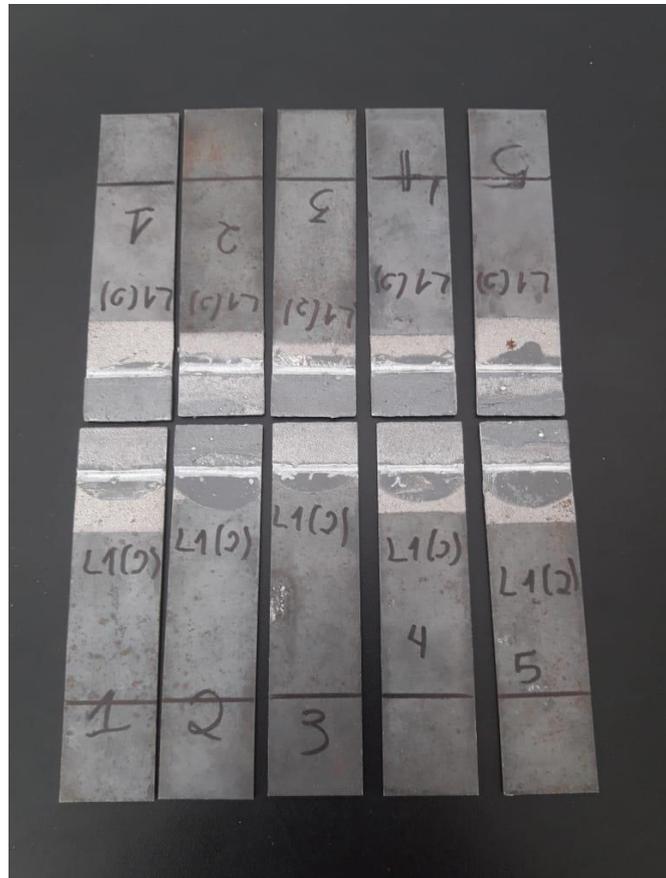
Tabela C.5 – Resultados do ensaio de fluência a 28,4% da tensão máxima para o Masterpur Estrutural 300®

Corpo de prova	Pressão [bar]	Tensão [MPa]	Tempo [h]	% da τ_u	Data atualização	Equipam. De teste
L124	0,4	1,4	119,5	28,4	26/06/2019	EPF
L125	0,4	1,4	99,4	28,4	26/06/2019	EPF
L126	0,4	1,4	65,6	28,4	26/06/2019	EPF
Média	0,4	1,4	94,8	28,4		
Máximo	0,4	1,4	119,5	28,4		
Mínimo	0,4	1,4	65,6	28,4		
Desv. Pad. [%]	0,0	0,0	27,3	0,0		

Fonte: A autora, 2019.

APÊNDICE-D – FOTOS DOS CORPOS DE PROVA FRATURADOS

Figura D.1 - Lote de juntas coladas com o adesivo NVT 201E® após ensaio de tração no EPF



Fonte: A autora, 2019.

Figura D.2 - Lote de juntas coladas com o adesivo NVT 201E® após um ensaio de fluência no EPF



Fonte: A autora, 2019.

Figura D.3 - Lote de juntas coladas com o adesivo Masterpur Estrutural 300® após ensaio de tração pelo EPF



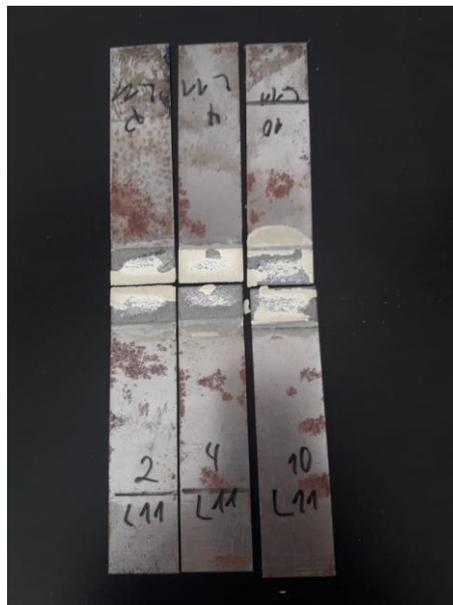
Fonte: A autora, 2019.

Figura D.4 - Lote de juntas coladas com o adesivo Masterpur Estrutural 300® (com a chapa jateada) após ensaio de tração pela máquina universal



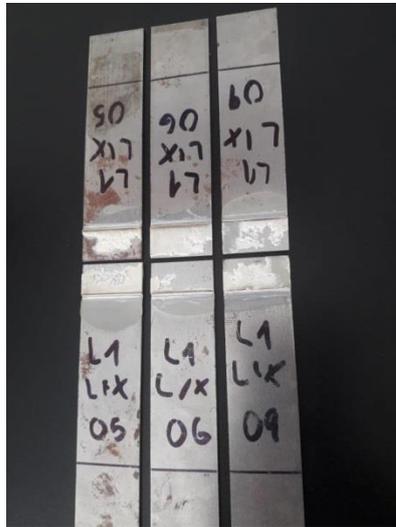
Fonte: A autora, 2019.

Figura D.5 - Juntas coladas com o adesivo Masterpur Estrutural 300® (com a chapa jateada) após um ensaio de fluência pelo EPF



Fonte: A autora, 2019.

Figura D.6 - Lote de juntas coladas com o adesivo Masterpur Estrutural 300® (com a chapa lixada) após ensaio de tração pela Máquina Universal



Fonte: A autora, 2019.

APÊNDICE-E – ABAQUS® – DESENHO E PROPRIEDADES DO ADESIVO NVT 210E®**Módulo *PART***

Foi desenhada a junta de sobreposição simples em 2 dimensões (2D), conforme apresentada na Figura E.1. A junta foi feita como uma peça única composta de dois substratos e um adesivo, ilustrados de cores diferentes.

Figura E.1 - Junta de sobreposição simples

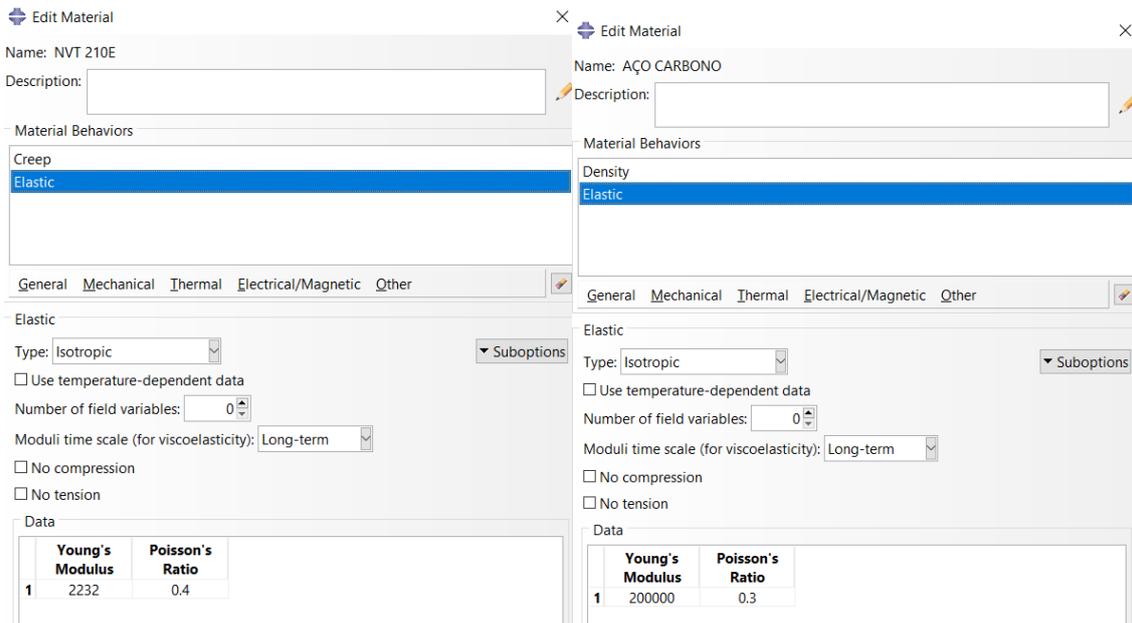


Fonte: A autora, 2019.

Módulo *PROPERTY*

Neste módulo foram definidas as propriedades mecânicas do substrato e do adesivo, por meio de duas seções criadas, uma para o adesivo (NVT 210E®) e uma para o aderente (aço carbono). A Figura E.2 apresenta algumas propriedades do adesivo e do aderente.

Figura E.2 - Definição das propriedades do material (adesivo e aderente)



Fonte: A autora, 2019.

Os parâmetros de fluência do adesivo foram inseridos no Abaqus® (Figura E.3). Como os adesivos de base epóxi são rígidos, não foi considerada a parte plástica do adesivo.

Figura E.3 - Inserção dos parâmetros constitutivos de fluência no Abaqus®

Edit Material ×
 Name: NVT 210E
 Description:
 - Material Behaviors
 Creep
 Elastic
 General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other
 - Creep
 Law: Time-Hardening ▼ Suboptions
 Use temperature-dependent data
 Number of field variables:
 Data

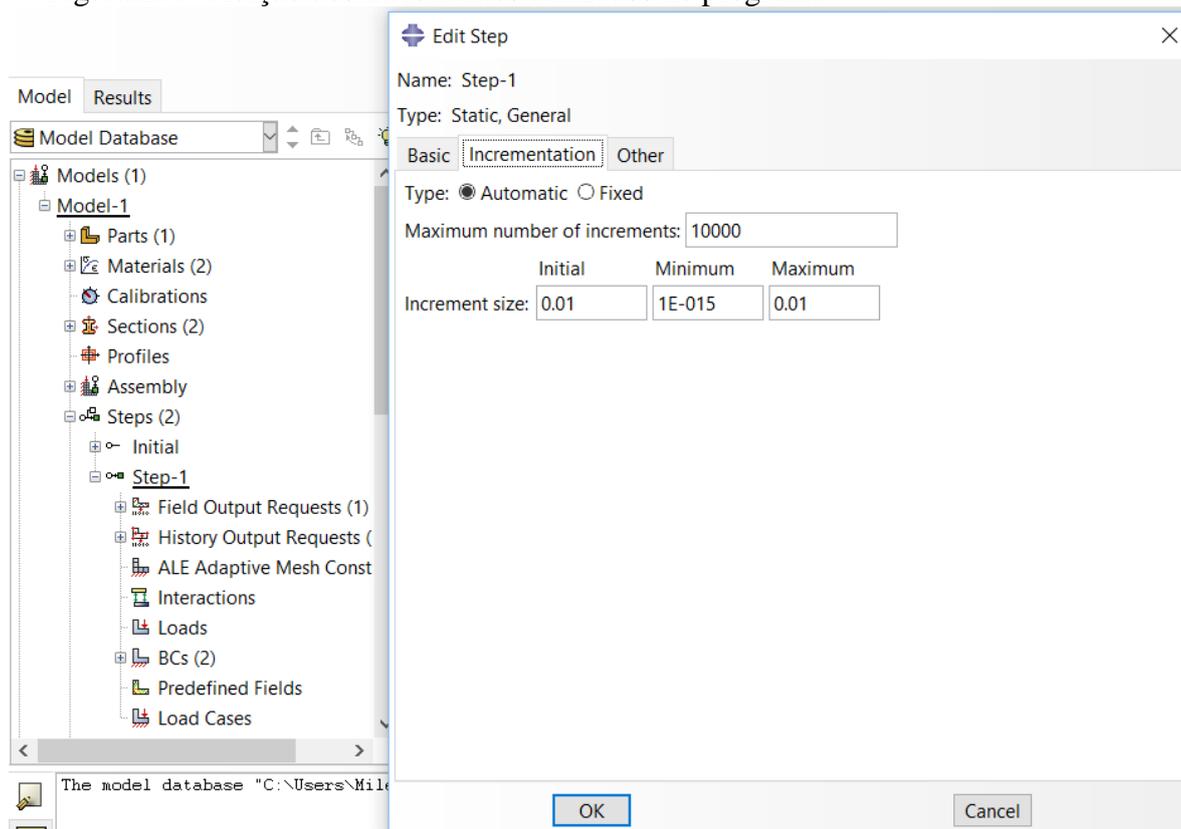
	Power Law Multiplier	Eq Stress Order	Time Order
1	2.232E-006	2.776	-0.647

Fonte: A autora, 2019.

Módulo *STEP*

O número máximo e o tamanho de incrementos foram adicionados ao programa, conforme ilustrado na Figura E.4.

Figura E.4 - Adição dos incrementos utilizados no programa



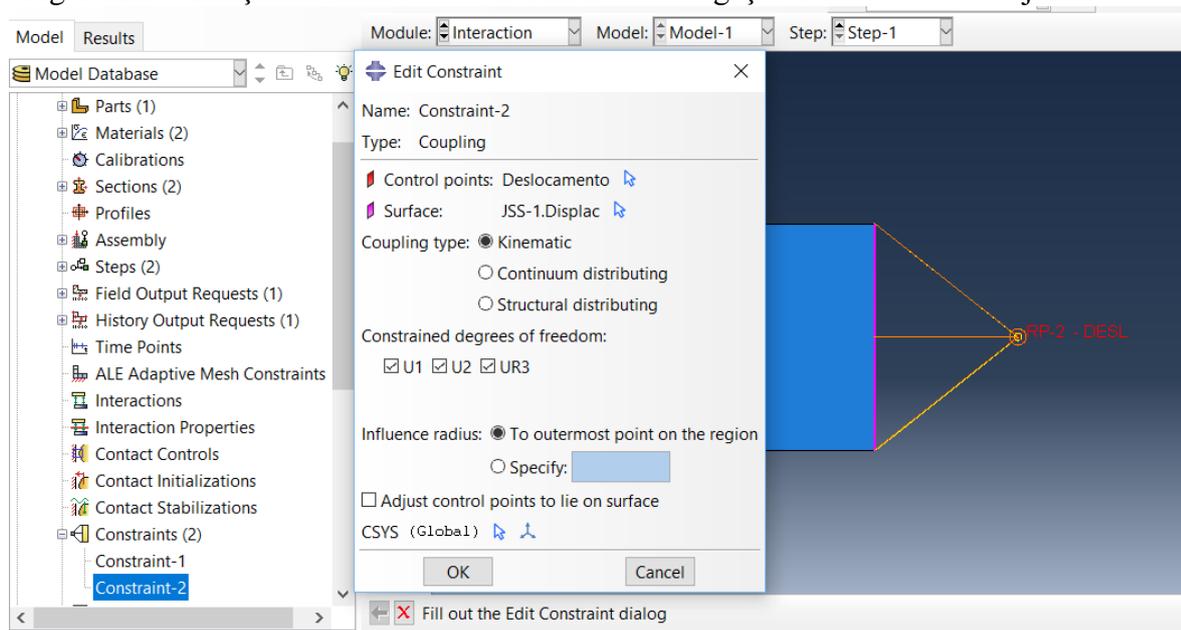
Fonte: A autora, 2019.

Módulo *INTERACTION*

Foram criadas duas “*constraints*” (restrições), uma em cada extremidade da junta. Esta ferramenta auxilia na obtenção da força de ruptura.

Para criar as “*coconstraints*” foi necessário desenhar um ponto externo a estrutura e interligá-lo a alguma parte da peça ao criar a restrição (“*constraints*”) tipo acoplamento. A Figura E.5 apresenta a criação de uma das “*constraints*” e sua ligação à extremidade da junta.

Figura E.5 - Criação de uma das “constraints” e sua ligação à extremidade da junta.

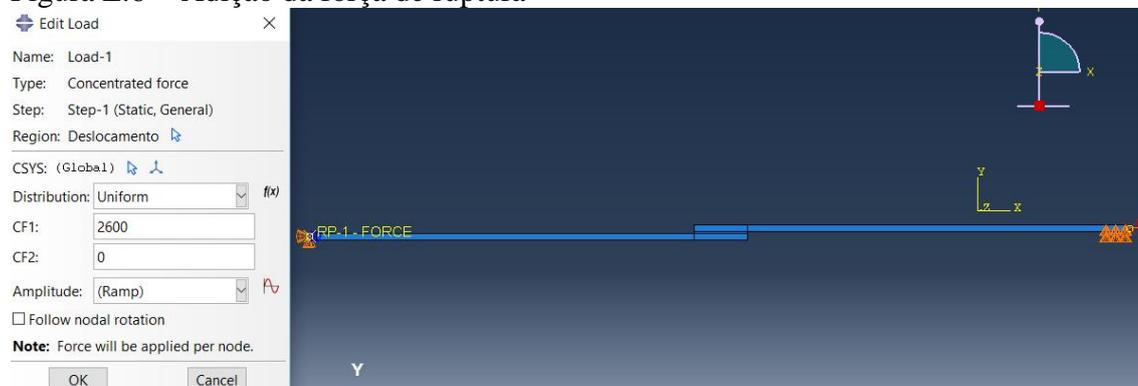


Fonte: A autora, 2019.

Módulo *LOAD*

Este módulo representa as condições de contorno das juntas de cisalhamento simples. Foi considerada uma carga constante, a chamada “*concentred force*”. A Figura E.6 apresenta como foi realizada a adição da força de ruptura, essa força representa 45,6% da τ_u , que foi o valor que ultrapassou as 1000 horas de ensaio.

Figura E.6 - Adição da força de ruptura

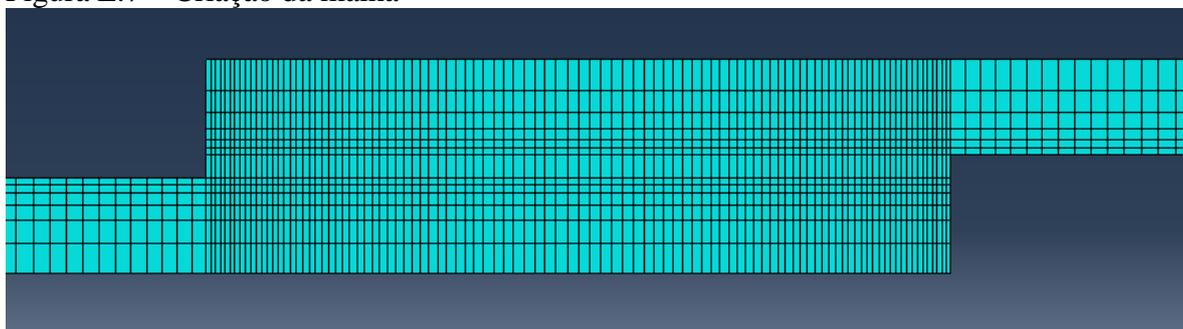


Fonte: A autora, 2019.

Módulo *MESH*

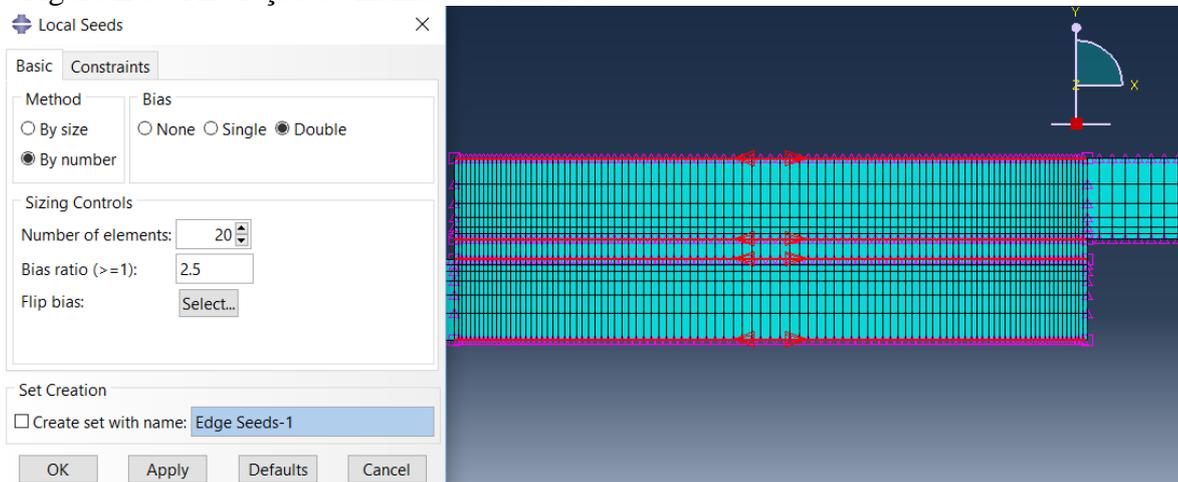
Foi criada uma malha de elementos e após, foi realizado um refinamento nos locais com maiores concentrações de tensões (no caso de uma junta de cisalhamento simples, nas extremidades). Foi utilizado a ferramenta *bias-ratio* para o refinamento da malha. A Figura E.7 ilustra a criação da malha no Abaqus® e a Figura E.8 mostra a alteração da malha de elementos.

Figura E.7 – Criação da malha



Fonte: A autora, 2019.

Figura E.8 - Alteração da malha de elementos

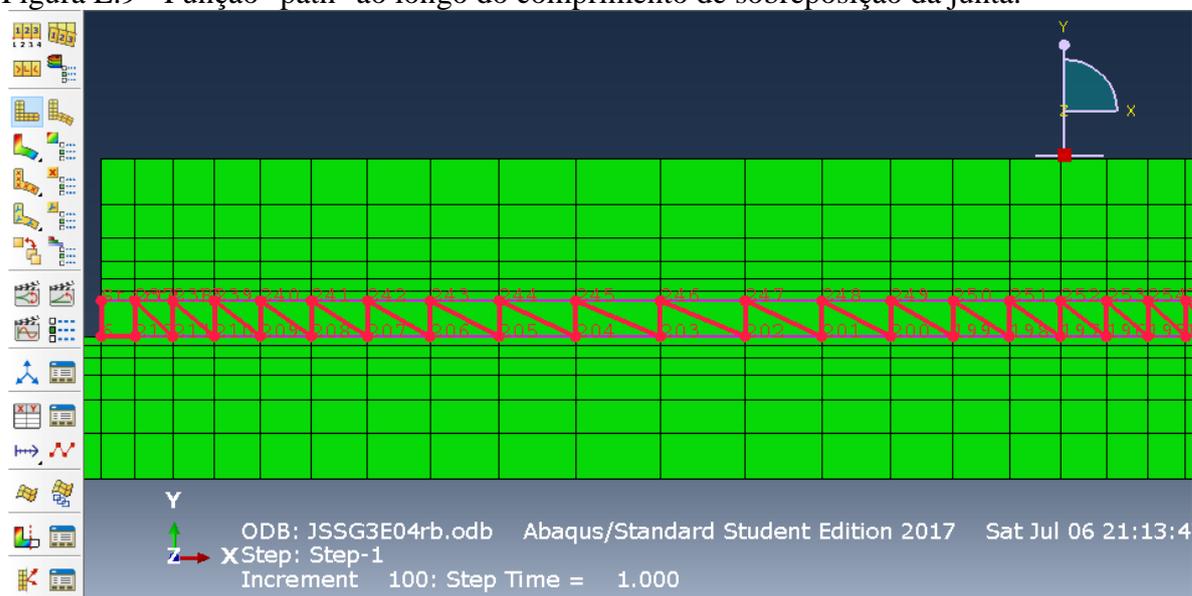


Fonte: A autora, 2019.

RESULTS

É de vital importância a obtenção de gráficos para realizar comparações entre os dados encontrados na simulação e nos ensaios. Para realizar uma comparação dos dados gerados pelo Abaqus® com a literatura, foi necessário analisar a variação de tensão ao longo do comprimento de sobreposição da junta. Para isto, dentro da janela “results”, cria-se um “path” do tipo “Edge list” e seleciona “Add after”. Após, escolhe-se “individually” e marca-se todas as arestas que se deseja analisar, de forma sucessiva. A Figura E.9 ilustra a criação do “path”.

Figura E.9 - Função "path" ao longo do comprimento de sobreposição da junta.

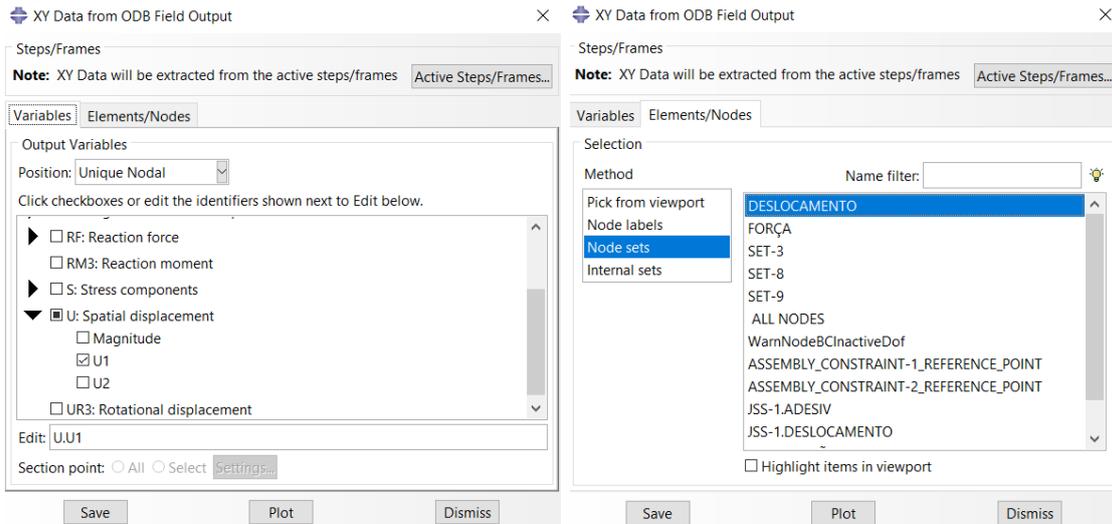


Fonte: A autora, 2019.

Para plotar o gráfico, usa-se o comando “XY Data”, seleciona “path”. Desta forma, os dados são extraídos do software.

Para simular o deslocamento x tempo ao longo do comprimento do adesivo (na direção longitudinal), escolhe-se o *XYData* e seleciona-se o tipo “*ODB field output*”. Após aberta a janela, seleciona-se os dados de deslocamento x tempo conforme indicado na Figura E.10.

Figura E.10 - Parâmetros utilizados para geração do gráfico deslocamento x tempo.



Fonte: A autora, 2019.

Para este trabalho, é necessário a análise deslocamento x tempo, pois a força foi considerada constante, porém outras podem ser realizadas pelo Abaqus®, como força x deslocamento e força x tempo.