



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto Politécnico

Rodrigo Albani Queiroz

Estudo do comportamento em fluência de juntas metálicas coladas

Nova Friburgo

2013

Rodrigo Albani Queiroz

Estudo 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.

Orientadores: Prof. Eduardo Martins Sampaio

Prof. Antonio Henrique Monteiro da Fonseca Thomé da Silva

Nova Friburgo

2013

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

Q3 Queiroz, Rodrigo Albani.
Estudo do comportamento em fluência de juntas metálicas coladas / Rodrigo Albani Queiroz.- 2013.
130 f.: il.

Orientadores: Eduardo Martins Sampaio e Antonio Henrique Monteiro da Fonseca Thomé da Silva.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Biotecnologia – Simulação (Computadores) – Teses. I. Sampaio, Eduardo Martins. II. Silva, Antonio Henrique Monteiro da Fonseca Thomé da. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. IV. Título.

CDU 579.66:519.6

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

Assinatura

Data

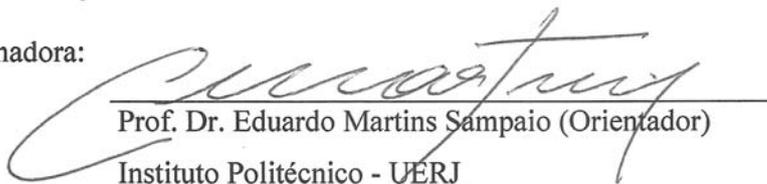
Rodrigo Albani Queiroz

Estudo do Comportamento em Fluência de Juntas Metálicas Coladas

Dissertação apresentada como requisito parcial 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: Física e Mecânica dos Materiais, Linha de Pesquisa: Propriedades Ópticas, Térmicas e Mecânicas.

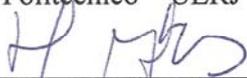
Aprovada em 28 de junho de 2013.

Banca examinadora:


Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio (Orientador)
Instituto Politécnico - UERJ


Prof. Dr. Antonio Henrique M. da Fonseca T. da Silva (Orientador)
CENPES


Prof. Dr. Norberto Cella
Instituto Politécnico – UERJ


Prof. Dr. Heraldo Silva da Costa Mattos
Universidade Federal Fluminense

Nova Friburgo

2013

DEDICATÓRIA

À minha família.....

Deem graças a Deus, o Senhor, porque ele é bom, e porque o seu amor dura para sempre.

Salmos 107:1

RESUMO

QUEIROZ, Rodrigo Albani. Estudo do comportamento em fluência de juntas metálicas coladas, 130 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2013.

Juntas coladas têm se mostrado como a principal alternativa de união entre componentes fabricados em materiais distintos ou não, tendo como vantagem principal a ausência de aporte de calor e melhor distribuição de tensões. A literatura mostra que estudos anteriores foram realizados com o objetivo de caracterizar diversas propriedades associadas às juntas, porém, pouco ainda se conhece sobre o comportamento dessas uniões relacionado à fluência. Os ensaios de fluência têm como principal desvantagem a baixa produtividade de resultados visto que, na maioria dos casos, os equipamentos aptos a realizarem este tipo de teste ensaiam apenas um corpo de prova por vez. Neste caso, o tratamento estatístico é baseado em uma pequena quantidade de resultados, reduzindo a confiabilidade na predição do comportamento em fluência. O Laboratório de Adesão e Aderência (LAA/UERJ/IPRJ) desenvolveu o equipamento pneumático de fluência (EPF) capaz de realizar dez ensaios simultâneos com parâmetros distintos. Este trabalho investiga o comportamento de juntas de cisalhamento simples (SLJ) compostas por substratos metálicos colados com adesivo epóxi e poliuretano. As juntas foram fabricadas em conformidade a norma ASTM D 1002, seguindo procedimento de preparo RT-003/08 – TMC/CENPES/PETROBRAS. Os resultados mostram que, para projetos onde esteja prevista utilização das juntas durante longos períodos de tempo sob carregamento, conhecer apenas suas tensões médias de ruptura não é o suficiente para garantir a segurança do empreendimento. É proposto um modelo inicial do comportamento sob fluência de juntas coladas.

Palavras-chave: Fluência. Juntas coladas. Epóxi. Poliuretano. Ensaio mecânico. Equipamento de fluência.

ABSTRACT

QUEIROZ, Rodrigo Albani. Study on Creep Behavior of Bonded Metal Joints, 130 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2013.

Bonded joints have been used as the main alternative to join components made of different materials, especially because high temperatures, like in welding process, are not required and because tensions are better distributed. Literature shows that although prior studies focused on the evolution of several mechanical properties related to joints, little is known about the creep behavior of bonded joints. Creep testing's main disadvantage is the low productivity of results, since that, in most cases, testing machines capable of performing these tests only test one joint at a time. In this case, statistical treatment is made based on a small amount of results, reducing the reliability of the predictions. Thus, the Laboratory of Adhesion and Adherence (LAA/UERJ/IPRJ) developed a pneumatic creep equipment (PCE), capable of testing ten specimens simultaneously, under distinct scenario. This work looks into the behavior of single-lap joints (SLJ) made of metallic substrate and bonded with epoxy and polyurethane adhesives. The joints were produced according to ASTM D 1002 standard, following the RT-003/08 – TMC/CENPES/PETROBRAS repair procedure. Results show that, for long term applications, knowing the average tensile strength of the joints isn't enough to guarantee project safety. An initial model for the creep behavior of bonded joints is proposed.

Keywords: Creep. Bonded joints. Epoxy adhesive. Polyurethane adhesive.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tanques para armazenamento de combustíveis.....	15
Figura 2 - Chassi com uniões por rebite substituídas por adesivo.....	16
Figura 3 - Junta de cisalhamento simples (single-lap joint – SLJ).....	18
Figura 4 - Modelo da junta em cisalhamento	19
Figura 5 - Modelo da junta em descascamento	19
Figura 6 - Junta de cisalhamento single-lap. Região de fratura da junta;.....	19
Figura 7 - Junta de cisalhamento single-lap. Região de fratura da junta. Foto monocromática. a) região do substrato exposto (mais clara); b) região com adesivo aderido a superfície do substrato (mais escura);.....	20
Figura 8 - Representação esquemática do cisalhamento no adesivo em uma junta SLJ: a) antes do carregamento; b) aderentes “rígidos”; c) aderentes flexíveis;	23
Figura 9 - Representação esquemática da flexão dos aderentes e das tensões de descascamento resultantes nas extremidades do sobre posto: a) junta sobreposta antes da deformação; b) excentricidade da carga; c) momento fletor; d) deformação final da junta.....	24
Figura 10 - Representação esquemática da distribuição das tensões cisalhantes (τ) e de descascamento (σ) na direção axial da junta.	25
Figura 11 - Corpo de prova típico para ensaio de tração em materiais metálicos submetido a ensaio de fluência com temperatura e deformação controladas por termopar e extensômetro.	28
Figura 12 - Esquema de um equipamento típico de fluência à carga constante.....	29
Figura 13 - Gráfico do comportamento em fluência em metais sob carga e temperatura constantes;.....	29
Figura 14 - Curva típica deformação-tempo de um ensaio de fluência/recuperação sob tensão constante para materiais plásticos.	31
Figura 15 - Reações da deformação ao degrau de carregamento constante	32
Figura 16 - Influência da temperatura e da tensão sob o comportamento em fluência em função do tempo de vida até a ruptura.	33
Figura 17 - Tensão (log) versus tempo de vida até a ruptura (log) para uma liga de níquel- carbono com baixo teor de C em três temperaturas	33
Figura 18 - Tensão (log) versus taxa de fluência em regime estacionário (log) para uma liga de níquel-carbono com baixo teor de C em três temperaturas.	34
Figura 19 - Exemplo de representação gráfica da (4 plotada em escala cartesiana.....	36
Figura 20 - Exemplo de representação gráfica da (4 plotada em escala logarítmica	36
Figura 21 - Gráfico do logaritmo da tensão em função do parâmetro de Larson-Miller para um ferro S-590.....	39
Figura 22 - Aparato experimental para ensaio de fluência.....	40

Figura 23 - Formato e dimensões do corpo de prova para ensaio em fluência	41
Figura 24 - Máquina de ensaio universal.	42
Figura 25 - Equipamento Pneumático de Fluência (EPF) desenvolvido no LAA/IPRJ/UERJ.	44
Figura 26 - Unidade de ensaio (UE). a) cilindro pneumático; b) regulador de pressão; c) contador de horas; d) ajuste de altura;.....	46
Figura 27 - a) válvula reguladora de pressão; b) válvula interruptora de pressão;.....	47
Figura 28 - Garra para fixação dos corpos de prova.....	48
Figura 29 - Montagem da garra. Detalhe do entrelaçamento do serrilhado na garra para melhor travamento do corpo de prova.....	48
Figura 30 - Adesivo Multi-Metall, resina a base de epóxi e endurecedor yellow.....	54
Figura 31 - Exemplo de aplicação do adesivo FUSOR 2001/2002 HV, reparo de pára- choques automotivos.....	55
Figura 32 - Forma e dimensões da junta de cisalhamento <i>single-lap</i> ASTM D 1002.....	57
Figura 33 - Dimensões do substrato	58
Figura 34 - Substratos fixados em gabaritos para jateamento abrasivo.	59
Figura 35 - Rugosímetro tridimensional TalyScan 150 – Taylor Hobson	60
Figura 36 - Imagem tridimensional, resultado da análise superficial mostrando o perfil de rugosidade encontrado na área analisada.....	61
Figura 37 - Resultado bidimensional da análise de rugosidade de uma das amostras.	61
Figura 38 - Imersão dos substratos em solução ácida nítrico-fosfórica.	62
Figura 39 - Controle do ph da água deionizada para lavagem das chapas.	62
Figura 40 - Base do gabarito para colagem das juntas de cisalhamento	64
Figura 41 - Chapas para controle de espessura.....	64
Figura 42 - Posicionamento da chapa de controle de espessura;.....	65
Figura 43 - Aplicação de adesivo ao substrato;.....	65
Figura 44 - Posicionamento do primeiro substrato.....	65
Figura 45 - Posicionamento do segundo substrato	65
Figura 46 - Remoção do adesivo residual	66
Figura 47 - Posicionamento da segunda chapa de controle de adesivo.....	66
Figura 48 - Base principal montada com dez juntas;.....	66
Figura 49 - Posicionamento das barras de apoio do contrapeso.....	66
Figura 50 - Posicionamento das barras contrapeso;	67
Figura 51 - Corpos de prova colocados na estufa;.....	67
Figura 52 - Código de rastreabilidade dos corpos de prova;	68
Figura 53 - Alinhamento das juntas nas garras de fixação	69
Figura 54 - Corpo de prova fixado às garras	69

Figura 55 - Montagem do corpo de prova na unidade de ensaio.....	70
Figura 56 - Equipamento preparado para o ensaio de dez juntas de cisalhamento.	70
Figura 57 - Curvas de calibração do EPF. Pressão registrada por unidade de ensaio.....	71
Figura 58 - Tensão média de ruptura das juntas versus velocidade do ensaio.	74
Figura 59 - Termômetro digital. Registra níveis máximos e mínimos de temperatura e umidade relativa.	76
Figura 60 - Comparação entre a dispersão dos resultados para tensão de ruptura entre os grupos G5 e G6.	79
Figura 61 - Gráfico de resultados para tensão de ruptura média, τ_u , de cada adesivo.	81
Figura 62 - Tensão versus tempo médio de vida das juntas de cisalhamento coladas com adesivo Multi-Metall.....	83
Figura 63 - Gráfico da tensão (logaritmo) versus tempo médio de vida (logaritmo) dos dados obtidos experimentalmente para o adesivo Multi-Metall.....	87
Figura 64 - Gráfico da tensão (logaritmo) versus tempo médio de vida (logaritmo) mostrando os pontos obtidos experimentalmente e a curva modelo em escala logarítmica.	88
Figura 65 - Gráfico da tensão versus tempo médio de vida mostrando os pontos obtidos experimentalmente e a curva modelo em escala cartesiana para o adesivo Multi-Metall.	89
Figura 66 - Tensão versus tempo médio de vida das juntas de cisalhamento coladas com adesivo FUSOR.....	91
Figura 67 - Gráfico da tensão (logaritmo) versus tempo médio de vida (logaritmo) dos dados obtidos experimentalmente para o adesivo Fusor.	93
Figura 68 - Gráfico da tensão (logaritmo) versus tempo médio de vida (logaritmo) mostrando os pontos obtidos experimentalmente para o adesivo Fusor e a curva modelo.....	94
Figura 69 - Gráfico da tensão versus tempo médio de vida das juntas coladas com adesivo Fusor.....	95
Figura 70 - Região de fratura do corpo de prova fabricado com adesivo Multi-Metall.....	98
Figura 71 - Região de fratura do corpo de prova fabricado com adesivo Fusor.	99
Figura 72 - Gráfico tensão versus deformação das juntas de cisalhamento coladas com adesivo Multi-Metall.....	102
Figura 73 - Gráfico tensão versus deformação das juntas de cisalhamento coladas com adesivo Fusor	104
Figura 74 - Corpo de prova para ensaio de tração.....	105
Figura 75 - Corpo de prova em ensaio de tração.....	106
Figura 76 - Extensômetro Shimadzu SG25-100.....	106
Figura 77 - Gráfico tensão versus deformação dos corpos de prova produzidos com adesivo Multi-Metall.	106
Figura 78 - Gráfico tensão versus deformação dos corpos de prova produzidos com adesivo Fusor.....	107

Figura 79 - Gráfico, Percentual de carregamento em relação a τ_u versus o tempo de vida até a ruptura das juntas para o adesivo Multi-Metall.....	109
Figura 80 - Gráfico, Percentual de carregamento em relação a τ_u versus o tempo de vida até a ruptura das juntas para o adesivo Fusor.	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do adesivo Multi-Metall linha SS	55
Tabela 2 - Características do adesivo FUSOR 2001/2002 – HV	56
Tabela 3 - Condições climáticas durante a etapa de colagem das juntas	63
Tabela 4 - Condições finais das juntas após a colagem;.....	67
Tabela 5 - Calibração do Equipamento Pneumático de Fluência.....	71
Tabela 6 - Grupo G1. Adesivo Multi-Metall - Resultados para tensões de ruptura das juntas de cisalhamento ensaiadas a velocidade de 71,0kPa/s.....	73
Tabela 7 - Grupo G2. Adesivo Multi-Metall - Resultados para tensões de ruptura das juntas de cisalhamento ensaiadas a velocidade de 23,6kPa/s	74
Tabela 8 - Grupo G3 - Resultados para tensão média de ruptura das juntas, grupo G3.....	75
Tabela 9 - Grupo G4 - Grupo amostral para tensão de ruptura média do adesivo Multi-Metall	77
Tabela 10 - Grupo G5 - Resultados do ensaio de tração do primeiro lote do adesivo Fusor ..	78
Tabela 11 - Grupo G6 - Resultados do ensaio de tração do segundo lote do adesivo Fusor...	79
Tabela 12 - Subdivisão do grupo G6 em dois grupos com cinco resultados	80
Tabela 13 - Resultado dos ensaios de fluência para o adesivo Multi-Metall	82
Tabela 14 - Monitoramento realizado em visita anterior ao incidente, 17/07/2012.....	84
Tabela 15 - Monitoramento realizado em visita posterior ao incidente, 23/07/2012.....	85
Tabela 16 - Resultados para monitoramento da tensão média de ruptura das juntas, τ_u	86
Tabela 17 - Resultado dos ensaios de fluência para o adesivo FUSOR.....	90
Tabela 18 - Resultado dos ensaios realizados na máquina de ensaio universal para obtenção da tensão média de ruptura das juntas, τ_u , coladas com adesivo Multi-Metall. .	101
Tabela 19 - Resultado dos ensaios realizados na máquina de ensaio universal para obtenção da tensão média de ruptura das juntas, τ_u , coladas com adesivo Fusor.....	103
Tabela 20 - Dimensões do corpo de prova	105
Tabela 21 - Resultados percentuais dos ensaios de fluência para o adesivo Multi-Metall ...	109
Tabela 22 - Resultados percentuais dos ensaios de fluência para o adesivo Fusor.....	110

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	15
1	OBJETIVO	17
2	JUNTAS DE CISALHAMENTO SIMPLES (SINGLE-LAP JOINT – SLJ)	18
2.1	Aspectos teóricos do comportamento da junta	18
2.2	Caracterização de falha das juntas	19
2.2.1	<u>Mecanismos de adesão</u>	21
2.2.2	<u>Análise das tensões na junta</u>	22
3	FLUÊNCIA	27
3.1	Ensaio de fluência em materiais metálicos	27
3.2	Comportamento viscoelástico	31
3.3	Efeitos da tensão e da temperatura em materiais metálicos	32
3.4	Métodos de extrapolação de dados	35
3.4.1	<u>Propriedade logarítmica</u>	35
3.4.2	<u>Técnica de Regressão Linear</u>	36
3.4.3	<u>Parâmetro de Larson-Miller</u>	38
3.5	Ensaio de fluência segundo a norma ASTM D 2294 – Descrição e Análise Crítica	40
3.6	Fluência – Considerações importantes	42
4	O EQUIPAMENTO PNEUMÁTICO DE FLUÊNCIA (EPF)	44
4.1	Descrição do equipamento	45
4.2	Funcionamento do equipamento	48
4.2.1	<u>Relação Tensão de Cisalhamento por Pressão</u>	48
4.2.2	<u>Taxa de carregamento</u>	50
4.3	Planejamento Experimental	51
5	METODOLOGIA	53
5.1	Adesivos selecionados	53
5.1.1	<u>Características do adesivo Multi-Metall</u>	53
5.1.2	<u>Características do adesivo Fusor</u>	55
5.2	Metodologia para cálculo da tensão cisalhante máxima admitida nas juntas	56

5.3	Metodologia para usinagem dos substratos.....	58
5.4	Metodologia para tratamento superficial – jateamento e rugosidade.....	59
5.5	Metodologia para ataque químico.....	61
5.6	Procedimento de colagem.....	62
5.6.1	<u>Etapas da colagem.....</u>	63
5.6.2	<u>Código de rastreabilidade das juntas.....</u>	67
5.7	Metodologia de montagem das juntas de cisalhamento no EPF.....	68
5.8	Metodologia para calibração do equipamento pneumático de fluência (EPF).....	70
5.9	Metodologia para determinação das tensões médias de ruptura das juntas.....	72
5.10	Metodologia para determinação da velocidade de ensaio no EPF.....	72
5.11	Metodologia para ensaios de fluência no EPF.....	75
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
6.1	Tensões de ruptura das juntas, τ_u	77
6.1.1	<u>Tensão média de ruptura das juntas coladas com adesivo Multi-Metall.....</u>	77
6.1.2	<u>Tensão média de ruptura das juntas coladas com adesivo Fusor.....</u>	77
6.1.3	<u>Comparação entre as tensões de rupturas das juntas para cada tipo de adesivo.....</u>	80
6.2	Ensaio de Fluência.....	81
6.2.1	<u>Ensaio de fluência das juntas coladas com adesivo Multi-Metall.....</u>	82
6.2.1.1	Comentários: Problemas e Soluções – Multi-Metall.....	84
6.2.1.2	Multi-Metall - Dados experimentais em escala logarítmica.....	86
6.2.2	<u>Ensaio de fluência das juntas coladas com adesivo Fusor.....</u>	90
6.2.2.1	Comentários – Problemas e Soluções – Fusor.....	91
6.2.2.2	FUSOR – Dados experimentais em escala logarítmica.....	92
6.2.2.3	Hipótese sobre a associação dos tempos de vida em relação aos lotes de juntas coladas com adesivo Fusor.....	96
6.3	Qualificação da fratura das juntas.....	97
6.3.1	<u>Adesivo Multi-Metall.....</u>	98
6.3.2	<u>Adesivo Fusor.....</u>	98
6.4	Testes realizados na máquina de ensaio universal (shimadzu).....	99
6.4.1	<u>Tensões médias de ruptura das juntas.....</u>	99

6.4.1.1	Adesivo Multi-Metall.....	100
6.4.1.2	Adesivo Fusor.....	102
6.4.2	<u>Módulo de elasticidade do adesivo</u>	104
6.4.2.1	Adesivo Multi-Metall.....	106
6.4.2.2	Adesivo Fusor.....	107
6.5	Relação entre o comportamento em fluência e a tensão média de rupturas das juntas	108
6.5.1	<u>Adesivo Multi-Metall</u>	108
6.5.2	<u>Adesivo Fusor</u>	110
	CONCLUSÃO	112
	REFERÊNCIAS	115
	APÊNDICE-A – rugosidade e colagem.....	118
	APÊNDICE-B – monitoramento da temperatura e umidade.....	120
	APÊNDICE-C – ensaios de cisalhamento com o adesivo multi-metall.....	121
	APÊNDICE-D – ensaios de cisalhamento com o adesivo fusor.....	125

INTRODUÇÃO

A utilização de juntas coladas com adesivos estruturais vem ganhando ao longo do tempo considerável importância na área industrial, principalmente por ser uma alternativa de união entre componentes distintos que não podem ser submetidos a processos com variação de temperatura. É uma técnica já bastante difundida na indústria aeroespacial e seu peso reduzido aliado à relativa resistência mecânica são fatores de destaque, e despertam o interesse da indústria em geral. Possui grande aplicabilidade em projetos onde a relação resistência/peso é um fator decisivo.

A título de exemplo, pode ser citada a construção de tanques para armazenamento de combustíveis (Figura 1). Painéis formados por vigas e chapas finas precisam ser unidos de maneira que a estrutura final seja capaz de suportar a pressão do fluido sem que haja vazamentos. Neste caso, os processos de soldagem aliados ao de colagem a frio apresentam-se como boas alternativas para alcançar as expectativas de projeto.

Figura 1 - Tanques para armazenamento de combustíveis.



Fonte: PETROBRAS, [2013].

Por cumprir a função de formar a parede do tanque, as chapas são distribuídas de maneira que uma grande área fique em contato com as vigas estruturais, compondo um cenário propício à utilização de colagem adesiva para fixação das chapas na estrutura previamente soldada. A união das chapas à estrutura por meio de processos convencionais de soldagem poderia comprometer o projeto, promovendo o seu colapso.

Outro exemplo que pode ser citado é o segmento automotivo (Figura 2). A junção mecânica entre peças por rebites e soldas favorece o aparecimento de concentradores de

tensão. Isso ocorre porque, quando um dos componentes é carregado, toda a tensão gerada é transmitida ao restante da estrutura através de pontos de união, criando espécies de “gargalos” ao longo da estrutura, onde as tensões máximas podem ser muito maiores do que as tensões médias e, geralmente, são locais de início da fratura. Também é comum nestas condições a ocorrência de falhas catastróficas causadas por fadiga.

Figura 2 - Chassi com uniões por rebite substituídas por adesivo



Fonte: DOWN AUTOMOTIVE, [1995].

Os adesivos estruturais podem melhorar a durabilidade e, ao mesmo tempo, proporcionar economia de custos, substituindo as soldas e rebites, contribuindo para redução de fadiga e falhas geralmente encontradas ao redor desses pontos de união.

Na corrida em busca de maior eficiência dos veículos, muitos de seus componentes metálicos acabam por serem substituídos por peças poliméricas, como é o caso de para-choques, para-lamas, painéis e outros componentes. A substituição dessas peças, além de contribuir para melhoria no design, reduz significativamente o peso do veículo. Contudo nem todos os seus constituintes podem ser fabricados em um mesmo material, o que demanda alternativas que promovam a união de materiais distintos. Adesivos estruturais podem servir como uma solução para a fixação destes componentes.

1 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho foi investigar o comportamento em fluência de juntas metálicas coladas com intuito de obterem-se propriedades mecânicas que possibilitem seu uso em projetos de engenharia de longo prazo.

Para viabilizar o estudo em um curto período de tempo com quantidades satisfatórias de dados experimentais, foi desenvolvido e construído o Equipamento Pneumático de Fluência (EPF).

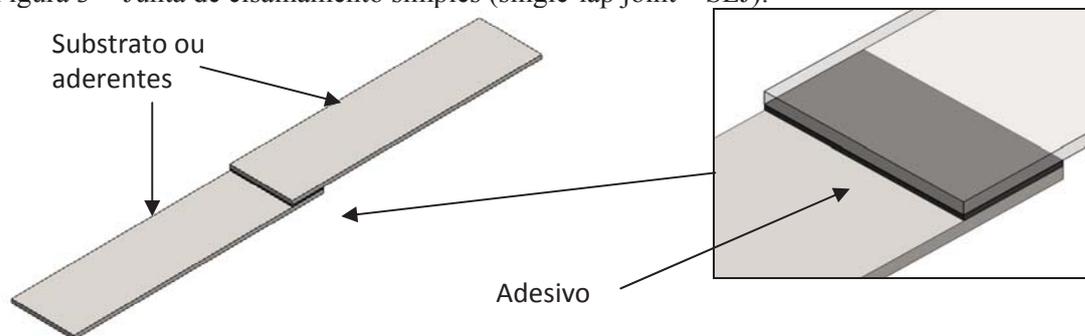
Todos os ensaios foram realizados em temperatura ambiente, em torno de 20°C.

As curvas de representação do comportamento em fluência para os dois adesivos utilizados no estudo foram obtidas através da técnica de regressão linear aplicada aos dados experimentais.

2 JUNTAS DE CISALHAMENTO SIMPLES (SINGLE-LAP JOINT – SLJ)

As juntas de cisalhamento simples (single-lap joint – SLJ), Figura 3, são de fácil construção e apresentam boa compatibilidade com diversas uniões comumente utilizadas. Contudo, deve ser levado em conta que a substituição direta do processo de fixação mecânica pelo processo de união por adesivos deve considerar parâmetros como tamanho e forma da região a ser colada, de forma a se dimensionar adequadamente a junta de acordo com as solicitações mecânicas.

Figura 3 - Junta de cisalhamento simples (single-lap joint – SLJ).



Fonte: O Autor, 2013.

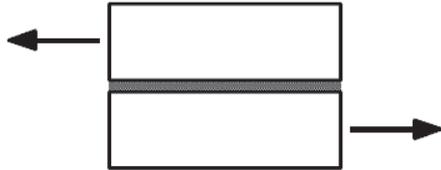
Como toda solução, também esta, não apresenta apenas vantagens. Fatores ambientais como umidade e alta temperatura durante o processo de colagem comprometem a resistência mecânica das juntas. Há necessidade de prévio tratamento da superfície na região de colagem. As juntas coladas não permitem fácil separação dos componentes, uma vez unidos. (BERRY, 2000).

2.1 Aspectos teóricos do comportamento da junta

As juntas de cisalhamento simples (SLJ) são caracterizadas por possuírem geometria que favorece o carregamento excêntrico. Ao carregá-las, duas tensões principais são originadas: Tensão de Cisalhamento no plano (*in-plane shear stress*) ou apenas chamada de **tensão de cisalhamento** (Figura 4) e a Tensão Normal que, devido à geometria da junta,

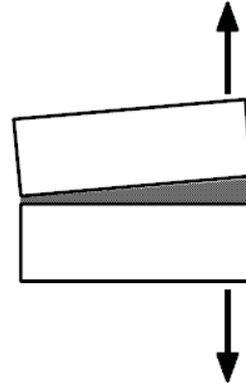
favorece o descascamento e, por isso, é normalmente chamada de **tensão de descascamento (peel stress)** (Figura 5).

Figura 4 - Modelo da junta em cisalhamento



Fonte: PEREIRA, 2002.

Figura 5 - Modelo da junta em descascamento



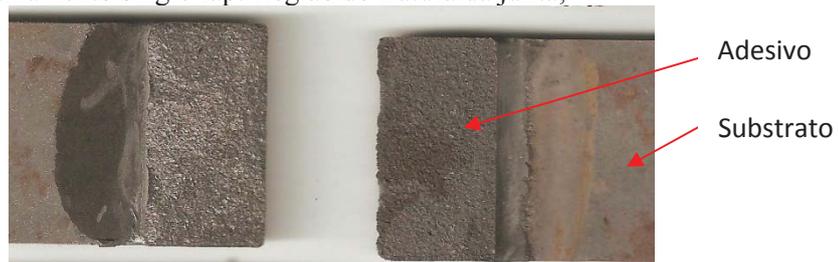
Fonte: PEREIRA, 2002.

As tensões de descascamento são mais prejudiciais à resistência e por isso, sempre que possível, devem ser evitadas (SILVA, 2007).

2.2 Caracterização de falha das juntas

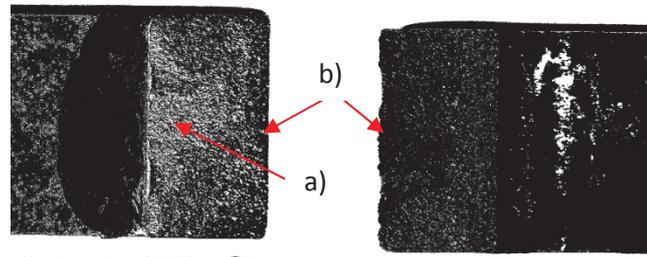
As juntas, ao falharem, podem ser caracterizadas por apresentarem fratura do tipo adesiva e/ou coesiva. Analisando-se as superfícies do par de substratos mostrados na Figura 6 e Figura 7, separados pela fratura da junta, é possível observar regiões onde a fratura deixou exposta a superfície do substrato e outras regiões onde o adesivo cobre a superfície do substrato.

Figura 6 - Junta de cisalhamento single-lap. Região de fratura da junta;



Fonte: O Autor, 2013.

Figura 7 - Junta de cisalhamento single-lap. Região de fratura da junta. Foto monocromática. a) região do substrato exposto (mais clara); b) região com adesivo aderido a superfície do substrato (mais escura);



Fonte: O Autor, 2013.

A área exposta do substrato, Figura 7.a, corresponde à região a qual a junta falhou por fratura adesiva, ou seja, a linha de separação da junta coincide com a interface adesivo/substrato, deixando o substrato exposto. Quando isso ocorre, provavelmente a ancoragem entre adesivo e substrato não apresenta condições ideais.

A área do substrato coberta por adesivo, Figura 7.b, corresponde à região onde a junta falhou por fratura coesiva, ou seja, a linha de separação da junta é na camada adesiva. É possível observar que ambos os substratos apresentam adesivos aderidos às suas superfícies na mesma região da junta, representados pela cor escura na figura. Neste caso, o fator limitante da resistência da junta está principalmente relacionado à resistência do adesivo.

A quantificação do percentual de falha adesiva ou coesiva é uma tarefa delicada, pois uma região qualificada, num primeiro momento, como tendo fratura adesiva, pode apresentar vestígios de adesivo no fundo de vales do perfil de rugosidade, dependendo da escala microscópica com que a região é analisada. O importante, neste caso, é, sempre que possível, utilizar métodos dispostos a minimizar a fratura adesiva. Desta forma, a resistência mecânica da junta estará relacionada principalmente à resistência do adesivo.

Fraturas adesivas geralmente ocorrem quando a ancoragem do substrato não satisfaz completamente as condições necessárias para que a aderência entre adesivo/substrato apresente maior resistência do que o adesivo.

A superfície da junta correspondente à interface substrato/adesivo é uma região de extrema complexidade. Diversos fatores estão presentes e mensurar a contribuição de cada um para a resistência mecânica da junta é uma tarefa árdua. Definir onde começa e onde termina cada material corresponde a conhecer o comportamento em um ponto de descontinuidade. Cada lado da interface possui propriedades diferentes e são representados por equações próprias.

Uma alternativa que se propõe para contornar tal problema consiste em modelar esse comportamento assumindo que, por estarem unidas, ambas interfaces têm o mesmo deslocamento embora apresentem tensões distintas (SAMPAIO, 1998).

2.2.1 Mecanismos de adesão

As teorias de colagem adesiva podem ser separadas em quatro mecanismos de interação entre adesivo e substrato, são eles: interligação mecânica, as interações de absorção, as forças eletrostáticas e os mecanismos de difusão. Cada mecanismo terá uma parcela de contribuição na união entre adesivo e substrato.

O conceito da interligação mecânica é baseado nas irregularidades da superfície do substrato. O tratamento da superfície de forma a criar um “relevo” que dificulte o deslizamento do adesivo sobre a superfície do substrato é bastante conhecido e intuitivo. O objetivo principal é favorecer a penetração do adesivo no substrato. Por outro lado, alguns trabalhos comprovam que apenas a rugosidade superficial em uma escala macroscópica não promove uma boa aderência em estruturas coladas. (SAMPAIO, 1998)

Mourão (2000) e Limaverde Filho (2006) analisaram o efeito do tratamento superficial na colagem de juntas metálicas sobrepostas utilizando epóxi como adesivo e concluíram que a interligação mecânica na escala de microscópica demonstra ser mais importante no aumento da resistência mecânica da junta do que na escala macroscópica.

A interação de absorção é dependente das forças de origem química, como covalente, iônica, metálica, ligação por ponte de hidrogênio, forças físicas, como van der Waal's e forças de dispersão. Sua contribuição é relativamente pequena visto que seus valores são reduzidos a níveis próximos de zero à distância de ângstrons da superfície (SAMPAIO, 1998).

Sampaio (1998) menciona em seu trabalho que a tensão superficial é a medida direta das forças atrativas intermoleculares (distância entre as moléculas no interior do material). A tensão na camada superficial é o resultado da atração das moléculas da superfície para com as moléculas do interior do material. As moléculas da superfície estão ligadas a um menor número de moléculas e, portanto, possuem uma energia maior do que aquelas que se localizam no interior do material. Essa atração tende a reduzir o número de moléculas na

região superficial e aumentar a distância intermolecular. A tensão superficial é dada em N/m e é, numericamente, igual à taxa de aumento da energia livre superficial com a área, J/m^2 .

Soarea *et al.* (2006) pesquisou várias técnicas de tratamento superficial, dentre elas ataques químicos com ácidos fluorídrico e fosfórico e micro-jateamentos com óxidos de alumínio para posterior aplicação de adesivo e concluiu que o ataque químico associado ao ataque mecânico é a metodologia mais adequada para aumento da rugosidade superficial.

Sampaio *et al.* (2006), em seu estudo sobre aderência de juntas metálicas de cisalhamento, avaliou a resistência mecânica das juntas em função da viscosidade do adesivo e do tratamento superficial do substrato e concluiu que, para adesivo tipo massa, de alta viscosidade, há necessidade da espessura da camada adesiva ser maior do que para o adesivo de menor viscosidade. Em relação ao tratamento superficial, o autor mostrou que o aumento dos parâmetros de rugosidade é acompanhado de um aumento na aderência para o adesivo de alta viscosidade, sendo a ancoragem mecânica o principal fator limitante da resistência das juntas. Já para adesivos de menor viscosidade, a máxima aderência é atingida com níveis bem inferiores de rugosidade.

Tratamentos superficiais como jateamento e ataque químico são extremamente importantes quando se deseja melhorar a eficiência na ligação entre adesivo/substrato sem a necessidade de ampliar ou alterar a geometria da região colada. Sendo assim, uma mesma área passa a ter melhores condições para aplicação de adesivos apenas alterando sua rugosidade. Porém, devem-se respeitar alguns limites, pois alguns autores concluem que um nível de rugosidade excessivo pode interferir negativamente, bloqueando o avanço do adesivo sobre o substrato. Imagina-se que há uma relação ideal entre a molhabilidade de cada adesivo e a rugosidade do substrato.

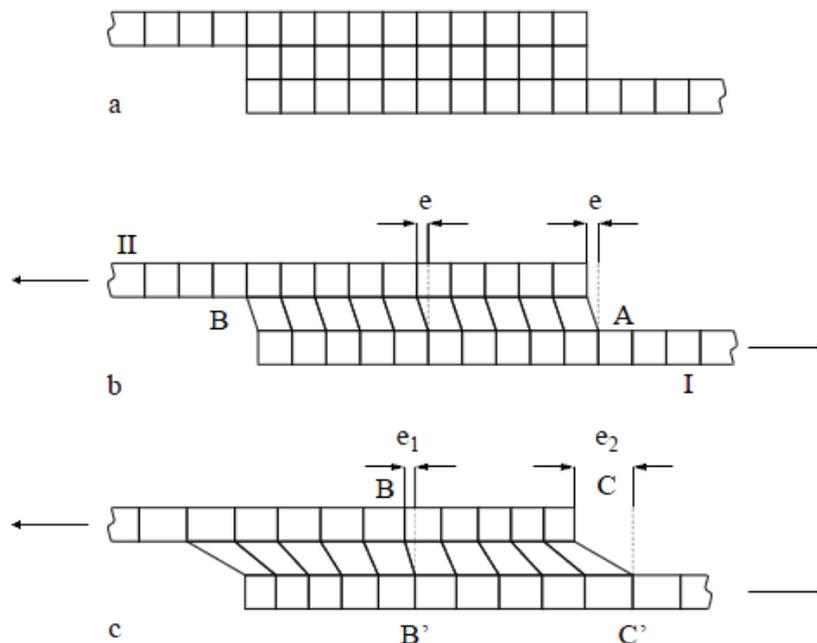
2.2.2 Análise das tensões na junta

As tensões desenvolvidas nas juntas não são completamente uniformes e as tensões de cisalhamento máximas, $\tau_{máx}$, podem ser muito maiores, em regiões específicas, do que a tensão média, τ_m , definida com a razão entre a carga aplicada e a área colada. O fator η correspondente à razão entre a $\tau_{máx}/\tau_m$ é dependente de diversos parâmetros como a geometria da junta, espessura de adesivo, módulos de elasticidade do adesivo e substrato, dentre outros.

Um modelo simples que analisa apenas as tensões cisalhantes principais envolvidas na junta pode ser mais bem compreendido pela comparação entre duas juntas. Uma composta pelo adesivo colado em substratos rígidos e outra composta pelo mesmo adesivo colado em substratos flexíveis, porém que não sofrem deflexão. (BERRY, 2000)

A Figura 8.a é a representação da junta, independente de seus constituintes, antes de ser carregada. A malha de elementos retangulares, sobreposta a ela, acompanha apenas sua deformação, e .

Figura 8 - Representação esquemática do cisalhamento no adesivo em uma junta SLJ: a) antes do carregamento; b) aderentes “rígidos”; c) aderentes flexíveis;



Fonte: BERRY, 2000.

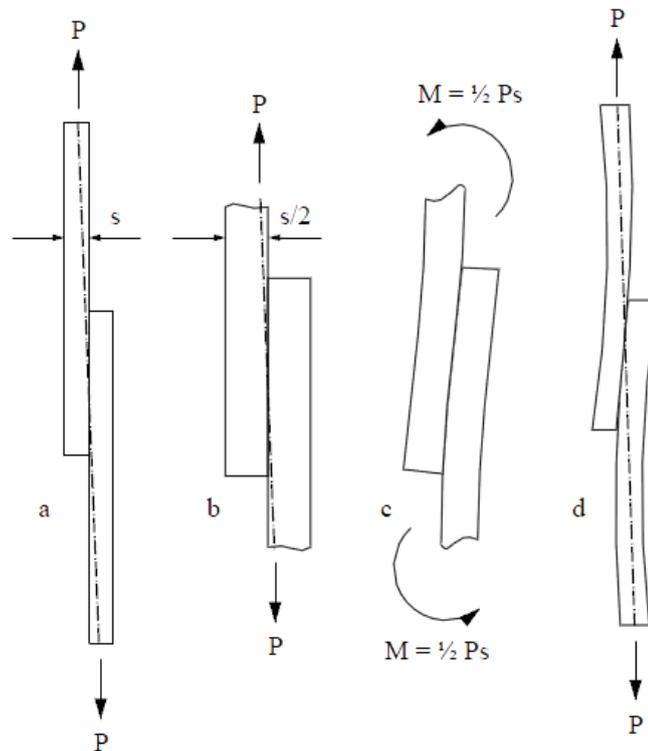
A Figura 8.b, composta por substratos rígidos, mostra que, ao carregar a junta, não há deformação dos substratos, ou seja, a distância entre os elementos de malha do substrato não sofrem variação. Toda carga é transmitida uniformemente ao adesivo que apresenta deformação e constante em todo o seu comprimento, de forma a absorver todo o deslocamento do substrato. Neste exemplo, a junta está submetida a uma tensão de cisalhamento pura e uniformemente distribuída. Seus valores são iguais para qualquer ponto da região colada, ou seja, não há ponto de tensões máximas e mínimas.

A Figura 8.c é composta por substratos deformáveis apenas no sentido axial. Os elementos de malha sofrem variação em sua dimensão quando são carregados. Neste exemplo, é possível observar na interface adesivo/substratos inferior, que as deformações ao

longo do adesivo são maiores no ponto C', diminuem a medida que se aproximam do centro da região colada, ponto B' e que o comportamento é simétrico à interface adesivo/substrato superior. Deformações maiores correspondem a tensões de cisalhamento maiores. Logo, é possível concluir que as tensões de cisalhamento máximas estarão presentes, no sentido axial, na região de borda do adesivo, ponto C'. Cabe lembrar que todo o material sempre apresentará deformações quando submetido a qualquer tipo de carregamento e que, na região elástica do material, seu módulo de elasticidade representa a relação entre a tensão, devido à carga, e a deformação. Quanto maior for essa relação, mais o material se aproxima do modelo indeformável.

Os substratos de uma junta de cisalhamento simples são, necessariamente, deslocados entre si por, pelo menos, a espessura do material. Sendo assim, a linha de carregamento que une os pontos de aplicação de carga atravessa a junta, sempre passando pelo seu ponto médio, podendo ou não estar totalmente contida no interior de seu volume, Figura 9.a. A inclinação da linha de carregamento será dependente do comprimento dos substratos e espessuras do adesivo.

Figura 9 - Representação esquemática da flexão dos aderentes e das tensões de descascamento resultantes nas extremidades do sobre posto: a) junta sobreposta antes da deformação; b) excentricidade da carga; c) momento fletor; d) deformação final da junta.

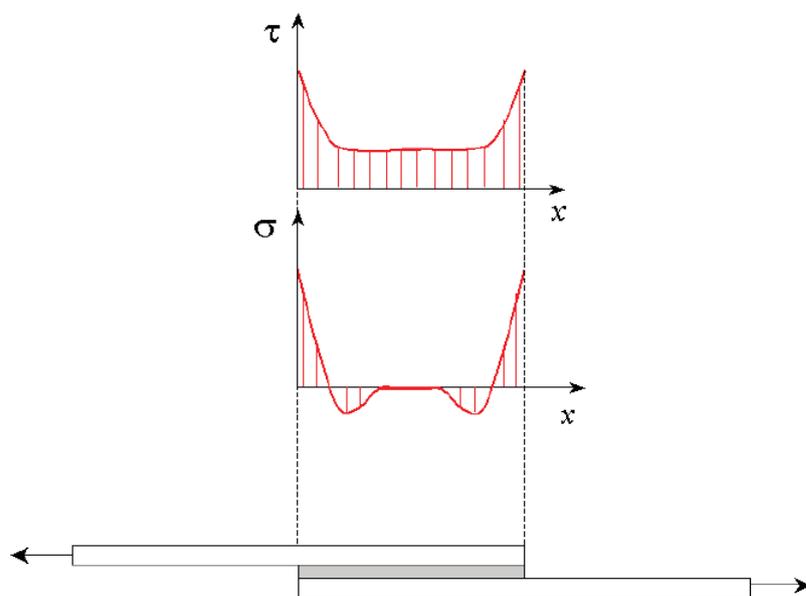


Quanto maior for a espessura dos constituintes substrato e adesivo, e menor os comprimentos do substratos, Figura 9.b, maior será a inclinação da linha de carregamento e, por conseguinte, maior o momento gerado, Figura 9.c. O momento faz com a junta seja deformada como mostrada na Figura 9.c e é responsável por introduzir tensões de descascamento as quais tendem a se concentrarem nas regiões de borda do adesivo, levando a um aumento das tensões máximas e à fratura da junta sob carregamentos menores. (BERRY, 2000)

Estudos realizados a fim de investigar o fator de forma da região adesiva da junta mostram que, para um mesmo tamanho de área colada, variações nas dimensões de largura e comprimento (*overlap*), região colada, podem refletir no aumento ou decréscimo da resistência mecânica da junta (SILVA, 2007).

Devido ao efeito de concentração de tensão nas bordas da região colada, juntas cuja largura é maior que a comprimento do *overlap*, obviamente respeitando-se alguns limites e conservando o valor de área inicial, apresentam maior resistência mecânica quando comparadas a modelos semelhantes onde o comprimento é maior do que a largura. Imagina-se que este efeito ocorra devido a uma largura maior favorecer a distribuição das tensões máximas ao longo da borda do adesivo (PEREIRA, 2004). Técnicas de análises realizadas por métodos de elementos finitos (FEM) modelaram a distribuição de tensões ao longo do comprimento do *overlap*. A Figura 10 exemplifica esta distribuição. (MOURA, 2006; SILVA, 2007).

Figura 10 - Representação esquemática da distribuição das tensões cisalhantes (τ) e de descascamento (σ) na direção axial da junta.



Fonte: SILVA, 2007.

Srinivas, apud Silva (2009), desenvolveu uma técnica de análise que considerava a deformação transversal por cisalhamento e tensões normais transversas onde os deslocamentos eram expandidos em termos polinomiais na direção da espessura. Sua pesquisa mostrou que juntas poderiam se tornar mais flexíveis pelo acréscimo da espessura da camada adesiva ou pelo decréscimo do módulo de elasticidade do adesivo.

Hart-Smith apud Silva (2007), desenvolveu um modelo analítico baseado no modelo anterior de Goland e Reissner com objetivo de obter uma equação que representasse o comportamento complexo da junta sob carregamento. Ele considerou o comportamento elástico dos substratos e o comportamento elástico-plástico do adesivo e mostrou que a relação tensão-deformação no adesivo poderia ser considerada como linear elástica e linear plástica, desde que houvesse conservação da área sob a curva. Este modelo tratava as deformações no substrato inferior e superior de forma independente e considerava as propriedades mecânicas do adesivo, porém, não levava em consideração as grandes deformações na região do *overlap* e não considerava as deflexões de ambos os substratos. Esse modelo era limitado apenas a casos onde o comprimento da região colada era pequeno, espessuras finas de adesivos e adesivos flexíveis.

Yuceoglu e Updike apud Silva (2007) realizaram análises de tensões em juntas de cisalhamento coladas utilizando substratos relativamente rígido e adesivo flexível. Suas pesquisas foram baseadas na variação de espessura do substrato a fim de avaliar sua influência sobre as tensões na junta. Seus resultados mostraram que a redução da espessura aumenta significativamente as tensões na extremidade da junta, ou seja, substratos mais rígidos e espessos contribuiriam para reduzir a relação $\tau_{m\acute{a}x}/\tau_m$. Ojalvo e Eidnoff apud Silva (2007), em um estudo semelhante, concluíram que, para substratos rígidos, o aumento de sua espessura contribui para redução das tensões de descascamento e aumento das tensões cisalhantes.

3 FLUÊNCIA

A fluência pode ser definida como a deformação permanente dos materiais, dependente do tempo, quando são submetidos a uma carga ou tensão constante. A fluência é, dependendo da aplicação, um fenômeno indesejável e, com frequência, é o fator limitante da vida útil de uma peça. (CALLISTER, 2007)

Os materiais poliméricos como plásticos e borrachas são especialmente sensíveis à deformação por fluência. Embora seja observada em todos os tipos de materiais, uma revisão do estado da arte nos leva a concluir que grande parte dos trabalhos já realizados, tem foco em fluência de materiais metálicos e cerâmicos principalmente para utilização em altas temperaturas.

Este trabalho tem com foco contribuir para o entendimento do comportamento de juntas coladas com adesivos de base polimérica submetidos a fluência. Devido à quantidade pequena de pesquisas relacionadas nesta área para juntas coladas, partiremos do conhecimento pré-existente sobre fluência em materiais metálicos para introdução de alguns conceitos.

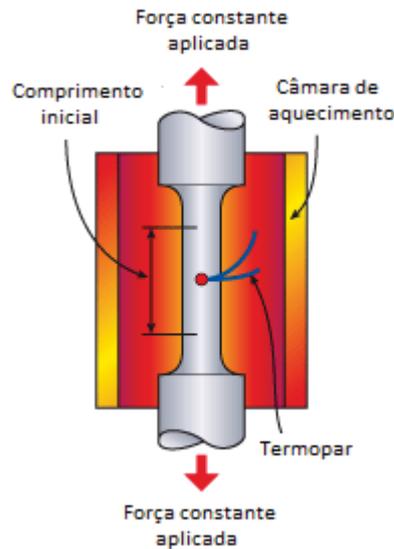
3.1 Ensaio de fluência em materiais metálicos

Para os materiais metálicos, a maioria dos ensaios de fluência é conduzido sob tração uniaxial, utilizando-se um corpo de prova (cp) com mesma geometria dos utilizados nos ensaios de tração, como mostrado na Figura 11. Por outro lado, ensaios de compressão uniaxiais são mais apropriados para materiais frágeis, uma vez que neles não existe concentração de tensões ou propagação de trincas, como ocorre com as cargas de tração. Os corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão são geralmente cilíndricos ou paralelepípedos, com razões comprimento/diâmetro que variam entre aproximadamente 2 e 4. Para materiais isotrópicos, as propriedades de fluência são virtualmente independentes da direção de aplicação da carga.

Um ensaio típico de fluência, segundo a norma ASTM E 139 “*Standard Practice for Conducting Creep, Creep-Rupture Test of Metallic Materials*”, consiste em submeter um

corpo de prova a uma carga ou tensão constante, ao mesmo tempo em que se mantém a temperatura constante.

Figura 11 - Corpo de prova típico para ensaio de tração em materiais metálicos submetido a ensaio de fluência com temperatura e deformação controladas por termopar e extensômetro.

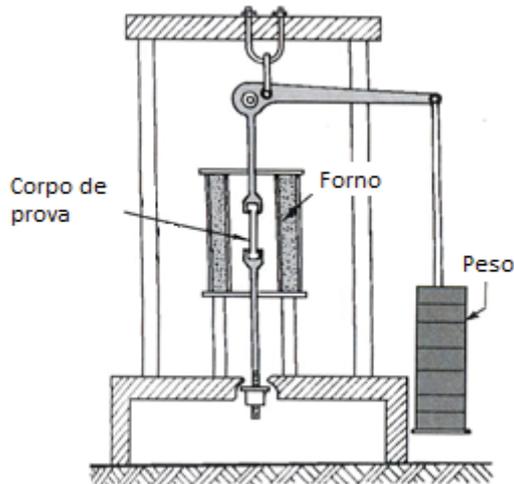


Fonte: O Autor, 2013.

É importante ressaltar que há diferença entre **carga constante** e **tensão constante**. Tensão é resultado da força dividida pela área da seção transversal do cp. Durante o ensaio, as deformações causadas pela força de tração, resultam na redução da área transversal do cp, sendo assim, toda vez que há redução da área, mantendo-se a força constante, há um aumento da tensão. Para manter a **tensão constante** durante todo o ensaio é necessário monitorar a variação da área e reajustar a carga aplicada a cada instante de tempo, aumentando a complexidade dos ensaios. Os ensaios sob tensão constante são empregados para proporcionar uma melhor compreensão dos mecanismos de fluência. (CALLISTER, 2007; ASKELAND, 2011)

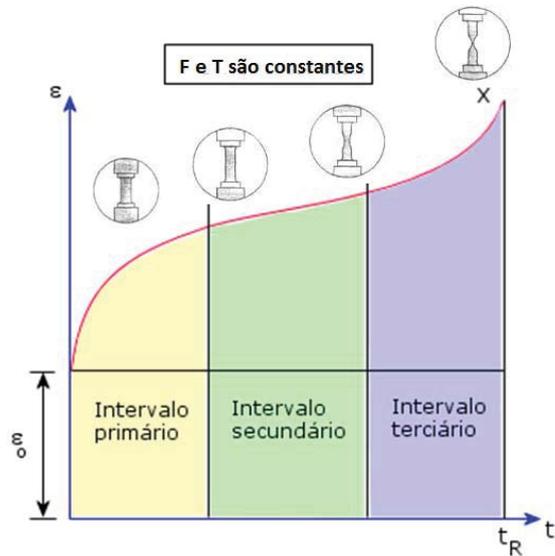
A Figura 12 exemplifica um ensaio de fluência realizado a **carga constante**, ou seja, independente do tipo de deformação que ocorra no corpo de prova durante o ensaio, a força de tração aplicada a este permanece constante e é resultado apenas da massa (peso), sustentada pelo corpo de prova, multiplicada pela razão dos comprimentos das alavancas antes e depois do ponto de ancoragem. Os ensaios a carga constante são mais utilizados por fornecerem informações que podem ser empregadas em engenharia. A Figura 13 é uma representação gráfica do comportamento típico de fluência sob carga constante em metais.

Figura 12 - Esquema de um equipamento típico de fluência à carga constante.



Fonte: O Autor, 2013.

Figura 13 - Gráfico do comportamento em fluência em metais sob carga e temperatura constantes;



Fonte: O Autor, 2013.

Nota-se que a partir do instante em que o corpo de prova é carregado, existe uma deformação instantânea, ϵ_0 , que é essencialmente elástica.

A curva de fluência resultante é composta por três regiões, cada qual com suas próprias e distintas características de deformação ao longo do tempo.

A fluência primária ou transiente ocorre em primeiro lugar, sendo caracterizada por uma taxa de fluência continuamente decrescente, ou seja, a inclinação da curva diminui ao longo do tempo. Isso sugere que o material está apresentando um aumento na resistência à fluência ou um encruamento, ou seja, a deformação se torna mais difícil conforme o material é deformado.

Para a fluência secundária, algumas vezes denominada fluência em regime estacionário, a taxa é constante; ou seja, a curva se torna linear. Com frequência, esse é o estágio da fluência que tem a maior duração. A constância da taxa de fluência é explicada com base em um equilíbrio entre os processos concorrentes de encruamento e de recuperação, onde a recuperação é o processo segundo o qual um material se torna dúctil e retém a sua habilidade de sofrer deformação.

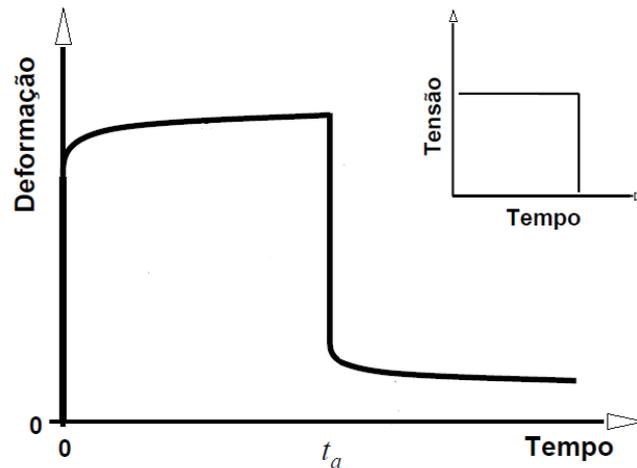
Finalmente, para a fluência terciária, existe uma aceleração na taxa e, por fim, a falha do material. Essa falha é denominada, com frequência, ruptura e resulta de alterações

micro estruturais e/ou metalúrgicas, por exemplo, a separação do contorno de grãos e a formação de trincas, cavidade e vazios. Além disso, para as cargas de tração, pode ocorrer a formação de um “empescoamento” em algum ponto na região sob deformação. Tudo isso leva a uma diminuição na área da seção transversal efetiva e a um aumento da taxa de deformação.

Possivelmente, o parâmetro mais importante em um ensaio de fluência é a inclinação da parte secundária da curva, $\frac{\Delta \epsilon}{\Delta t}$, mostrado na Figura 13, frequentemente chamado de **taxa de fluência mínima em regime estacionário**, representado por $\dot{\epsilon}_r$. Esse parâmetro de projeto de engenharia é levado em consideração em aplicações de longo prazo, tais como em componentes de usinas de energia nuclear, que são programadas para operar durante várias décadas e quando uma falha ou uma deformação muito grande não podem ser consideradas. Por outro lado, para muitas situações de fluência com vidas relativamente curtas, o tempo para a ruptura, ou tempo de vida até a ruptura, é a consideração de projeto predominante. Obviamente, para a sua determinação, os ensaios de fluência devem ser conduzidos até o ponto de ruptura. Esses são denominados ensaio de ruptura por fluência. Dessa forma, o conhecimento dessa característica de comportamento em fluência para um material permite ao engenheiro de projetos assegurar a sua adequação para uma aplicação específica (CALLISTER, 2007).

Materiais plásticos usualmente não exibem um pronunciado estágio secundário, iniciando a fluência a uma taxa muito rápida, imediatamente após o carregamento e progredindo a uma taxa continuamente decrescente, conforme ilustrado na Figura 14, no tempo entre 0 e t_a .

Figura 14 - Curva típica deformação-tempo de um ensaio de fluência/recuperação sob tensão constante para materiais plásticos.



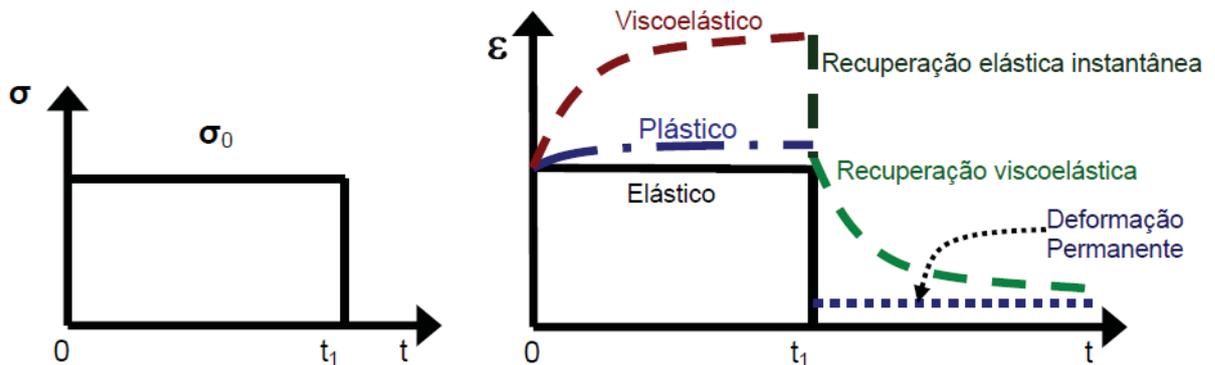
Fonte: FARINA, 2009.

3.2 Comportamento viscoelástico

Materiais viscoelásticos apresentam uma relação entre tensão e deformação que é dependente do tempo e da frequência. Lakes (2004 *apud* Farina, 2009) considera que todos os materiais exibem uma resposta viscoelástica, tanto que a elasticidade, ou o comportamento tipo mola, não existe em materiais reais. Contudo, trata-se apenas de uma descrição aproximada do material, para o qual o efeito viscoelástico é pequeno o bastante para ser desconsiderado.

Para os materiais que apresentam uma resposta viscoelástica em fluência a níveis apreciáveis, em uma determinada temperatura, seu comportamento é descrito como uma ação elástica em virtude do carregamento, seguido por um lento e contínuo aumento da deformação a uma taxa de variação da deformação decrescente com o tempo, ou seja, uma desaceleração do aumento da deformação. Quando a tensão é removida ocorre uma rápida recuperação elástica seguida por uma recuperação da deformação dependente do tempo a uma taxa de variação continuamente decrescente, mostrado na Figura 15. Materiais que apresentam este fenômeno são significativamente influenciados pelo nível de tensão e quanto maior o tempo passado em tensão constante, maior será a deformação correspondente. Deste modo, o tempo representa um fator muito importante no comportamento destes materiais.

Figura 15 - Reações da deformação ao degrau de carregamento constante



Fonte: FARINA, 2009.

O comportamento dependente do tempo de materiais viscoelásticos deve ser expresso por equações constitutivas que incluem o tempo como uma variável em adição à tensão e à deformação.

Mesmo sob o mais simples programa de carregamento, como exemplo, carregamento constante ao longo do tempo, a forma da curva tempo-deformação pode ser bastante complexa. Como o tempo não pode ser mantido constante, invertido ou eliminado durante um experimento, o estudo experimental do comportamento mecânico de tais materiais pode ser mais complexo do que o estudo de materiais independentes do tempo.

O comportamento viscoelástico manifesta-se de várias formas, incluindo fluência sob carregamento constante, relaxação de tensão sob deformação constante, recuperação da deformação dependente do tempo após a completa remoção da carga, ruptura por fluência dependente do tempo e dependência da frequência na resistência à fadiga.

Se após a remoção da carga uma porção mensurável da deformação não desaparece após um longo período de tempo, com esta porção residual sendo afetada pelo tempo de carregamento, então esta deformação é chamada viscoplástica. Sólidos viscoelásticos podem ou não exibir viscoplasticidade. (FARINA, 2009)

3.3 Efeitos da tensão e da temperatura em materiais metálicos

Tanto o nível de tensão quanto a temperatura influenciam o comportamento do material em fluência, Figura 16. Seja pelo aumento da tensão ou pelo aumento da temperatura, observa-se aumento da deformação instantânea no momento da aplicação da

carga, aumento da taxa de fluência em regime estacionário e redução do tempo de vida até a ruptura.

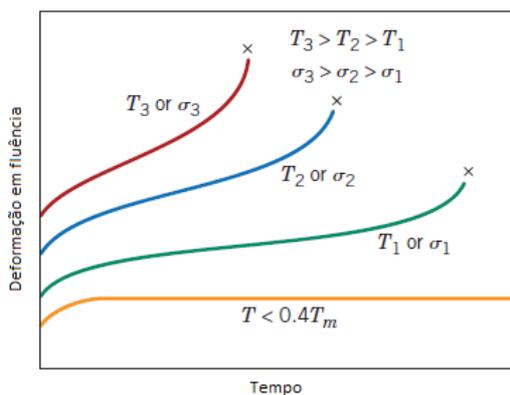
Os resultados de ensaios de ruptura por fluência são mais comumente apresentados na forma do logaritmo da tensão em função do logaritmo do tempo de vida até a ruptura. A Figura 17 mostra um desses gráficos para liga de níquel, onde pode ser visto que existe uma relação linear para cada temperatura. Para algumas ligas e em intervalos de tensão relativamente grandes, é observada não linearidade nessas curvas.

Foram desenvolvidas relações empíricas onde a taxa de fluência em regime estacionário é expressa como função da tensão e da temperatura. A sua dependência em relação à tensão pode ser escrita como (ASKELAND, 2011):

$$\dot{\epsilon}_r = K_1 \sigma^n \quad (1)$$

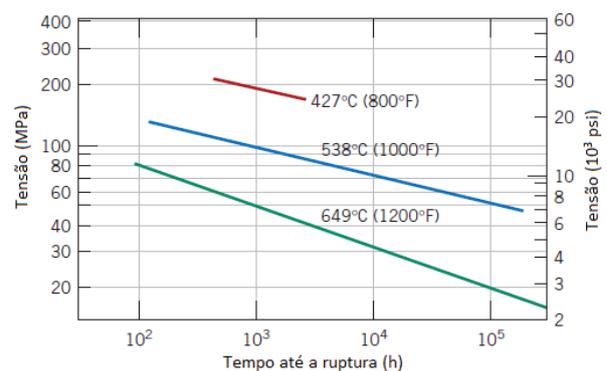
onde K_1 e n são constantes para um material. Um gráfico do logaritmo de $\dot{\epsilon}_r$ em função do logaritmo σ produz uma linha reta com inclinação n como mostrado na Figura 18, para uma liga de níquel em três temperaturas diferentes. Fica claro que um segmento de reta é traçado para cada temperatura.

Figura 16 - Influência da temperatura e da tensão sob o comportamento em fluência em função do tempo de vida até a ruptura.



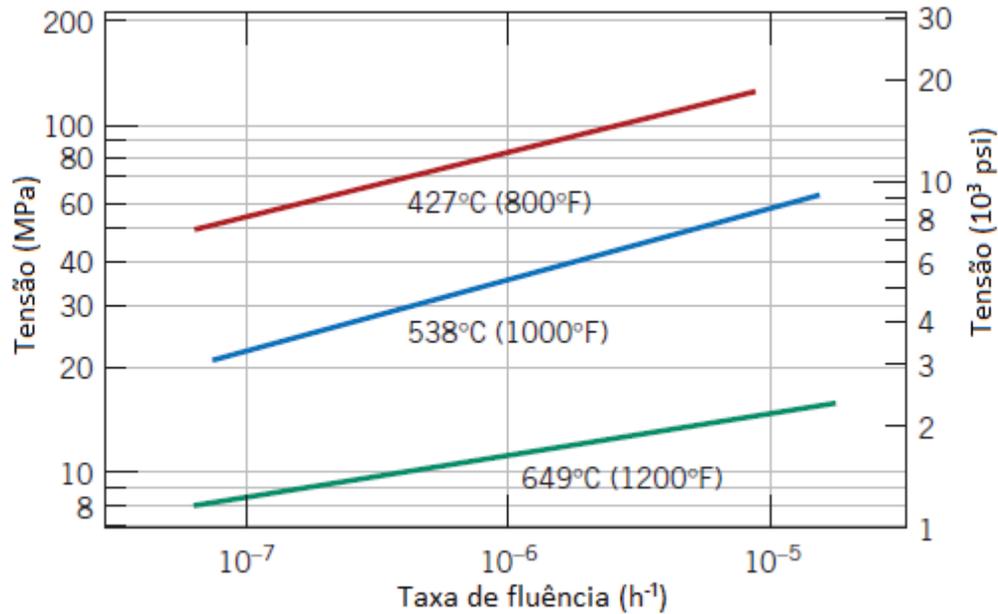
Fonte: CALLISTER, 2007.

Figura 17 - Tensão (log) versus tempo de vida até a ruptura (log) para uma liga de níquel-carbono com baixo teor de C em três temperaturas



Fonte: CALLISTER, 2007.

Figura 18 - Tensão (log) versus taxa de fluência em regime estacionário (log) para uma liga de níquel-carbono com baixo teor de C em três temperaturas.



Fonte: CALLISTER, 2007.

A taxa de fluência quando a influência da temperatura é incluída, onde K_2 e Q_f são constantes e Q_f é denominada energia de ativação para fluência, é dada por:

$$\dot{\epsilon}_r = K_2 \sigma^n \exp\left(-\frac{Q_f}{RT}\right) \quad (2)$$

Muitos mecanismos teóricos foram propostos para explicar o comportamento da fluência para vários materiais. Esses mecanismos envolvem a difusão por lacunas induzida por tensão, a difusão nos contornos de grãos, o movimento de discordâncias e o escorregamento de contornos de grão. Cada mecanismo leva a um valor diferente no expoente de tensão, n , na (2). Tem sido possível elucidar o mecanismo de fluência para um material específico pela comparação do seu valor experimental n com os valores estimados para os diferentes mecanismos. (CALLISTER, 2007)

Para alguns sistemas bem estudados, os dados de fluência dessa natureza são representados graficamente na forma de diagrama tensão-temperatura que são denominados mapas de mecanismo de deformação. Esses mapas indicam os regimes (ou áreas) tensão-temperatura nos quais os vários mecanismos operam. Com frequência, também são incluídos

contornos para taxas de deformação constante. Dessa forma, para uma dada situação de fluência, dado o mapa de mecanismo de deformação apropriado e quaisquer dois dos três parâmetros – temperatura, nível de tensão e taxa de deformação – o terceiro parâmetro pode ser determinado. (ASKELAND, 20011)

3.4 Métodos de extrapolação de dados

Com frequência, surge a necessidade de se obterem dados de engenharia relacionados à fluência cuja aquisição através de ensaios normais em laboratório é impraticável. Isso é especialmente verdadeiro para exposições prolongadas (da ordem de anos). Uma solução para esse problema envolve a execução de ensaios de fluência e/ou de ruptura por fluência em temperaturas acima daquelas necessárias, durante períodos de tempo mais curtos e sob um nível de tensão comparável, para então se fazer uma extrapolação apropriada para condições reais de serviço.

3.4.1 Propriedade logarítmica

Como descrito na seção 3.3, “os resultados de ensaios de ruptura por fluência são mais comumente apresentados na forma do logaritmo da tensão em função do logaritmo do tempo de vida até a ruptura”. Nestes casos, o comportamento em fluência, geralmente, é apresentado graficamente, por segmentos de retas.

Em escala cartesiana, a equação padrão de uma reta é dada por:

$$y = ax + b \tag{3}$$

onde a é o coeficiente de inclinação; e b é coeficiente linear.

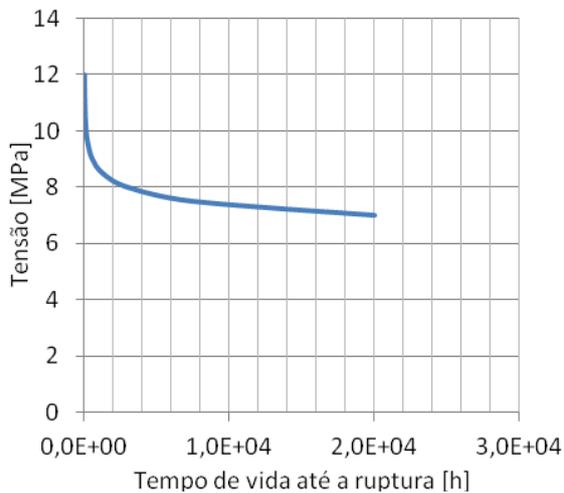
Em escala logarítmica, uma reta é escrita como na (4 onde n representa a inclinação da reta e k é igual ao valor de y quando x é igual a 1;

$$y = kx^n \quad (4)$$

A Figura 19 e Figura 20 exemplificam o comportamento desta equação em escala cartesiana e em escala logarítmica respectivamente, sendo n um valor negativo. Uma variação da (4, para x em função de y , é dada por:

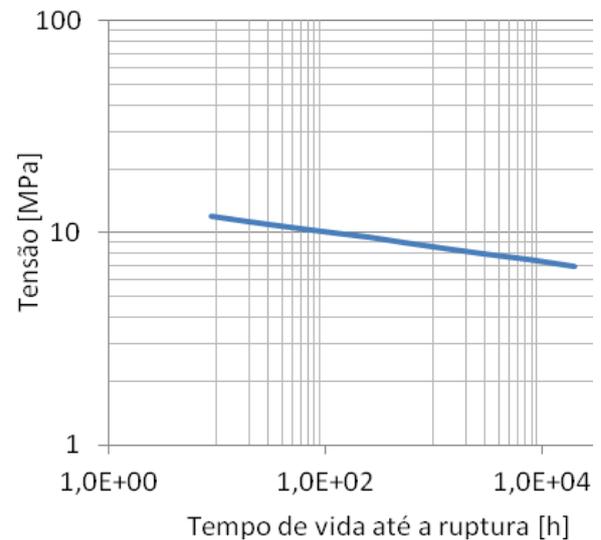
$$x = \sqrt[n]{\frac{y}{k}} \quad (5)$$

Figura 19 - Exemplo de representação gráfica da (4) plotada em escala cartesiana.



Fonte: O Autor, 2013.

Figura 20 - Exemplo de representação gráfica da (4) plotada em escala logarítmica.



Fonte: O Autor, 2013.

3.4.2 Técnica de Regressão Linear

Os estatísticos utilizam um processo de análise denominado regressão para obter uma curva que melhor se ajuste a um conjunto de pontos de dados experimentais. O processo é chamado de regressão linear quando se descobre que o melhor ajuste é uma linha reta. A reta deve ser orientada de maneira a minimizar os quadrados dos desvios dos pontos de dados em relação à própria reta.

Em escala cartesiana, como visto na seção 3.4.1, a equação padrão de uma reta é dada pela equação(3).

Considerando um conjunto com quantidade N de pontos de dados (x_i, y_i) , no geral, a linha de melhor ajuste não cruzará necessariamente um ponto do conjunto de dados. No entanto, se todos os pontos coincidisse com a linha de regressão, haveria então uma correlação perfeita.

Logo, é possível escrever:

$$y_i = ax_i + b + \epsilon_i \quad (6)$$

em que $\epsilon_i = y_i - y$ é o desvio padrão entre o ponto de dados e a linha para um dado valor de x_i . A soma dos quadrados dos desvios é fornecida por:

$$\epsilon = \sum \epsilon_i^2 = \sum (y_i - ax_i - b)^2 \quad (7)$$

Minimizar ϵ , a soma dos erros quadrados, esperando um ponto mínimo estacionário, requer $\frac{\partial \epsilon}{\partial a} = 0$ e $\frac{\partial \epsilon}{\partial b} = 0$. Isso resulta em duas equações simultâneas para o coeficiente angular e linear, denotadas por \hat{a} e \hat{b} , respectivamente. (SHIGLEY, 2005) Solucionando essas equações, obtemos:

$$\hat{a} = \frac{N \sum x_i \cdot y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{\sum x_i \cdot y_i - N \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sum x_i^2 - N \bar{x}^2} \quad (8)$$

$$\hat{b} = \frac{\sum y_i - \hat{a} \sum x_i}{N} = \bar{y} - \hat{a} \cdot \bar{x} \quad (9)$$

Em analogia ao descrito anteriormente, foi possível adaptar a teoria para uso desta técnica em escala logarítmica. Vale lembrar que a equação padrão da reta, agora em escala logarítmica, é dada pela (4) cujo coeficiente de inclinação é representado pela variável \hat{n} e a intersecção com x igual a 1 é igual a \hat{k} . Logo temos:

$$\hat{r} = \frac{N \sum \log x_t \cdot \log y_t - \sum \log x_t \cdot \sum \log y_t}{N \sum \log x_t^2 - [\sum \log x_t]^2} \quad (10)$$

$$\hat{k} = \frac{\sum \left[\frac{y_t}{x_t^N} \right]}{N} \quad (11)$$

3.4.3 Parâmetro de Larson-Miller

O ajuste dos dados experimentais a um modelo matemático é essencial, pois, através de uma equação, é possível tentar prever o comportamento das uniões em função do tempo ou em função da tensão de carregamento da junta. Porém, é importante enfatizar que a extrapolação dessas informações para tempos superiores aos analisados experimentalmente, correspondem a uma parcela de resultados os quais são inviáveis de serem obtidos em laboratório em condições normais, dado o tempo necessário aos ensaios e o custo aliado a esta etapa.

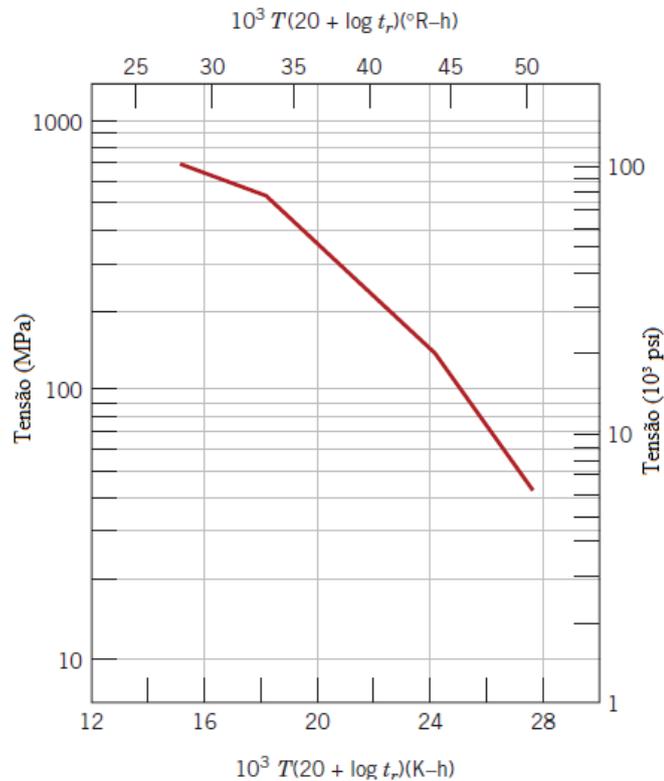
A fim de aumentar a confiabilidade dos dados preditos através da (4 para ordem de anos, torna-se necessário a utilização de uma segunda técnica que sirva como um caminho alternativo e que reforce as tendências observadas inicialmente.

A solução, mesmo que ainda teórica para esse problema, envolve a execução de teste de fluência e/ou ruptura por fluência em dois níveis de temperatura. Segundo o parâmetro de Larson-Miller, P_{LM} , definido pela (12, tal que C é uma constante geralmente na ordem de 20; para T em Kelvin e o tempo t_r em horas; o tempo de vida até a ruptura para um dado material, medido em algum nível de tensão específico, irá variar com a temperatura, tal que P_{LM} permaneça constante. (CALLISTER, 2007)

$$P_{LM} = T(C + \log t_r) \quad (12)$$

Testes de fluência realizados em dois níveis de temperatura, superior e inferior, em função de sucessivas tensões de carregamento da junta fornecem dados suficientes para se traçar um gráfico, tensão em função do parâmetro de Larson-Miller, como mostrado na Figura 21 para o ferro S-590.

Figura 21 - Gráfico do logaritmo da tensão em função do parâmetro de Larson-Miller para um ferro S-590.



Fonte: CALLISTER, 2007.

Uma variação da (12) para t_r em evidência, permite melhor compreensão da influência da tensão-temperatura sobre os tempos de vida no material e pode ser dada por:

$$t_r = 10^{\left(\frac{P_{LM} - c}{T}\right)} \quad (13)$$

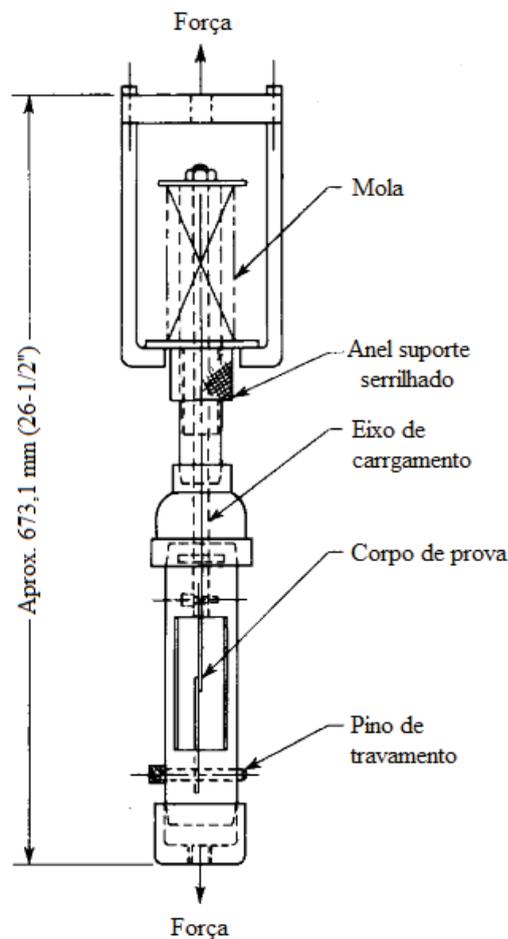
O tempo de vida até a ruptura será reduzido quando houver diminuição do parâmetro de Larson-Miller, P_{LM} , que é dependente do aumento da tensão de carregamento, ou quando houver aumento da temperatura, T , em fim tanto o aumento da temperatura quanto o aumento da tensão resulta na redução do tempo de vida.

Desta forma, é possível acelerar os resultados dos ensaios através do aumento da temperatura, sendo que, o nível superior da temperatura será tão alto quanto o tempo de vida que se deseja conhecer e a relação entre ambos corresponde a inclinação da curva no gráfico Tensão versus Larson-Miller, como mostrado na Figura 21.

3.5 Ensaio de fluência segundo a norma ASTM D 2294 – Descrição e Análise Crítica

A norma ASTM D 2294 define métodos para ensaio e meios para a determinação das propriedades em fluência de adesivos colados em substratos metálicos submetidos a condições de temperatura entre -67 a $+260^{\circ}\text{C}$. Esta norma propõe o aparato experimental mostrado na Figura 22, constituído por uma câmara oca, uma haste sólida para fixação do corpo de prova e uma mola resistente à alta temperatura. Um aparato relativamente simples, projetado com uma mola que permite sua transferência entre ambientes diferentes sem alteração da carga estática aplicada.

Figura 22 - Aparato experimental para ensaio de fluência

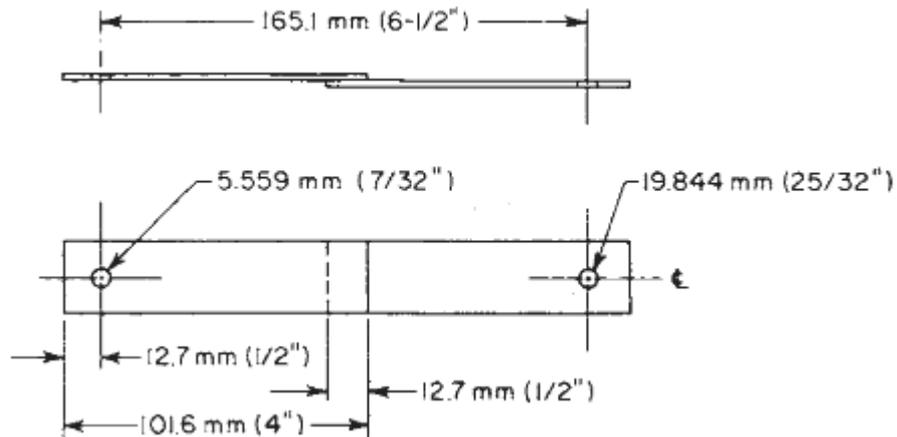


Fonte: ASTM D 2294, 1996.

Quanto ao corpo de prova, Figura 23, suas dimensões e forma são as mesmas que as determinadas na norma ASTM D 1002 e diferem apenas pelo acréscimo de um furo nas

extremidades da junta, exclusivamente para fixação no aparato experimental sugerido, na Figura 22.

Figura 23 - Formato e dimensões do corpo de prova para ensaio em fluência



Fonte: ASTM D 2294, 1996.

O aparato deve ser montado em uma máquina de ensaio universal, Figura 24, para aplicação da carga estática desejada. Depois de alcançada a carga, um anel suporte serrilhado é ajustado compensando o deslocamento do conjunto devido à força de compressão absorvida pela mola. Em seguida, a máquina de ensaio pode ser descarregada, o conjunto removido e colocado em ambiente com condições apropriadas de temperatura e umidade.

Baseado em um sistema de marcação manual e leitura por microscópio, a norma também indica uma metodologia para monitoramento da deformação da junta e seus intervalos de execução.

Como pode ser observado, o aparato experimental sugerido visa atender a todas as condições necessárias para o estudo do comportamento em fluência de juntas metálicas coladas, porém, alguns detalhes merecem serem comentados.

Durante o ensaio, o corpo de prova sofrerá variação em seu comprimento o que, relativamente resultará num decréscimo da força aplicada, principalmente no caso de juntas coladas com adesivos com baixo módulo de elasticidade. O aparato experimental não prevê monitoramento da carga aplicada ao corpo de prova durante o ensaio.

O fato de todo o aparato ser submetido a condições de temperatura desejadas à apenas o corpo de prova, poderá comprometer a constante elástica da mola, ou seja, mesmo que a mola tenha o mesmo comprimento que possuía quando tensionada inicialmente, variando sua constante elástica, haverá variação da força aplicada ao corpo de prova.

Qualquer alteração ou monitoramento da carga aplicada à junta deverá necessariamente ser realizado com auxílio de uma máquina de ensaio universal.

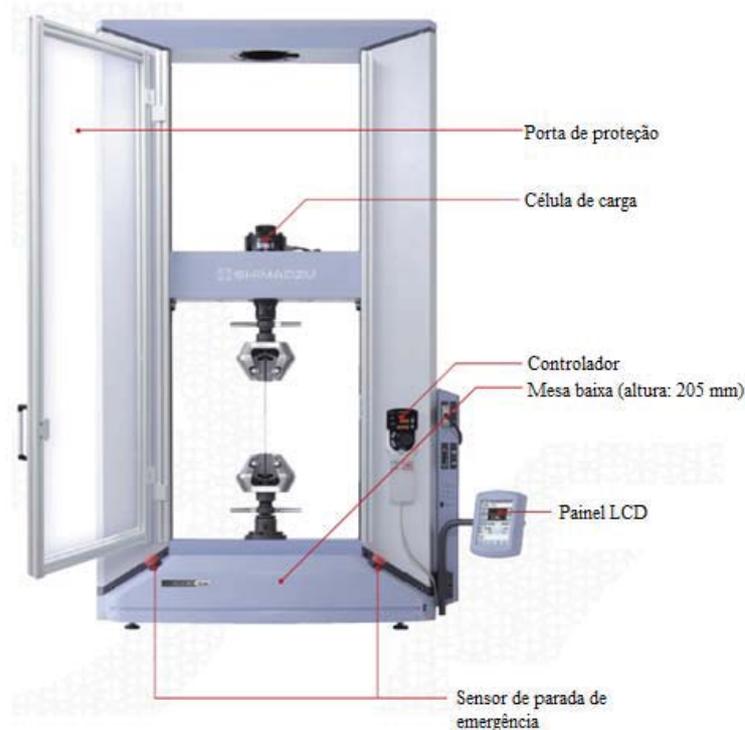
Para verificação da deformação da junta é necessário a retirada do aparato, mesmo que momentânea, do ambiente com temperatura controlada e, em caso de alta temperatura, a manipulação do aparato para utilização no microscópio é relativamente complicada.

Embora o equipamento sugerido pela norma seja diferente do utilizado ao longo de toda essa pesquisa, sempre que aplicável, todas as indicações sugeridas pela norma foram respeitadas.

3.6 Fluência - Considerações importantes

Um dos principais fatores que dificultam o estudo do comportamento de materiais em fluência é o longo período de tempo necessário para os testes. Geralmente, os testes são realizados através de uma máquina de ensaio universal, Figura 24.

Figura 24 - Máquina de ensaio universal.



Fonte: SHIMADZU, [s.d.].

Esta máquina é devidamente projetada para fornecer informações sobre força e deslocamento, possui duas garras para fixação do corpo de prova, célula de carga para monitoramento da força aplicada à junta durante todo o ensaio e um sistema motriz, responsável pelo deslocamento da garra superior com o propósito de aplicar tensão à junta, deformando-a. Seu sistema computacional é capaz de controlar o deslocamento da garra e monitorar a força resultante do estiramento do corpo de prova. É um equipamento com alto nível tecnológico, porém, permite apenas um ensaio por vez.

Levando-se em conta que cada ensaio teria tempo de duração médio de 1000 horas, o tempo mínimo necessário para obter pelo menos cinco resultados seria de aproximadamente, sete meses. Essa metodologia restringiria o planejamento dos ensaios à forma sequencial e seriada, limitando a produtividade dos resultados.

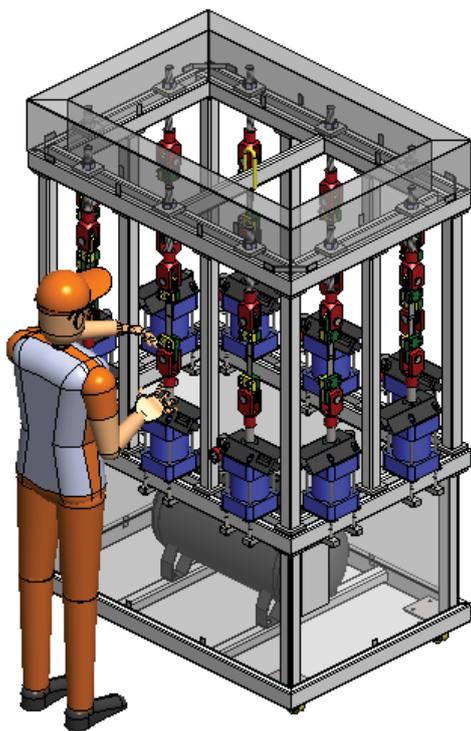
Partindo do princípio que ensaios de tração em função do tempo apresentam dispersão naturalmente elevada, restariam duas alternativas, ou o tratamento estatístico dos resultados seria pautada em uma quantidade pequena de ensaios e, conseqüentemente, reduzida confiabilidade ou, seria necessário um longo período de tempo para alcançar a quantidade adequada de juntas ensaiadas, implicando em alto custo para o estudo.

4 O EQUIPAMENTO PNEUMÁTICO DE FLUÊNCIA (EPF)

A fim de promover maior dinamismo ao estudo de fluência, menor custo por ensaio e quantidade de dados experimentais suficientes para um tratamento estatístico confiável em um intervalo relativamente curto de tempo, o Laboratório de Adesão e Aderência (LAA) desenvolveu o Equipamento Pneumático de Fluência (EPF), Figura 25.

Projetado para testar dez juntas simultaneamente, permite planejar os experimento de forma sequencial e paralela, ou seja, dez ensaios, com parâmetros distintos, ocorrem ao mesmo tempo e, ao concluir um teste em uma das unidades de ensaio, substitui-se a junta rompida por outra a ser testada, não havendo interferência nos outros ensaios que permanecem em andamento.

Figura 25 - Equipamento Pneumático de Fluência (EPF) desenvolvido no LAA/IPRJ/UERJ.



Fonte: O Autor, 2013.

Embora para um estudo mais apurado dos mecanismos de fluência seja importante o monitoramento da deformação do corpo de prova durante os ensaios, a proposta inicial que levou a construção do equipamento foi limitada em avaliar a eficácia de se aplicar carga às juntas por meio de cilindros e reguladores pneumáticos. Sendo assim, este primeiro

equipamento não conta com sistema voltado à mensuração do deslocamento da junta nem controle de temperatura, sendo seu foco principal, aplicar carregamento constante ao corpo de prova até sua ruptura, registrando o período de duração do ensaio.

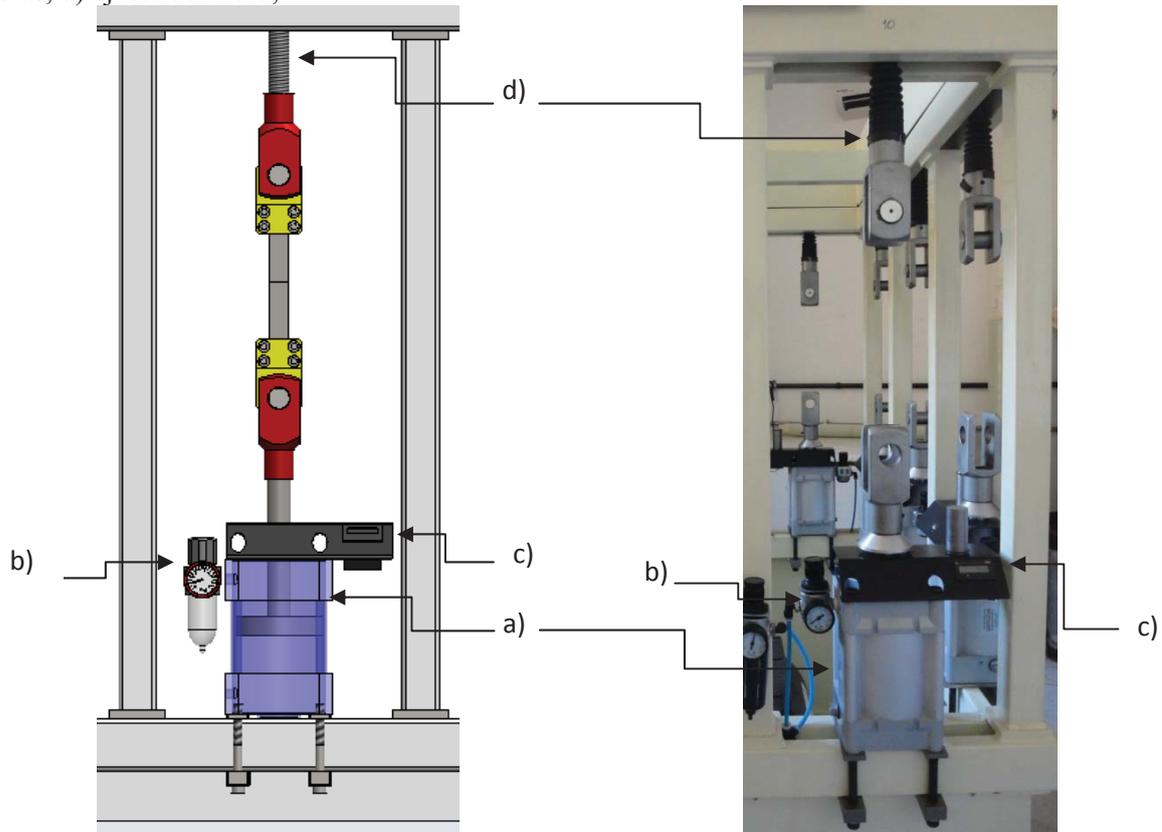
O equipamento desenvolvido permite avaliar um parâmetro fundamental no projeto de juntas coladas, **o tempo de vida até a ruptura em temperatura ambiente**.

4.1 Descrição do equipamento

Desenvolvido em estrutura metálica, compostas por vigas e colunas fabricadas em perfil estrutural, foi projetado para se adequar aos padrões de juntas padronizadas pelas normas ASTM D 1002 e ASTM D 638M. Cada uma das dez unidades de ensaio (UE), Figura 26, é compostas por:

- a) Um cilindro pneumático responsável por tracionar a junta através da pressurização de sua câmara superior;
- b) Controlador de pressão, composto por um manômetro analógico e um regulador responsável por ajustar a pressão no interior do cilindro e, conseqüentemente, a força aplicada ao corpo de prova;
- c) Contador de horas destinado a registrar o tempo de duração do ensaio. Quando ocorre a ruptura do corpo de prova, um sensor é acionado determinando o momento de encerramento do teste;
- d) Garra superior com altura ajustável permitindo a fixação de corpos de prova que tenham comprimentos diferentes.

Figura 26 - Unidade de ensaio (UE). a) cilindro pneumático; b) regulador de pressão; c) contador de horas; d) ajuste de altura;



Fonte: O Autor, 2013.

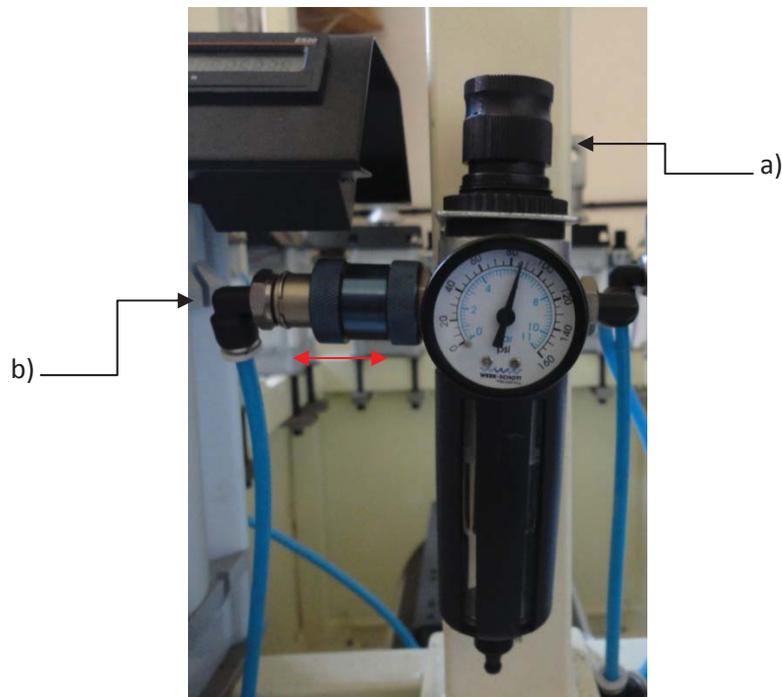
Cada unidade de ensaio (UE) possui controle independente de carga e é capaz de aplicar até 1200kg à junta. Possibilita testar, simultaneamente, dez corpos de prova, todos submetidos a carregamentos distintos, de acordo com os parâmetros de carga desejados para o ensaio. Durante toda a duração do teste é possível, a qualquer instante, monitorar e/ou alterar o carregamento se necessário.

O equipamento conta com um reservatório de ar, Figura 25, dimensionado para mantê-lo independente da linha de alimentação, ou seja, mesmo que haja um eventual problema de fornecimento de ar, o equipamento mantém os parâmetros de ensaio inalterados, evitando a interrupção dos testes.

Mesmo que haja ruptura de nove das dez juntas ensaiadas, a maior variação de volume de ar resultará em uma redução de 1,5% no carregamento da junta restante, isto apenas no caso em que esta esteja submetida ao máximo carregamento, 1200kg. Para qualquer outra situação de menor carga, o regulador de pressão manterá o carregamento constante desde que a pressão do reservatório seja maior que a pressão interna do cilindro.

Além dos reguladores presentes em cada unidade de ensaio, o equipamento possui um regulador de pressão principal, Figura 27a, localizado entre o reservatório e as unidades. Sua principal função é estabilizar a pressão fornecida às unidades de ensaio, evitando que a uma possível variação no reservatório seja transmitida ao circuito de ar mais sensível. Uma válvula interruptora de fluxo localiza na linha entre o reservatório e o regulador principal, Figura 27b, permite separar reservatório das unidades de ensaio. Desta forma, é possível iniciar ou parar o ensaio em todas as unidades ao mesmo tempo de maneira simples.

Figura 27 - a) válvula reguladora de pressão; b) válvula interruptora de pressão;



Fonte: O Autor, 2013.

O EPF possui garras fabricadas em material tratado a fim de impedir desgastes prematuros, garantindo maior durabilidade em seu uso (Figura 28). Sua superfície serrilhada foi endurecida termicamente a fim de melhorar o travamento e impedir deslizamentos entre corpo de prova e garra durante os testes (Figura 29). Quatro parafusos distribuídos em torno do local de fixação do CP dão rigidez ao conjunto, formando uma espécie de “sanduíche” composta por garra e corpo de prova.

Figura 28 - Garra para fixação dos corpos de prova.



Fonte: O Autor, 2013.

Figura 29 - Montagem da garra. Detalhe do entrelaçamento do serrilhado na garra para melhor travamento do corpo de prova.



Fonte: O Autor, 2013.

4.2 Funcionamento do equipamento

O equipamento utiliza a pressão da linha de ar para alimentar todas as unidades de ensaio. Seu princípio de funcionamento é baseado em converter a pressão pneumática de entrada em força na haste do pistão. A força é dependente da área útil e da pressão sobre ela exercida. Como a área útil é constante e tem mesma dimensão para todas as unidades de ensaio, ajusta-se a tração na junta variando a pressão na câmara superior de cada cilindro.

4.2.1 Relação Tensão de Cisalhamento por Pressão

Através do ajuste de pressão presente em cada unidade de ensaio, Figura 26b, é possível converter a pressão do reservatório diretamente em força na haste do pistão e, conseqüentemente, tensão na área colada da junta.

A conversão direta da pressão registrada no manômetro para a força, em quilos, resultante no corpo de prova é expressa por:

$$F_1 = P \cdot k_1 \cdot A_{pis} \quad (14)$$

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

Como cada cilindro trabalha tracionando o cp, a área útil, nesse caso, será em função do diâmetro do pistão menos o diâmetro da haste, Figura 26, item a), respectivamente 125 mm e 32 mm, sendo assim $A_{pis} = 11468,0$ mm². Ao multiplicar o fator de conversão k_1 pela área A_{pis} obtém-se a constante que relaciona a pressão registrada no manômetro com a força resultante no corpo de prova, chamada de $C_1 = 117$ kgf/bar. Logo:

$$F_1 = P \cdot C_1 \quad (15)$$

De acordo com a norma ASTM D 1002, a área padrão da região colada deve medir 25,4 mm de largura por 12,7 mm ($\pm 0,25$ mm) de comprimento, assim A_{cp} corresponde a 322,58 mm². Logo, é possível relacionar a pressão P registrada pelo manômetro com a tensão de cisalhamento, τ , no corpo de prova por:

$$\tau = \frac{P \cdot k_2 \cdot A_{pis}}{A_{cp}} \quad (16)$$

onde:

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

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

Logo:

$$\frac{\tau}{P} = \frac{k_2 \cdot A_{pis}}{A_{EPF}} = C_2 \quad (17)$$

Através da (17), 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.

4.2.2 Taxa de carregamento

O equipamento de fluência não possui taxa de aplicação de carga automática, sendo assim, antes de realizar os teste para obtenção das tensões médias de rupturas das juntas, foi necessário desenvolver uma metodologia para aplicação de carga aos corpos.

A velocidade com que o CP é carregado depende da velocidade com que a pressão é incrementada no manômetro. Este ajuste deve ser feito manualmente pelo operador do equipamento e, se for o caso de cargas distintas entre as juntas, individualmente para cada unidade de ensaio.

A resolução mínima que o manômetro oferece é de 0,2 bar, numa escala que varia de 0,4 a 10 bar de pressão. Assim, uma taxa automática de carregamento por ser convertida para uma taxa manual apenas definindo qual o intervalo de tempo necessário para incrementar a pressão em 0,2 bar. Através da (16) foi possível obter qual a tensão de cisalhamento corresponde a 0,2 bar, no caso, 710 kPa.

De acordo com a norma ASTM D 1002 a velocidade indicada para ensaio de tração das juntas de cisalhamento é entre 80 a 100 kgf/cm² por minuto ou, aproximadamente, 1,3 mm de deslocamento por minuto. O valor de tensão, neste caso, corresponde a, aproximadamente, incrementos de 2,6 bar por minuto no EPF. Levando em consideração que em uma máquina de ensaio universal, a velocidade do ensaio é função do deslocamento por

minuto e que a velocidade permanece constante para qualquer instante de tempo, ajustar 2,6 bar a cada 1 minuto no EPF, corresponderia a aumentos súbitos de 9,23 MPa/min na região colada das juntas, descaracterizando a velocidade constante para a execução do ensaio. Sendo assim, uma possibilidade foi aumentar a quantidade de intervalos e ajustar o carregamento com frações do carregamento a ser atingido em um minuto.

Desde que a velocidade de carregamento não ultrapasse a indicada pela norma, uma taxa menor poderia ser aceitável. Porém, é desejado que esta seja o mais próximo possível da referenciada na ASTM D 1002 e, depois de escolhida, seja mantida para todos os testes relacionados a um mesmo estudo de forma a não tornar a velocidade de ensaio uma variável não controlada. A seção 5.10 trata sobre a metodologia adotada para determinação da velocidade de ensaio.

4.3 Planejamento Experimental

Duas variáveis foram analisadas. A primeira é implícita ao estudo e está relacionada aos níveis de tensões decrescentes em que as juntas foram testadas. A segunda está associada ao módulo de elasticidade do adesivo. Com o propósito de analisar módulos extremo opostos, foi necessário selecionar adesivos com bases poliméricas diferentes. O adesivo Multi-Metall, a base de epóxi, possui o maior módulo de elasticidade e o adesivo Fusor, a base de poliuretano, possui o menor módulo de elasticidade.

Inicialmente, foram determinadas as tensões médias de ruptura das juntas, a τ_u , respectivas a cada adesivo utilizado no estudo. Esta foi considerada como a tensão máxima admissível aos corpos de prova.

As tensões médias de ruptura das juntas foram obtidas através do Equipamento Pneumático de Fluência (EPF) e posteriormente, ensaios comparativos foram realizados na máquina de ensaio universal. Vale ressaltar que, mesmo havendo diferença nos resultados obtidos pelas diferentes máquinas, a variação do valor da τ_u interferirá apenas no valor relativo ao percentual dos níveis de carregamento das juntas e não no valor efetivo de cargas aplicadas aos corpos de prova.

Os corpos de prova foram fabricados de acordo com a norma ASTM D 1002. Todos os parâmetros como geometria do substrato, espessura da camada adesiva,

comprimento do *overlap*, tratamento superficial do substrato, procedimento de preparo e ensaio foram similares para todas as juntas fabricadas.

Para a execução dos ensaios em fluência foram propostos os níveis de carregamentos de 90; 80; 70; 60; 50% da τ_u , porém, na prática, tensões do tipo 66,4% e 52,1%, da τ_u ocorreram. Para cada nível de tensão foram ensaiadas, no mínimo, três amostras em fluência.

O tempo de vida até a ruptura para um dado nível de tensão corresponde ao tempo médio necessário para um grupo de juntas ensaiadas no mesmo nível de tensão romperem. Uma vez que obtidos os resultados, duas curvas de tensão versus tempo de vida seriam construídas, uma para cada adesivo, representando o comportamento das juntas ao longo do tempo.

Dois perfis de curvas eram esperados. Uma primeira hipótese admitia uma curva composta por duas regiões. A região primária seria caracterizada por inclinação negativa acentuada, associada a um curto período de vida da junta em tensões próxima à τ_u , seguida de uma região secundária, caracterizada por uma perceptível tendência de estabilização da tensão em função do tempo, ou seja, um limite de tensão para o qual a junta falharia apenas após períodos de tempo relativamente grandes. A segunda hipótese admitia a inexistência de tensão limite. Neste caso, a curva apresentaria inclinação acentuada e negativa do início ao fim e a junta sempre falharia em períodos relativamente curtos.

Caso o limite mínimo de 50% da τ_u previsto inicialmente não fosse satisfatório, tensões menores poderiam ser acrescentadas, seguindo a mesma taxa de decaimento, possibilitando a investigação de tendência à estabilização em tensões menores.

5 METODOLOGIA

O Laboratório de Adesão e Aderência (LAA), fundado no ano de 2000, vem desenvolvendo desde então, pesquisas relacionadas ao estudo do comportamento de juntas coladas com adesivos estruturais, com o objetivo de caracterizar as propriedades e conhecer o comportamento dos adesivos analisados, tornando-os produtos alternativos para uso na área das engenharias.

Após o estudo da influência de parâmetros como, tratamento superficial, espessura de adesivo, ataque químico, entre outros, que possuem importância significativa na resistência mecânica das juntas, um procedimento de colagem de juntas metálicas foi criado e, tornou-se uma recomendação técnica (RT) do CENPES-PETROBRAS nomeada como: “**RT TMEC nº003/08 – Qualificação de Adesivo para Reparo Estrutural**”. Este documento define a metodologia de preparo dos substratos, como colar as juntas, parâmetros de ensaio e tratamento estatístico dos resultados.

Para que as juntas coladas satisfaçam os padrões geométricos e tolerâncias dimensionais exigidas pela norma ASMT D 1002, o LAA desenvolveu gabaritos e outros dispositivos com o propósito de garantir a padronização e repetibilidade na fabricação dos corpos de prova.

Fundamentada na norma ASMT D 1002 e comprovada pela dispersão dos resultados que compõem o histórico de ensaios já realizado no laboratório, foram testadas no mínimo três amostras, sob as mesmas condições de ensaio, para direcionar o andamento do novo estudo em fluência, porém, devido à grande dispersão dos resultados encontrada em alguns casos, quantidades maiores foram necessárias para elevar-se o nível de confiabilidade.

5.1 Adesivos selecionados

5.1.1 Características do adesivo Multi-Metall

O adesivo comercial Multi-Metall linha SS mostrado na Figura 30, representado no Brasil pela empresa Tecnofink, foi selecionado como o adesivo com maior módulo de elasticidade.

Figura 30 - Adesivo Multi-Metall, resina a base de epóxi e endurecedor yellow.



Fonte: O Autor, 2013.

Segundo as informações do fabricante, é um adesivo bi-composto, fabricado com resina a base de epóxi com opção na escolha do endurecedor, Red ou Yellow, associado a uma maior ou menor taxa de cura, respectivamente. O endurecedor escolhido foi o Yellow.

De acordo com o fornecedor, trata-se de um adesivo indicado para o reparo de todos os metais ou ligas, na presença ou não de contaminantes como óleo, graxa, gordura ou combustíveis, sob alta condições de temperatura e pressão. É utilizado em larga escala pela indústria de petróleo e seus derivados no reparo de tubulações. Possui viscosidade alta, semelhante a uma espécie de massa espatulável. A Tabela 1 resume as características do adesivo. Não foi informado pelo fabricante o módulo de elasticidade do adesivo. A seção 6.4.2 trata sobre os ensaios realizados para a determinação deste parâmetro.

Tabela 1 - Características do adesivo Multi-Metall linha SS

Tempo de trabalho	10 min.
Temperatura de trabalho	25°C
Textura	Massa espatulável
Razão de mistura volumétrica	5:1
Base polimérica	Epóxi
Coloração após mistura	Cinza escuro
Presença de cargas	Sim*

*Não informada a natureza das cargas

Fonte: TECNOFINK, [s.d.]

5.1.2 Características do adesivo Fusor

O adesivo FUSOR 2001/2002 HV, representado no Brasil pela empresa LORD Corporation, mostrado na Figura 31, foi selecionado como o adesivo com menor módulo de elasticidade.

Figura 31 - Exemplo de aplicação do adesivo FUSOR 2001/2002 HV, reparo de pára-choques automotivos.



Fonte: FUSOR, [s.d.]

Segundo a descrição do fabricante, este adesivo é um composto de resina (FUSOR 2001) a base de poliuretano e catalizador (FUSOR 2002). É indicado para reparo e

reforço plástico de fibra de vidro e folhas compostas moldáveis. Apresenta baixa viscosidade se comparado ao adesivo anterior.

Seu processo de cura pode ser feito através de radiofrequência, ar quente ou em ambientes com temperatura controlada.

É indicado para ser aplicado em substratos isentos de contaminação por gorduras, óleos, impressões digitais, poeiras, agentes desmoldantes, ferrugens e outros contaminantes.

Não foi informado pelo fabricante o módulo de elasticidade do adesivo. A seção 6.4.2 trata sobre os ensaios realizados para a determinação deste parâmetro. A Tabela 2 resume as características do adesivo.

Tabela 2 - Características do adesivo FUSOR 2001/2002 – HV

Tempo de trabalho	5 minutos
Temperatura de trabalho	25°C
Textura	Líquido viscoso
Razão de mistura volumétrica	1:1
Razão de mistura mássica	1,16:1
Base polimérica	Poliuretano
Coloração após mistura	Cinza claro
Presença de carga	Isento

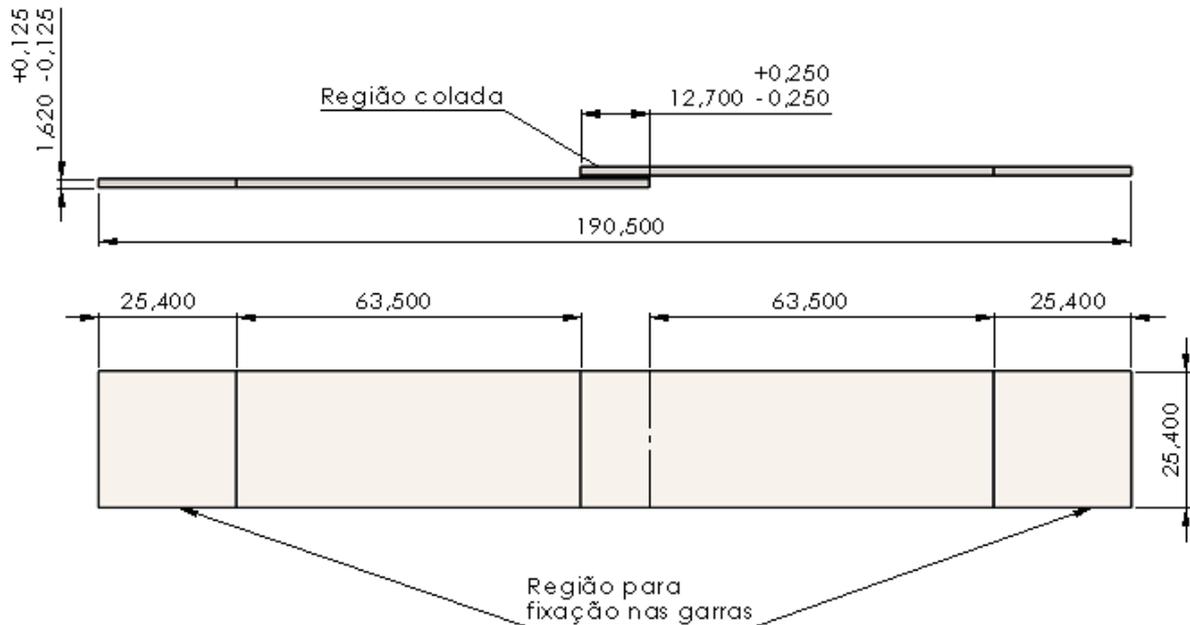
Fonte: FUSOR, [s.d.]

5.2 Metodologia para cálculo da tensão cisalhante máxima admitida nas juntas

As juntas de cisalhamento utilizadas no decorrer da pesquisa foram fabricadas conforme o procedimento de colagem, RT TMEC nº003/08 / PETROBRAS, em conformidade com a norma ASTM D 1002. A Figura 32 define as dimensões e tolerâncias indicadas pela norma.

De acordo com a ASTM D 1002, as dimensões dos substratos metálicos são dependentes do limite de escoamento do material e da geometria final das juntas.

Figura 32 - Forma e dimensões da junta de cisalhamento *single-lap* ASTM D 1002.



Fonte: O Autor, 2013.

O comprimento do *overlap*, região colada da junta e a espessura do substrato podem variar desde que a força necessária para romper os corpos de prova não exceda o limite de escoamento do material do substrato.

A relação existente entre essas variáveis é dada por (ASTM D 1002):

$$L = \sigma_{sy} \frac{t}{1,5\tau_f} \quad (18)$$

onde:

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

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

t = espessura do substrato, [mm];

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

O gabarito responsável por padronizar as dimensões das juntas restringe a variação do comprimento do *overlap* e da espessura do substrato. O material escolhido para fabricação do substrato foi o Aço ASTM A36, ou seja, o limite de escoamento também é fixo.

A (18), permite obter a maior tensão cisalhante que o adesivo, a ser testado, possa ter.

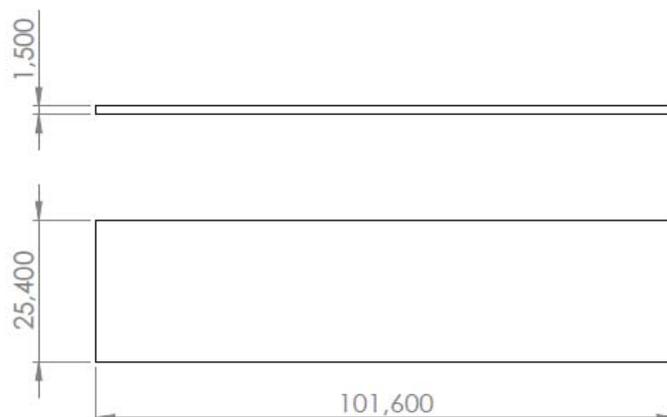
$$\tau_f = \sigma_{ey} \frac{t}{1,5L} \quad (19)$$

O comprimento do *overlap* é igual a 12,7 mm. A espessura do material do substrato é igual a 1,5 mm e o limite de escoamento do substrato é de 250 MPa. Isto significa dizer que é possível fabricar juntas cujas tensões cisalhante da junta não ultrapassem 19,5 MPa.

5.3 Metodologia para usinagem dos substratos

Os substratos foram cortados nas dimensões mostradas na Figura 33, oriundos de chapas metálicas com 1,20 x 2 m (LxC) e espessura de 1,5 mm, laminadas a frio, fabricadas em material ASTM A36. O equipamento usado para o corte foi uma guilhotina industrial manual.

Figura 33 - Dimensões do substrato



Fonte: O Autor, 2013.

Em seguida, os substratos foram protegidos por aplicação de óleo antioxidante STARRETT, Micro óleo – M1.

5.4 Metodologia para tratamento superficial – jateamento e rugosidade

A etapa de jateamento foi realizada pela empresa MACSEAL na cidade de Macaé. Os substratos foram previamente fixados em gabaritos de maneira para que a área de colagem de cada chapa ficasse exposta ao jato, Figura 34.

A granalha utilizada foi a G25 por possuir granulometria de acordo com o anexo A da N-9-Petrobras, selecionada após análise como aquela capaz de alcançar o nível de rugosidade exigido, R_t maior que $85 \mu\text{m}$.

A inspeção visual das chapas as aprovou no critério N-9 Petrobras, item 3.4.3, padrão de limpeza Sa3, jateamento abrasivo ao metal branco. Também foi observado o empenamento das chapas, provavelmente, devido à dois fatores principais, pressão do jato sobre a superfície e desequilíbrio da tensão residual gerada durante processo de laminação, causada pela remoção de metal na superfície das chapas pelo jato abrasivo. Posteriormente, os substratos foram desempenados com auxílio de uma morsa e duas placas de PVC, formando uma espécie de sanduiche, a ser comprimido pela morsa.

Figura 34 - Substratos fixados em gabaritos para jateamento abrasivo.



Fonte: O Autor, 2013.

Alguns substratos foram separados para realizar a análise de rugosidade. De acordo com a ISO 4288:1996, o número de amostras de cada lote separadas aleatoriamente deve satisfazer a expressão:

$$N_{\alpha} = \sqrt{N_{\beta}} \quad (20)$$

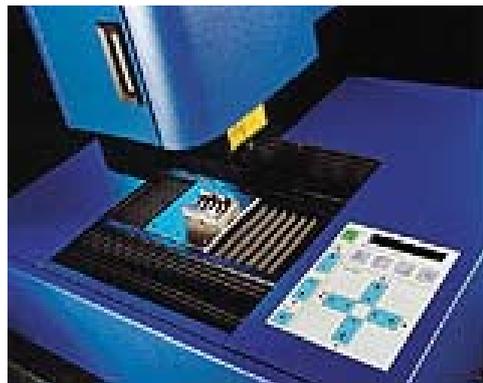
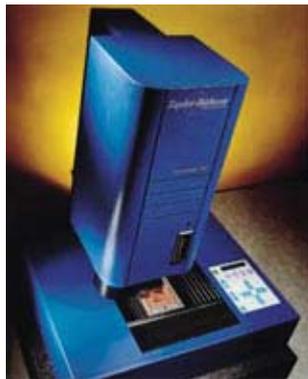
onde:

N_a = número de amostras a serem analisadas;

N_t = quantidade de itens do lote;

O parâmetro de rugosidade utilizado foi o R_t , correspondente à distância entre o pico mais alto e o vale mais baixo do perfil de rugosidade. As medições do perfil de rugosidade foram realizadas no rugosímetro tridimensional TalyScan 150 (Taylor Hobson), Figura 35, na velocidade $1000 \mu\text{m/s}$, com precisão de malha x-y de $1 \times 10 \mu\text{m}$. A área de medição foi de $4 \times 0,01 \text{ mm}$, de acordo com a norma ISO 4288:1996, Figura 36 e Figura 37.

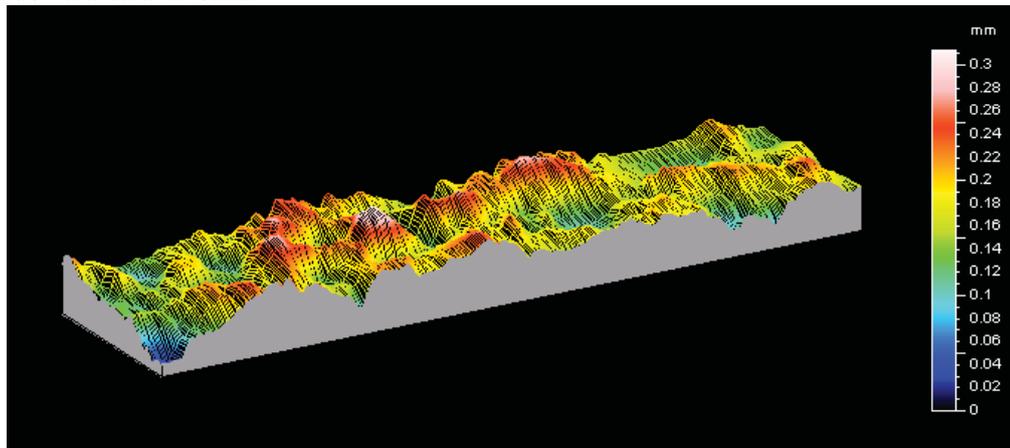
Figura 35 - Rugosímetro tridimensional TalyScan 150 – Taylor Hobson



Fonte: TAYLOR-HOBSON, 2006.

A etapa de análise de rugosidade se dividiu em duas fases. A primeira analisou o perfil de rugosidade logo depois de terminada a etapa de jateamento abrasivo. Foram encontrados os seguintes níveis médios de rugosidade para cada um dos três lotes de substratos jateados: $107 \pm 22,6 \mu\text{m}$; $106 \pm 17,1 \mu\text{m}$; e $83 \pm 7,7 \mu\text{m}$;

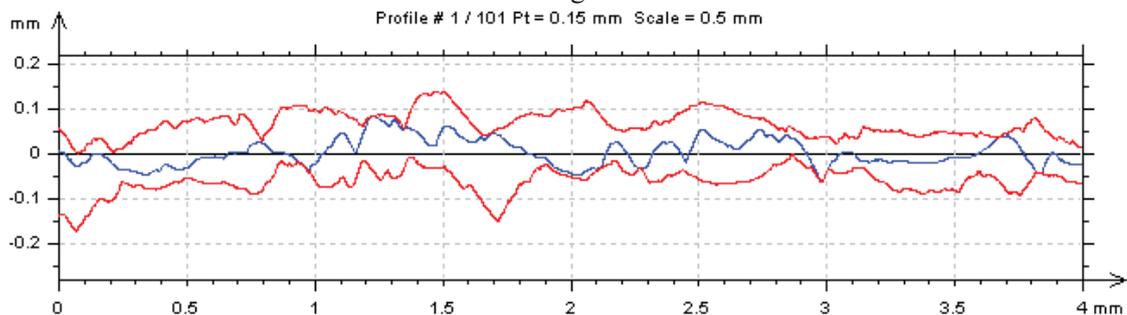
Figura 36 - Imagem tridimensional, resultado da análise superficial mostrando o perfil de rugosidade encontrado na área analisada.



Fonte: O Autor, 2013.

Na Figura 37, a curva intermediária representa especificamente o perfil de rugosidade encontrado na primeira linha, com comprimento de 4 mm. A curva mais acima representa o limite superior em relação ao total de 101 linhas analisadas e a curva mais abaixo representa o limite inferior.

Figura 37 - Resultado bidimensional da análise de rugosidade de uma das amostras.



Fonte: O Autor, 2013.

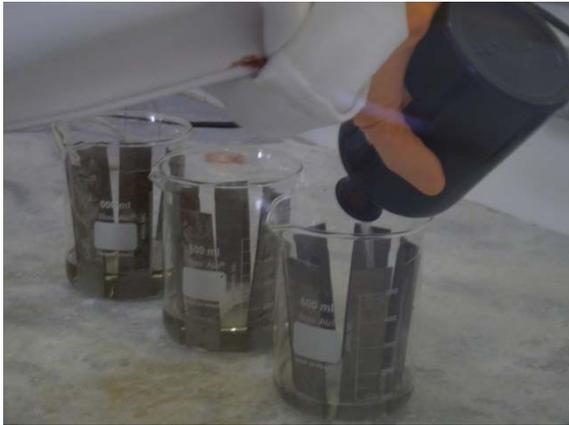
A segunda fase analisou a rugosidade média dos substratos logo depois de realizado o ataque químico, como descrito a seguir.

5.5 Metodologia para ataque químico

Antes de iniciar a colagem de cada lote de juntas de cisalhamento, todos os substratos separados para a fabricação dos corpos de prova passaram por ataque químico com solução ácida nítrico-fosfórica conforme a ASTM D 2651-01 para aço carbono, item 9.2.2 por

5 minutos, Figura 38. Em seguida, os substratos foram lavados em água deionizada com pH 7, conforme ASTM D 4262-05 (item A1.1) e levados a estufa para secagem onde permanecem por 30 min, a temperatura de 30°C.

Figura 38 - Imersão dos substratos em solução ácido nítrico-fosfórica.



Fonte: O Autor, 2013.

Figura 39 - Controle do pH da água deionizada para lavagem das chapas.



Fonte: O Autor, 2013.

Posteriormente, novas amostras foram separadas para reavaliação da rugosidade pós-ataque químico. Foram encontrados os seguintes níveis médios de rugosidade: $102 \pm 18,6 \mu\text{m}$; $103 \pm 17,5 \mu\text{m}$; e $85,4 \pm 6,4 \mu\text{m}$. Nota-se em relação aos resultados de rugosidade obtidos antes do ataque químico, diferença pouco significativa, menor que $\pm 5\%$.

O APÊNDICE-A fornece informações mais detalhadas sobre as amostras analisadas e o respectivo lote de juntas coladas com cada lote tratado superficialmente.

5.6 Procedimento de colagem

A seguir é descrito o procedimento de colagem das juntas bem como as características pertinentes a utilização do gabarito de colagem. O adesivo com coloração laranja, presente nas imagens a seguir, é meramente ilustrativo, usado para fins didáticos.

Com o objetivo de garantir repetibilidade aceitável, foi utilizado o gabarito de colagem, Figura 40, capaz de manter constantes as dimensões, geometrias e alinhamento das juntas. Este possibilita a fabricação de lotes com dez juntas por etapa de colagem, todas de acordo com as tolerâncias estabelecidas pela ASTM D 1002.

O procedimento de colagem foi realizado em ambiente com temperatura e umidade controladas. A Tabela 3 apresenta as condições climáticas necessárias para a execução do processo de colagem dos corpos de prova de acordo com a norma ASTM E 337.

Tabela 3 - Condições climáticas durante a etapa de colagem das juntas

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

Fonte: ASTM E 337, 1996.

Inicialmente, para a colagem das juntas, independente se utilizado o adesivo Multi-Metall ou Fusor, foi utilizada a condição 2 descrita na Tabela 3, com temperatura média de $22 \pm 1,5$ °C, umidade de $67 \pm 7\%$ e tempo de trabalho de 12 ± 3 minutos. Posteriormente, devido a uma incompatibilidade verificada para adesivo Fusor, foi necessário reajustar estas variáveis e reduzir as tolerâncias apenas para este último adesivo, processando-o a $25 \pm 0,2$ °C, com umidade relativa de $60 \pm 9\%$ e tempo de trabalho de 5 ± 1 minutos. Detalhes complementares sobre a incompatibilidade do adesivos às condições de colagem podem ser encontrada na seção 6.1.2. A Tabela A.4 do APÊNDICE-A apresenta informações específicas sobre temperatura, umidade e tempo de trabalho em relação a cada lote de junta de cisalhamento fabricada.

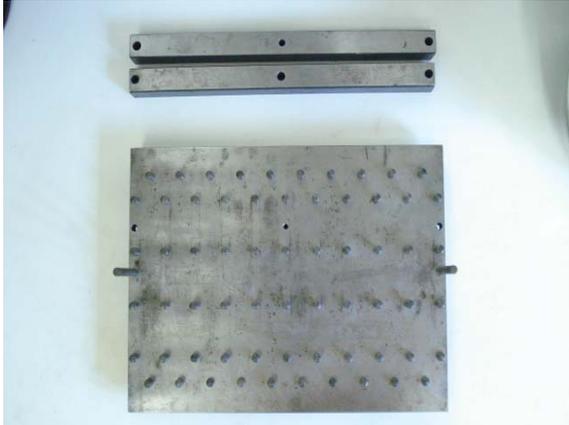
5.6.1 Etapas da colagem

O gabarito de colagem tem sua base constituída por uma placa metálica espessa e pinos guias distribuídos em sua superfície de maneira a distribuir dez juntas alinhadas lateralmente, Figura 40. Chapas com espessuras variáveis puderam ser selecionadas para controlar a espessura da camada adesiva na junta, Figura 41, agindo como batentes entre os substratos. A espessura da camada adesiva foi dada pela diferença entre a espessura do batente e a do substrato.

O batente utilizado possui espessura de 2,0 mm e o substrato, 1,5 mm logo, a espessura teórica da camada adesiva foi de 0,5 mm. A Tabela 4, mais à frente, apresenta os

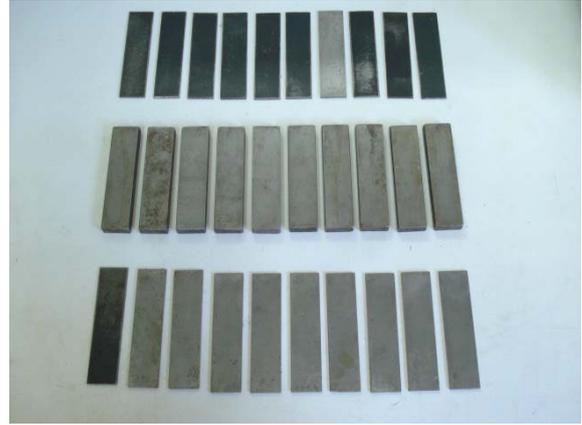
resultados das dimensões físicas da junta medida com paquímetro e micrômetro depois de concluído o procedimento de colagem.

Figura 40 - Base do gabarito para colagem das juntas de cisalhamento



Fonte: O Autor, 2013.

Figura 41 - Chapas para controle de espessura.



Fonte: O Autor, 2013.

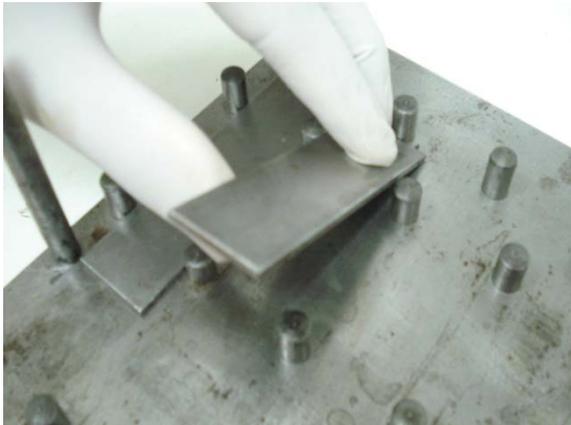
Antes de se iniciar cada etapa de colagem, foi realizada a limpeza do gabarito, acessórios e ferramentas com álcool etílico hidratado.

A colagem das juntas foi iniciada pelo posicionamento dos dez batentes de espessura do adesivo distribuídos no gabarito como mostrado na Figura 42.

Em seguida, foram misturados os compostos do adesivo nas proporções indicadas pelo fabricante com descrito na Tabela 1 ou Tabela 2, de acordo com o adesivo a ser utilizado.

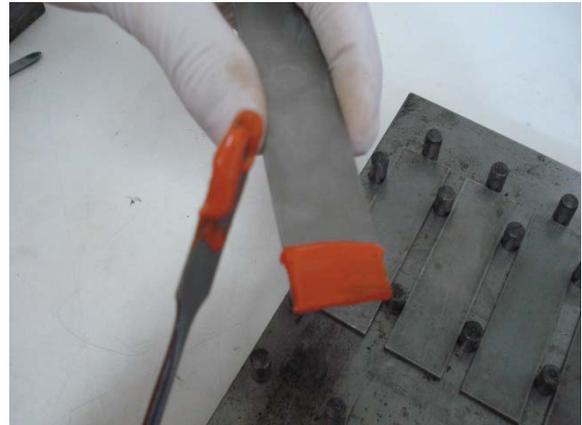
O adesivo foi aplicado sobre cada substrato com o auxílio de uma espátula como mostrado na Figura 43.

Figura 42 - Posicionamento da chapa de controle de espessura;



Fonte: O Autor, 2013.

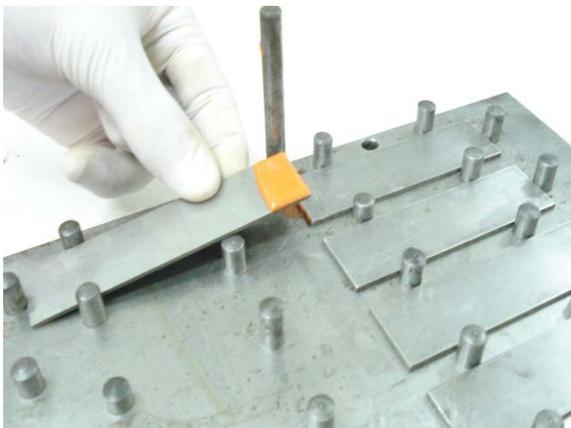
Figura 43 - Aplicação de adesivo ao substrato;



Fonte: O Autor, 2013.

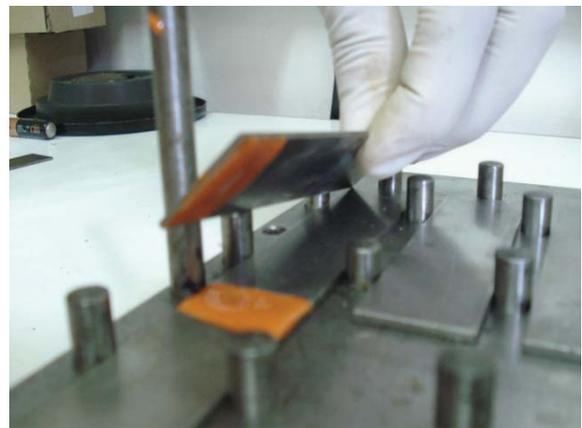
O substrato, com o adesivo, foi posicionado como mostrado na Figura 44. O segundo substrato foi posicionado sobre a chapa batente como mostrado na Figura 45, já com o adesivo previamente aplicado.

Figura 44 - Posicionamento do primeiro substrato.



Fonte: O Autor, 2013.

Figura 45 - Posicionamento do segundo substrato



Fonte: O Autor, 2013.

Em seguida, foi removido o excesso de adesivo conforme a Figura 46.

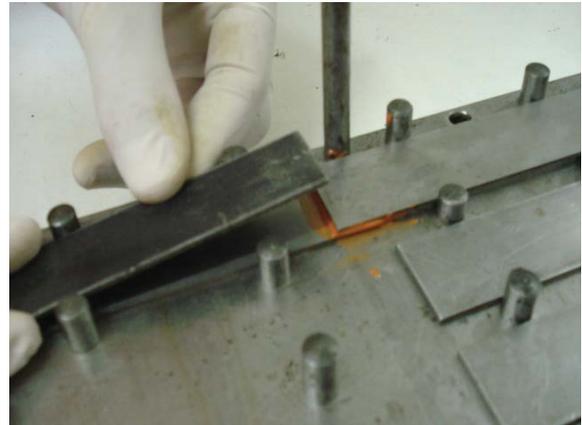
Posicionou-se a segunda chapa para controle de espessura do adesivo como mostrado na Figura 47.

Figura 46 - Remoção do adesivo residual



Fonte: O Autor, 2013.

Figura 47 - Posicionamento da segunda chapa de controle de adesivo



Fonte: O Autor, 2013.

O processo foi repetido para as nove juntas subsequentes. A Figura 48 mostra o gabarito com as dez juntas posicionadas corretamente.

Em seguida, posicionou-se, sobre a região colada da junta, as barras de distribuição de carga do contrapeso, mostrado na Figura 49, para posterior colocação das barras de contrapeso como mostradas na Figura 50.

Figura 48 - Base principal montada com dez juntas;



Fonte: O Autor, 2013.

Figura 49 - Posicionamento das barras de apoio do contrapeso.



Fonte: O Autor, 2013.

Após completamente montado, o gabarito contendo as dez juntas, foi colocado em estufa para a etapa de cura do adesivo. A temperatura foi ajustada em 40°C e as juntas permaneceram nesse ambiente por um período de 24 horas. Na etapa seguinte, as juntas foram submetidas a processo de desbastamento mecânico para remoção do excesso de adesivo, já endurecido, em torno da região do *overlap*.

Figura 50 - Posicionamento das barras contrapeso; Figura 51 - Corpos de prova colocados na estufa;



Fonte: O Autor, 2013.



Fonte: O Autor, 2013.

Seguindo a metodologia de seleção amostral descrita na seção 5.4, foram selecionados os corpos de prova para controle das dimensões da junta, principalmente a dimensão de espessura da camada adesiva. A Tabela 4 apresenta os valores encontrados e suas variações.

Tabela 4 - Condições finais das juntas após a colagem;

Comprimento total [mm]	Largura [mm]	Comprimento do <i>overlap</i> [mm]	Espessura do adesivo [mm]
189,8 ($\pm 0,3$)	25,4 ($\pm 0,1$)	13 ($\pm 0,1$)	0,5 ($\pm 0,1$)

Fonte: O Autor, 2013.

Enquanto aguardavam para serem ensaiados, os corpos de provas foram mantidos em estufa a 40°C para evitar a oxidação dos substratos.

5.6.2 Código de rastreabilidade das juntas

Cada junta foi marcada com um código de rastreabilidade. Todas as informações relacionadas ao cp, como condições de preparo e ensaio da junta foram documentadas e estão atreladas ao código registrado na junta.

O código é composto por três grupos de caracteres que podem conter letras e algarismos, separados por pontos. O primeiro grupo informa qual o projeto o corpo de prova

pertence, representado pelo número 8 na Figura 52. O segundo grupo, iniciado pela letra “E” seguida de um número, representa o lote o qual o corpo de prova foi fabricado. E o terceiro grupo, composto de apenas números, representa o índice do corpo de prova dentro do lote.

Figura 52 - Código de rastreabilidade dos corpos de prova;



Fonte: O Autor, 2013.

Todos os corpos de prova produzidos receberam o mesmo código de identificação em ambos os substratos para que futuramente pudessem ser rastreados, mesmo após da fratura.

5.7 Metodologia de montagem das juntas de cisalhamento no EPF

Para montagem da junta no par de garras, removem-se as garras do equipamento pela retirada dos dois pinos de fixação e efetua-se a montagem sobre uma bancada plana. Utilizando um suporte com altura adequada, centraliza-se a junta em relação ao meio da garra (Figura 53) e em seguida, ajusta-se o comprimento da extremidade da junta que deverá estar fixado no interior da garra. De acordo com a norma ASTM D 1002, o comprimento da junta preso às garras deve ser de 25 mm. Para garantir o mesmo comprimento de travamento em todas as juntas, linhas, na distância indicada, devem ser trançada nas juntas para servirem de referência no momento da montagem (Figura 54). Em seguida, apertam-se os parafusos e o conjunto está pronto para ser fixado à unidade de ensaio.

Figura 53 - Alinhamento das juntas nas garras de fixação



Fonte: O Autor, 2013.

Figura 54 - Corpo de prova fixado às garras



Fonte: O Autor, 2013.

A garra superior, presa à estrutura do equipamento, conta com ajuste de altura. O cilindro pneumático tem deslocamento máximo de 50 mm. No momento da montagem do corpo de prova na unidade de ensaio, ajusta-se a altura da garra superior para adequar-se ao comprimento do corpo de prova de maneira que seja necessário erguer a haste do cilindro para

transpassar o pino de acoplamento entre a garra do cilindro e a garra do corpo de prova. Nesta condição, o cilindro terá curso suficiente para recuar quando houver a ruptura do corpo de prova e pausar a contagem do tempo, Figura 55.

Figura 55 - Montagem do corpo de prova na unidade de ensaio.



Fonte: O Autor, 2013.

Figura 56 - Equipamento preparado para o ensaio de dez juntas de cisalhamento.



Fonte: O Autor, 2013.

5.8 Metodologia para calibração do equipamento pneumático de fluência (EPF)

O sistema pneumático do EPF permite realizar a calibração das unidades de ensaio por meio da comparação entre a curva de pressão desejada, pré-ajustada no manômetro principal, e a registrada por cada unidade de ensaio. Desta forma é possível quantificar uma possível diferença no carregamento das juntas devido a características específicas a unidade de ensaio, e ajustar os resultados em função do erro associado a cada uma delas.

Os ensaios de calibração foram realizados para as pressões de 1 a 6 bar em intervalos de 1 bar. A Tabela 5 mostra os resultados obtidos.

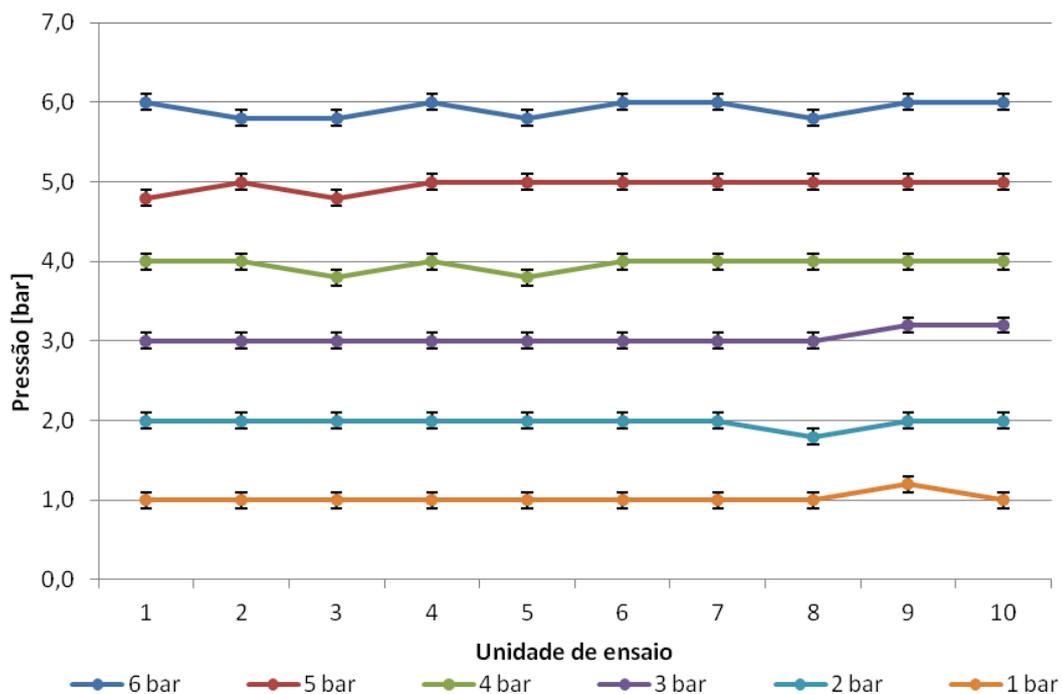
Tabela 5 - Calibração do Equipamento Pneumático de Fluência

Unidades de ensaio	Pressão ajustada no manômetro principal [bar]					
	6	5	4	3	2	1
<u>1</u>	6,0	4,8	4,0	3,0	2,0	1,0
<u>2</u>	5,8	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0
<u>3</u>	5,8	4,8	3,8	3,0	2,0	1,0
<u>4</u>	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0
<u>5</u>	5,8	5,0	3,8	3,0	2,0	1,0
<u>6</u>	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0
<u>7</u>	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0
<u>8</u>	5,8	5,0	4,0	3,0	1,8	1,0
<u>9</u>	6,0	5,0	4,0	3,2	2,0	1,2
<u>10</u>	6,0	5,0	4,0	3,2	2,0	1,0
Média:	<u>5,9</u>	<u>5,0</u>	<u>4,0</u>	<u>3,0</u>	<u>2,0</u>	<u>1,0</u>
Desv. Padrao [%]	<u>1,6</u>	<u>1,6</u>	<u>2,0</u>	<u>2,7</u>	<u>3,0</u>	<u>6,0</u>

Fonte: O Autor, 2013.

É possível observar um aumento do desvio padrão percentual acompanhando a redução da pressão. Este fato ocorre devido à resolução do instrumento de medição. Quanto menor a pressão, maior será a influência da resolução do equipamento nas incertezas dos resultados. Por exemplo, para a pressão de 1 bar, a variação na leitura do instrumento correspondente a resolução do manômetro seria de 20% de incerteza, já para 6 bar, a resolução corresponderia a um erro de 3,3%.

Figura 57 - Curvas de calibração do EPF. Pressão registrada por unidade de ensaio.



Fonte: O Autor, 2013.

Analisando a Figura 57, é possível observar que todas as unidades de ensaio apresentam comportamento semelhante, com desvio padrão na ordem de 6%, ou seja, não há diferença considerável que permita concluir que o carregamento aplicado às juntas seja diferente entre as unidades de ensaio para uma mesma pressão.

5.9 Metodologia para determinação das tensões médias de ruptura das juntas

A tensão média de ruptura das juntas, a τ_u , foi obtida através de ensaios de tração realizados no EPF em juntas de cisalhamento fabricadas segundo a norma ASTM D 1002.

As junta foram testada na velocidade de 23,6 kPa/s estabelecida na seção 5.10, com temperatura ambiente de 20°C, temperatura esta mantida constante pelo climatizador da sala de teste. Concluído o ensaio em uma das dez unidades do equipamento, esta era despressurizada e em seguida, o próximo ensaio era iniciado na unidade seguinte.

Os resultados encontrados foram utilizados como referência para a determinação da τ_u característica das juntas coladas com um determinado adesivo. Cada τ_u determinada passa a representar 100% do carregamento admitido pela junta.

Já na etapa final dos testes em fluência, novos ensaios de ruptura foram realizados na máquina de ensaio universal AG-X plus da SHIMADZU do Laboratório de Mecânica Teórica Aplicada (LMTA) da Universidade Federal Fluminense (UFF-Niteroi). Os resultados encontrados puderam ser comparados como os obtidos inicialmente através do EPF.

A principal diferença entre os testes realizados em ambos os equipamentos foi a velocidade. Os ensaios na SHIMADZU foram realizados numa velocidade seis vezes maior do que no EPF, de acordo com a norma ASTM D 1002.

5.10 Metodologia para determinação da velocidade de ensaio no EPF

Segundo a norma ASTM D 1002 a velocidade para ensaio de tração em juntas de cisalhamento seria entre 80 a 100 kgf/cm² por minuto, equivalente 8 a 10 MPa/min ou , do ponto de vista do deslocamento, 1,3 mm/min.

A velocidade prevista na norma equivaleria a incrementos de 0,2 bar a cada 5 segundos, isto é, 142 kPa/s. Testes iniciais mostraram que este intervalo de tempo não era suficiente para ajustar a pressão manualmente, estabilizar a tensão no corpo de prova e coletar a pressão de ruptura do cp.

Numa segunda tentativa, cinco corpos de prova, compondo o grupo de CP's G1, foram ensaiados na velocidade nominal de 71,0 kPa/s, ou seja, incrementos de 0,2 bar a cada 10 segundos. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Grupo G1. Adesivo Multi-Metall - Resultados para tensões de ruptura das juntas de cisalhamento ensaiadas a velocidade de 71,0kPa/s

Unidade de ensaio	Corpo de prova	Pressão de Ruptura [bar]	Tensão de ruptura [Mpa]	Tempo [s]	Taxa de aplicação de pressão [bar/min]	Taxa de aplicação de tensão [kPa/s]
1	38.E01.01	2,8	9,9	120,0	1,20	71,0
2	38.E01.02	3,0	10,7	180,0	0,87	51,3
3	38.E01.03	4,0	14,2	165,0	1,31	77,5
4	38.E01.04	3,4	12,1	135,0	1,33	78,9
5	38.E01.05	4,0	14,2	200,0	1,08	63,9
Média:	G1	3,4	12,2	160,0	1,16	68,5
Desvio padrão [%]:	G1	14,4	14,4	18,2	14,77	14,8

Fonte: O Autor, 2013.

Analisando os resultados, foi possível observar que a τ_u encontrada foi de 12,2 MPa, com desvio padrão de 14,4% e que a taxa de aplicação de tensão teve desvio padrão de 14,8%.

Foi observado que, apesar de reduzir a velocidade à metade do valor inicial, os problemas relacionados à manipulação do equipamento e coleta de dados permaneciam. Baseado neste fato e na dimensão dos desvios padrão apresentados até o momento, manter uma taxa relativamente alta acarretaria no somatório de erros ao longo dos testes que poderiam interferir consideravelmente nos resultados finais.

Outro fato importante está associado ao tipo de ensaio desejado, no caso, ensaio estático. Este tipo de ensaio tem como característica principal pequenas taxas de carregamento, desta forma, na prática é possível considerarmos que em cada instante, até o momento de ruptura das juntas, os corpos de prova estiveram sob carregamento estático.

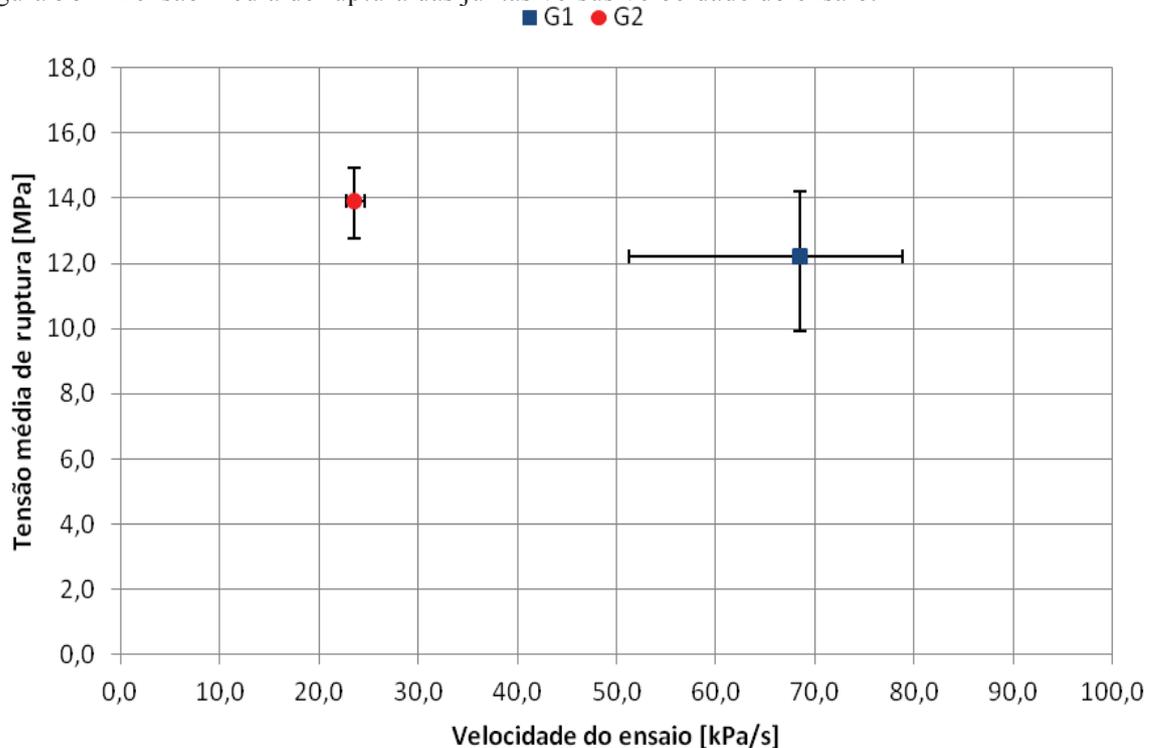
Outros cinco corpos de provas, compondo o grupo G2, foram ensaiados a uma taxa de carregamento menor, 23,6 kPa/s, ou seja, 0,2 bar a cada 30 segundos, correspondente a aproximadamente, um sexto da velocidade indicada pela norma. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos. A Figura 58, possibilitam uma comparação direta na dispersão dos resultados entre os grupos G1 e G2, maior e menor velocidade respectivamente.

Tabela 7 - Grupo G2. Adesivo Multi-Metall - Resultados para tensões de ruptura das juntas de cisalhamento ensaiadas a velocidade de 23,6kPa/s

Unidade de ensaio	Corpo de prova	Pressão de Ruptura [bar]	Tensão de ruptura [Mpa]	Tempo [s]	Taxa de aplicação de pressão [bar/min]	Taxa de aplicação de tensão [kPa/s]
6	38.E01.06	4,0	14,2	535,0	0,40	23,9
7	38.E01.07	4,0	14,2	520,0	0,42	24,6
8	38.E01.08	4,2	14,9	585,0	0,39	23,1
9	38.E01.09	3,6	12,8	500,0	0,38	22,7
10	38.E01.10	3,8	13,5	515,0	0,40	23,4
Média:	G2	3,9	13,9	531,0	0,40	23,5
Desvio padrão [%]:	G2	5,2	5,2	5,5	2,76	2,8

Fonte: O Autor, 2013.

Figura 58 - Tensão média de ruptura das juntas versus velocidade do ensaio.



Fonte: O Autor, 2013.

Analisando os resultados mostrados na Figura 58 é possível notar claramente que o grupo G2, ensaiado com velocidade média de 23,5kPa/s, apresentou menor dispersão tanto para velocidade quanto para tensão de ruptura dos cp's. Também foi possível observar que, comparativamente, houve um aumento na tensão média de ruptura do grupo G1 para o G2, cerca de 13%.

Levando-se em consideração que ambos os grupos compõem um único lote de juntas fabricadas sob as mesmas condições, ficou evidente que a velocidade nominal de 23,6 kPa/s apresentava condições mais compatíveis a utilização do equipamento, visto a redução no desvio padrão, de 14,8% para 2,8%.

Com o propósito de validar esta velocidade, foi fabricado o lote “E.02”. Cinco juntas foram separadas aleatoriamente e ensaiadas no equipamento nas mesmas condições que as anteriores. A Tabela 8 apresenta os resultados.

Tabela 8 - Grupo G3 - Resultados para tensão média de ruptura das juntas, grupo G3.

Unidade de ensaio	Corpo de prova	Pressão de Ruptura [bar]	Tensão de ruptura [Mpa]	Tempo [s]	Taxa de aplicação de pressão [bar/min]	Taxa de aplicação de tensão [kPa/s]
1	38.E02.01	4,2	14,9	590,0	0,39	22,9
2	38.E02.02	4,2	14,9	570,0	0,40	23,7
3	38.E02.03	3,8	13,5	510,0	0,40	23,7
4	38.E02.04	4,2	14,9	560,0	0,41	24,1
5	38.E02.05	3,8	13,5	530,0	0,38	22,8
Média:	G3	4,0	14,3	552,0	0,40	23,4
Desvio padrão [%]:	G3	4,9	4,9	5,2	2,17	2,2

Fonte: O Autor, 2013.

O grupo G3 de resultados apresentou o mesmo padrão mostrado pelo grupo G2. Os desvios padrão da tensão média de ruptura e da velocidade de ensaio, e os valores absolutos da tensão média de ruptura, 14,3MPa e 13,9MPa são, aparentemente, os mesmos, confirmando a hipótese anterior. Foi possível agrupa-los em uma única tabela e obter a tensão média de ruptura das juntas coladas com adesivo Multi-Metall, Tabela 9.

Embora a velocidade de 23,6 kPa/s, estabelecida pelos resultados anteriores como a ideal para realização dos ensaios no EPF seja cerca de 6 vezes menor do que a indicada pela norma ASTM D 1002, desde que mantida constante em todos os testes, esse parâmetro não terá influência significativa nos resultados.

5.11 Metodologia para ensaios de fluência no EPF

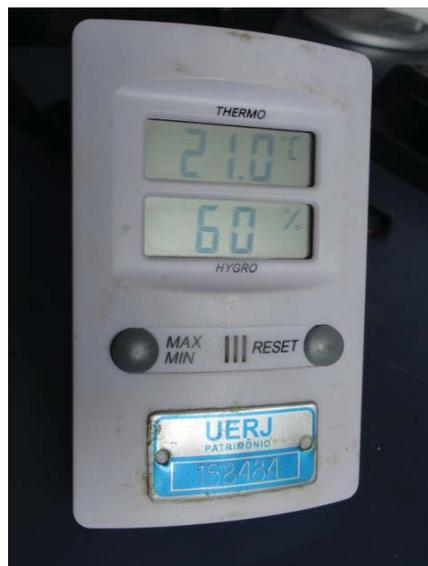
Depois de definida as tensões para realizar os ensaios de fluência, descrito na seção 6.1.1 e 6.1.2, foi necessário converter estes valores em valores de pressão a serem ajustadas no equipamento. Todas as juntas selecionadas para compor o grupo amostral referente a um nível específico de tensão foram montadas nas garras do equipamento seguindo a metodologia descrita na seção 5.7.

O carregamento foi aplicado simultaneamente em todos os corpos de prova. Para isso, cada unidade de ensaio sofreu incrementos de pressão igual 0,6 bar até alcançar a pressão desejada. Intervalos de tempo de no mínimo 1 minuto foram necessários para a

estabilização da carga. Os incrementos de pressão foram ajustados nas unidades de ensaio uma após a outra, sequencialmente, até que todas alcançassem a tensão desejada. Em seguida, monitorou-se a pressão por cinco minutos. Não havendo diferença entre a pressão desejada e a indicada no manômetro, os contadores de horas foram reiniciados para registro de duração dos ensaios.

Durante a execução dos testes, o equipamento foi mantido em uma sala climatizada como temperatura ambiente ajustada em 20°C. As condições ambientais foram monitoradas pelo termômetro digital mostrado na Figura 59, posicionado sobre o EPF durante todo o período de execução dos ensaios. O termômetro registrou o clima da sala em tempo integral, monitorando os valores máximos e mínimos tanto para temperatura quanto umidade.

Figura 59 - Termômetro digital. Registra níveis máximos e mínimos de temperatura e umidade relativa.



Fonte: O Autor, 2013.

A coleta dos dados era realizada em visitas semanais. Após cada coleta, o histórico de informações salvo pelo instrumento era apagado e um novo intervalo de monitoramento era iniciado. O APÊNDICE-B apresenta informações detalhadas sobre cada coleta realizada. Um gráfico representa o comportamento climático da sala durante todo o período de execução dos ensaios.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Tensões de ruptura das juntas, τ_u

6.1.1 Tensão média de ruptura das juntas coladas com adesivo MULTI-METALL

A Tabela 9 reúne os resultados que compõem o grupo amostral utilizado para determinação da τ_u referente aos ensaios de tração em juntas de cisalhamento coladas com o adesivo Multi-Metall testadas no EPF.

Tabela 9 - Grupo G4 - Grupo amostral para tensão de ruptura média do adesivo Multi-Metall

Unidade de ensaio	Corpo de prova	Pressão de Ruptura [bar]	Tensão de ruptura [Mpa]	Tempo [s]	Taxa de aplicação de pressão [bar/min]	Taxa de aplicação de tensão [kPa/s]
1	38.E02.01	4,2	14,9	590,0	0,39	22,9
2	38.E02.02	4,2	14,9	570,0	0,40	23,7
3	38.E02.03	3,8	13,5	510,0	0,40	23,7
4	38.E02.04	4,2	14,9	560,0	0,41	24,1
5	38.E02.05	3,8	13,5	530,0	0,38	22,8
6	38.E01.06	4,0	14,2	535,0	0,40	23,9
7	38.E01.07	4,0	14,2	520,0	0,42	24,6
8	38.E01.08	4,2	14,9	585,0	0,39	23,1
9	38.E01.09	3,6	12,8	500,0	0,38	22,7
10	38.E01.10	3,8	13,5	515,0	0,40	23,4
Média:	G4	4,0	14,1	541,5	0,40	23,5
Desvio padrão [%]:	G4	5,2	5,2	5,7	0,02	2,5

Fonte: O Autor, 2013.

O valor médio encontrado para τ_u foi de 14,1 MPa com desvio padrão de 5,2%.

6.1.2 Tensão média de ruptura das juntas coladas com adesivo FUSOR

Usando a mesma metodologia aplicada na colagem das juntas com o adesivo Multi-Metall, novos corpos de prova foram fabricados com adesivo Fusor. A principal característica observada durante a colagem das juntas foi a viscosidade do adesivo. O adesivo

Fusor possuía índice de fluidez muito mais alto quando comparado visualmente ao Multi-Metall. A Tabela 10 apresenta os resultados do primeiro ensaio realizado.

Tabela 10 - Grupo G5 - Resultados do ensaio de tração do primeiro lote do adesivo Fusor

Unidade de ensaio	Corpo de prova	Pressão de Ruptura [bar]	Tensão de ruptura [Mpa]	Tempo [s]	Taxa de aplicação de pressão [bar/min]	Taxa de aplicação de tensão [kPa/s]
1	38.E05.01	2,8	9,9	370,0	0,39	23,0
2	38.E05.02	3,4	12,1	430,0	0,42	24,8
3	38.E05.03	2,8	9,9	350,0	0,41	24,3
4	38.E05.04	3,6	12,8	500,0	0,38	22,7
5	38.E05.05	3,4	12,1	450,0	0,40	23,7
6	38.E05.06	2,2	7,8	270,0	0,40	23,7
7	38.E05.07	3,2	11,4	410,0	0,41	24,2
8	38.E05.08	4,0	14,2	560,0	0,39	22,8
9	38.E05.09	3,4	12,1	450,0	0,40	23,7
10	38.E05.10	3,8	13,5	510,0	0,40	23,7
Média:	G5	3,3	11,6	430,0	0,40	23,7
Desvio padrão [%]:	G5	15,5	15,5	18,7	2,68	2,7

Fonte: O Autor, 2013.

Analisando os dados acima, foi possível notar que, embora a velocidade de ensaio tenha sido mantida constante em 23,6 kPa/s, ainda houve dispersão considerável nos resultados. A τ_u estabelecida inicialmente, baseada nos dados da Tabela 10, foi de 11,6 MPa com desvio padrão de 15,5%. Desvio este bem maior que o encontrado para o adesivo Multi-Metal, Tabela 9.

Uma investigação preliminar, baseada no boletim técnico do adesivo e no procedimento de colagem adotado, mostrou que parâmetros como: temperatura e tempo de trabalho do adesivo, os mesmos adotados para as colagens com o adesivo Multi-Metall, deveriam ser diferentes para o adesivo Fusor. A temperatura ambiente da sala de colagem deveria passar de 22°C para 25°C e o tempo de trabalho, intervalo de tempo entre o término da mistura dos compostos do adesivo e a finalização da colagem das dez juntas, deveria ser de no máximo 5 minutos. Ajustados esses parâmetros, um novo lote foi fabricado e ensaiado no equipamento de fluência. A Tabela 11 apresenta os resultados do grupo G6 ensaiado.

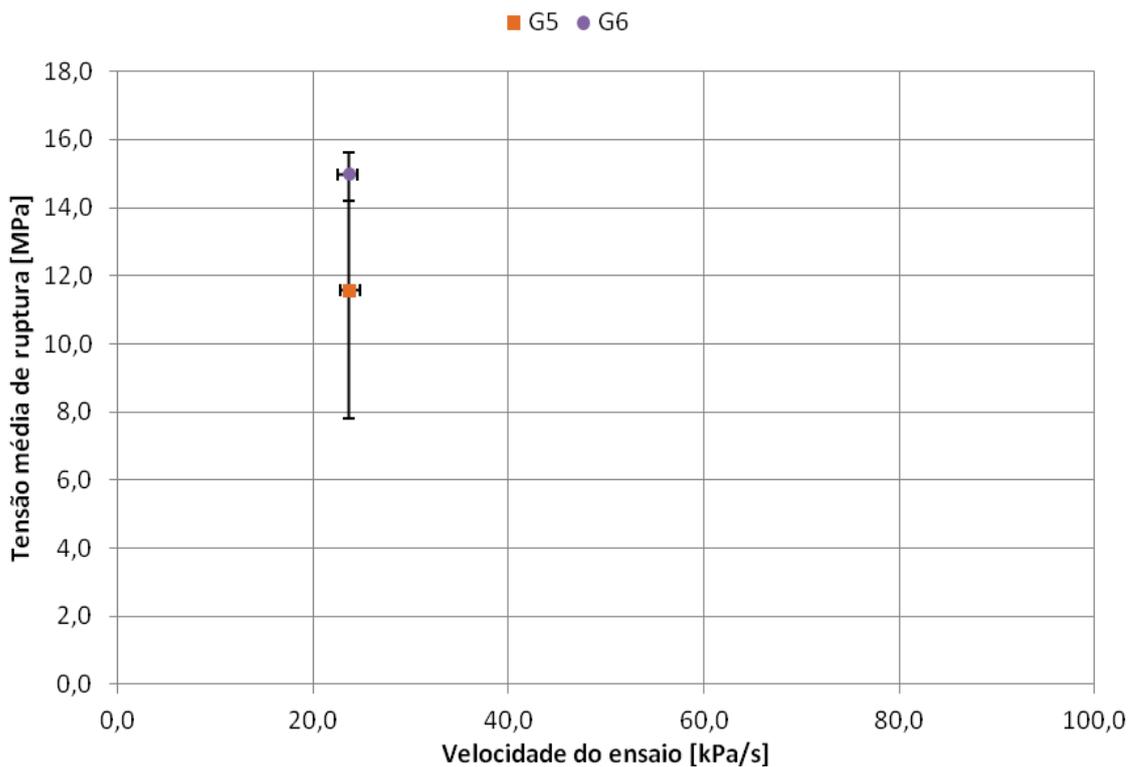
A análise dos dados permitiu comprovar que a correção da temperatura e tempo de trabalho do adesivo durante a colagem interferiu positivamente nos resultados. Além da redução no desvio padrão de 15,5% para 3,9%, houve aumento de 30% na tensão média de ruptura das juntas, elevando a τ_u encontrada para 15,0 MPa. A Figura 60 possibilita uma percepção visual da redução do desvio padrão e do aumento da τ_u .

Tabela 11 - Grupo G6 - Resultados do ensaio de tração do segundo lote do adesivo Fusor

Unidade de ensaio	Corpo de prova	Pressão de Ruptura [bar]	Tensão de ruptura [Mpa]	Tempo [s]	Taxa de aplicação de pressão [bar/min]	Taxa de aplicação de tensão [kPa/s]
1	38.E06.01	4,4	15,6	620,0	0,39	22,9
2	38.E06.02	4,4	15,6	610,0	0,39	23,3
3	38.E06.03	4,2	14,9	555,0	0,41	24,3
4	38.E06.04	4,2	14,9	565,0	0,40	23,9
5	38.E06.05	4,0	14,2	520,0	0,42	24,6
6	38.E06.06	4,4	15,6	600,0	0,40	23,7
7	38.E06.07	4,0	14,2	535,0	0,40	23,9
8	38.E06.08	4,2	14,9	570,0	0,40	23,7
9	38.E06.09	4,4	15,6	630,0	0,38	22,5
10	38.E06.10	4,0	14,2	535,0	0,40	23,9
Média:	G6	4,2	15,0	574,0	0,40	23,7
Desvio padrão [%]:	G6	3,9	3,9	6,4	0,02	2,5

Fonte: O Autor, 2013.

Figura 60 - Comparação entre a dispersão dos resultados para tensão de ruptura entre os grupos G5 e G6.



Fonte: O Autor, 2013.

A grande variação na resistência mecânica associada ao ajuste dos procedimentos mencionados anteriormente demonstra a extrema sensibilidade do comportamento das juntas à pequenas variações no processo de colagem, comprovando o quão delicado e importante é o controle das variáveis nesta etapa no projeto de juntas coladas.

O tratamento estatístico dos resultados consistiu em dividir o lote amostral G6 em dois grupos, G6-p1 e G6-p2, contendo cinco resultados cada, apresentados na Tabela 12. A análise dos resultados mostrou que qualquer um dos subgrupos é capaz de representar o grupo amostral G6, apresentando aparentemente os mesmos desvios padrão e as mesmas tensões médias de ruptura, ou seja, a ruptura de apenas cinco juntas seria suficiente para alcançar níveis estatísticos aceitáveis na determinação da τ_u do lote em questão.

Tabela 12 - Subdivisão do grupo G6 em dois grupos com cinco resultados

Unidade de ensaio	Corpo de prova	Pressão de Ruptura [bar]	Tensão de ruptura [Mpa]	Tempo [s]	Taxa de aplicação de pressão [bar/min]	Taxa de aplicação de tensão [kPa/s]
1	38.E06.01	4,4	15,6	620,0	0,39	22,9
2	38.E06.02	4,4	15,6	610,0	0,39	23,3
3	38.E06.03	4,2	14,9	555,0	0,41	24,3
4	38.E06.04	4,2	14,9	565,0	0,40	23,9
5	38.E06.05	4,0	14,2	520,0	0,42	24,6
Média:	G6 - p1	4,2	15,1	574,0	0,40	23,8
Desvio padrão [%]:	G6 - p1	3,5	3,5	6,4	2,62	2,6
6	38.E06.06	4,4	15,6	600,0	0,40	23,7
7	38.E06.07	4,0	14,2	535,0	0,40	23,9
8	38.E06.08	4,2	14,9	570,0	0,40	23,7
9	38.E06.09	4,4	15,6	630,0	0,38	22,5
10	38.E06.10	4,0	14,2	535,0	0,40	23,9
Média:	G6 - p2	4,2	14,9	574,0	0,40	23,5
Desvio padrão [%]:	G6 - p2	4,3	4,3	6,5	2,15	2,1

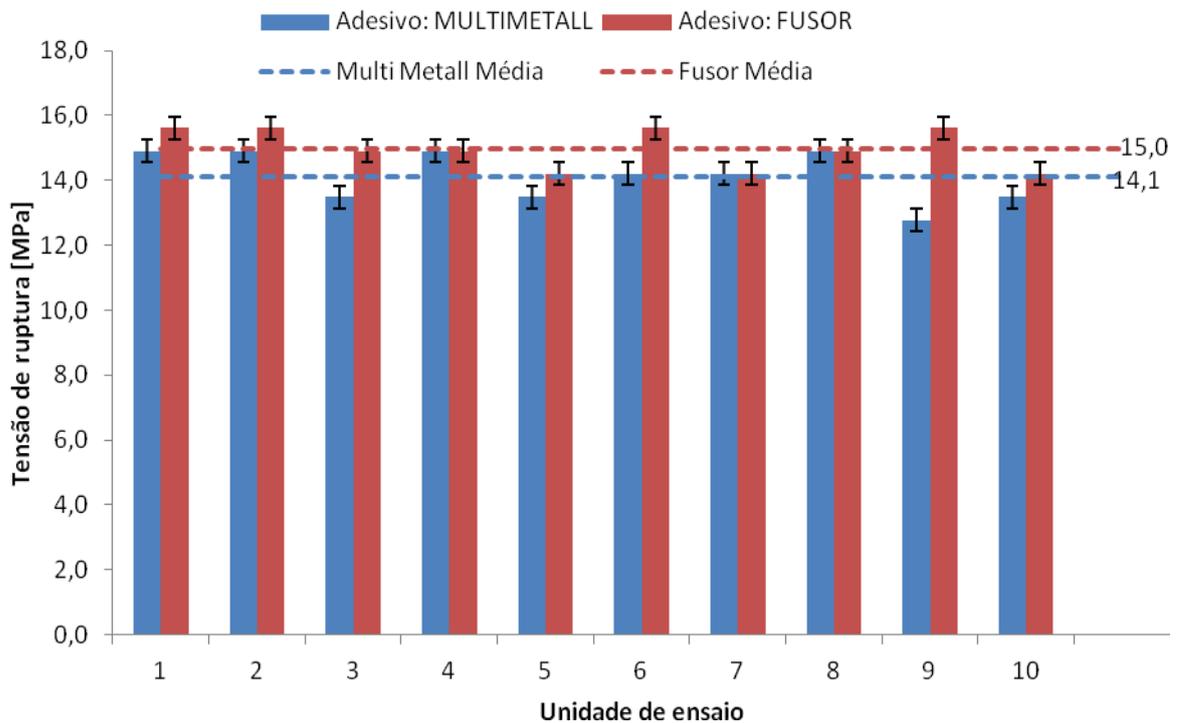
Fonte: O Autor, 2013.

Com base nos dados apresentados na Tabela 11, obtidos através dos ensaios de tração realizados no EPF, foi estabelecida a tensão de 15,0 MPa com desvio padrão de 3,9% como a τ_u das juntas coladas com adesivo Fusor.

6.1.3 Comparação entre as tensões de rupturas das juntas para cada tipo de adesivo

A Figura 61 permite a comparação gráfica entre as tensões de ruptura obtidas em cada unidade de ensaio do EPF, tanto para o adesivo Multi-Metall quanto para o adesivo Fusor. Os limites associados a cada resultado estão relacionados à resolução de leitura da pressão na unidade de ensaio do equipamento e correspondem a tolerância de $\pm 0,35$ MPa na tensão de ruptura das juntas.

Figura 61 - Gráfico de resultados para tensão de ruptura média, τ_u , de cada adesivo.



Fonte: O Autor, 2013.

Foi possível observar que a tensão de ruptura alcançada pelo adesivo Fusor é ligeiramente maior que a do Multi-Metall, cerca de 7%.

6.2 Ensaios de Fluência

Utilizando como referência as τ_u 's obtidas para o adesivo Multi-Metall e Fusor, foram selecionadas tensões menores para a realização dos ensaios de fluência. Por exemplo, para as juntas coladas com o adesivo Multi-Metall, a τ_u estabelecida pelos ensaios no EPF foi de 14,1 MPa, logo, a tensão correspondente aos 90% da τ_u , prevista no planejamento experimental seção 4.3, foi de 12,8 MPa.

Seguindo o padrão decrescente, testes subsequentes em tensões menores foram realizados e os tempos de duração registrados. Para cada tensão foram ensaiados no mínimo três corpos de prova. A média de tempo do grupo de resultados correspondente a cada nível de tensão representa o tempo de vida da junta em função do carregamento estático aplicado.

A seção 6.5 trata os resultados dos ensaios de fluência de forma adimensional, mostrando o percentual correspondente à τ_u de cada ensaio realizado e permitindo avaliar a relação entre o comportamento em fluência e a tensão média de ruptura das juntas, τ_u .

6.2.1 Ensaio de fluência das juntas coladas com adesivo MULTI-METALL

Seguindo a metodologia para ensaio em fluência descrita na seção 5.11, foram iniciados os teste em fluência em cinco corpos de prova colados com o adesivo Multi-Metall na tensão de 12,8 MPa. Neste nível de tensão, todas as juntas falharam próximo ao término do processo de carregamento dos corpos de prova levando a crer que, possivelmente, o tempo de vida das juntas neste nível de carga fosse menor que 15 minutos.

Novas juntas foram testadas nas seguintes tensões: 11,4 MPa; 9,9 MPa e 8,5 MPa.

A Tabela 13 apresenta os tempos médios de vida encontrados para cada nível de tensão em fluência. A tensão de 14,1 MPa corresponde a τ_u estabelecida através do EPF.

Tabela 13 - Resultado dos ensaios de fluência para o adesivo Multi-Metall

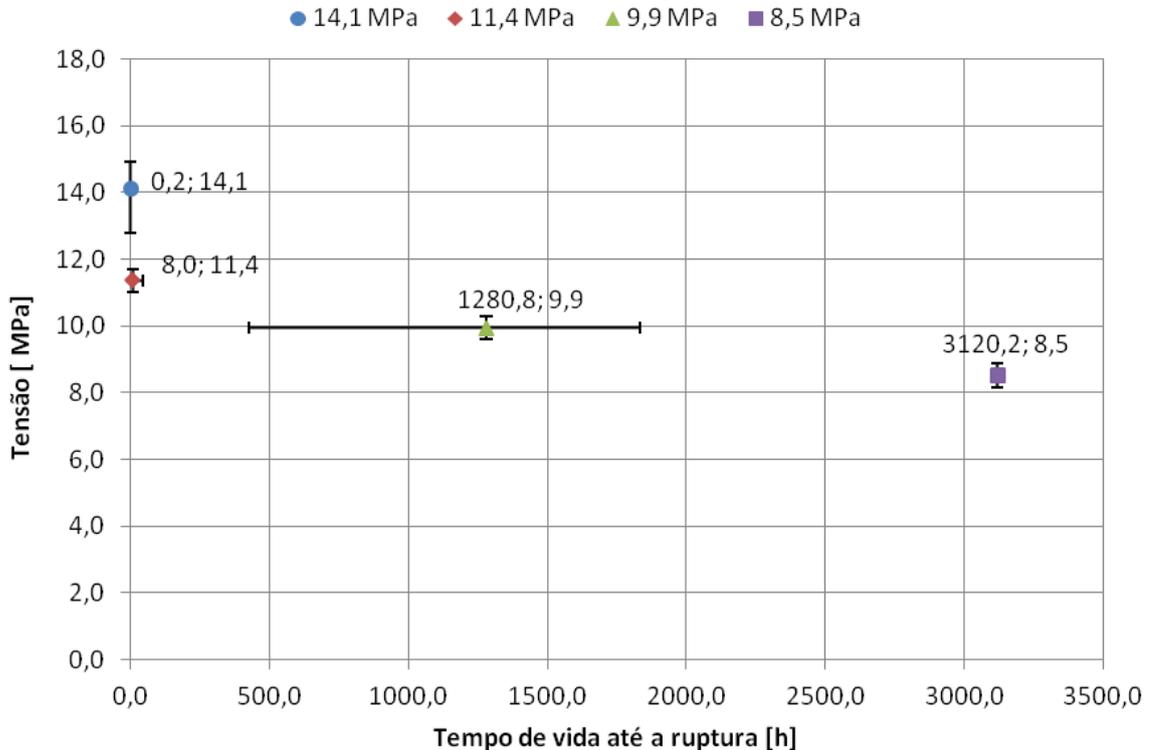
Tensão [MPa]		Tempo até a ruptura [horas]	
Média	Desvio padrão %	Média	Desvio padrão %
14,1	5,2	0,2	5,5
11,4	0,0	8,0	169,7
9,9	0,0	1280,8	47,8
8,5	0,0	2334,0	0,0

Fonte: O Autor, 2013.

A Figura 62, gráfico dos dados referente a Tabela 13, permite avaliar em escala cartesiana o tempo de vida das juntas até a ruptura em função do nível de tensão aplicada.

De acordo com a literatura, ensaios em função do tempo têm como característica comum grandes desvios padrão. Na Tabela 13, os testes realizados a 11,4 MPa apresentaram desvios padrão na ordem de 170%, porém, foi possível observar que o maior tempo de vida foi de 42,5 horas, período irrisório quando se deseja manter unidos componentes durante um longo prazo. Logo, a maior dispersão de dados ocorreu numa região de pouco interesse e por tal motivo não foi investigado.

Figura 62 - Tensão versus tempo médio de vida das juntas de cisalhamento coladas com adesivo Multi-Metall.



Fonte: O Autor, 2013.

Em relação à hipótese inicial sobre a tensão de 12,8 MPa, após o término dos teste nas demais tensões, foi possível estimar, por meio da técnica de interpolação linear, que o tempo de vida esperado nesta tensão seria inferior a 0,2 horas, mais precisamente, 12 minutos, confirmado a suspeita inicial de que o tempo médio de vida seria menor que 15 minutos.

Os ensaios realizados a 9,9 MPa apresentaram padrão comportamental diferente. Observou-se expressivo aumento no tempo de vida das juntas, passando de 8 horas para 1280,8 horas em média. Os corpos de prova: 03.02 e 03.03 tiveram o ensaio interrompido em 2500 horas, não apresentando ruptura e por tal motivo não fizeram parte do grupo representativo para o cálculo do tempo médio de vida das juntas até a ruptura.

A análise dos resultados no intervalo de 14,1 MPa a 9,9 MPa indicou a presença de duas regiões com inclinação distintas. O intervalo entre 14,1 MPa e 11,4 MPa, apresentou acentuada inclinação negativa, indicando alta taxa de redução de resistência mecânica em tensões mais próxima da τ_u das juntas. O intervalo entre 11,4 MPa e 9,9 MPa, apresentou pequena taxa de redução de resistência mecânica, indicando tendência de estabilização da curva entorno do nível de tensão de 9,9 MPa, esta tendência foi reforçada pelo fato de duas juntas terem o ensaio interrompido com 2500 horas não apresentando fratura. Logo, a região

primária apresenta alta resistência da junta, porém durante períodos extremamente pequenos. A região secundária é caracterizada por resistência mediana, porém, durante períodos maiores de tempo.

Os ensaios correspondentes a tensão de 8,5 MPa ainda encontra-se em andamento e os resultados parciais mostram tendência de se ultrapassar períodos de 3500 horas sem apresentar ruptura de qualquer um dos corpos de prova.

6.2.1.1 Comentários: Problemas e Soluções – Multi-Metall

Durante os testes das juntas na tensão de 8,5MPa, com duração de ensaio registrada de até 1127 horas, houve ruptura de cinco corpos de prova. Fato observado durante uma visita de monitoramento dos ensaios.

Também foi observado problemas no fornecimento de ar na linha de alimentação conectada ao equipamento. Em inspeção técnica à casa de máquinas, foram comprovados problemas relacionados ao compressor que impediram o seu funcionamento. Conseqüentemente, devido a vazamentos não controlados ao longo da linha de ar, houve queda de pressão no sistema pneumático do EPF.

A Tabela 14 e Tabela 15 apresentam os dados relativos à duração dos ensaios coletados em duas visitas de monitoramento, anterior e posterior ao incidente.

Tabela 14 - Monitoramento realizado em visita anterior ao incidente, 17/07/2012.

Unidades de ensaio	Corpo de prova	Tensão [Mpa]	Atualizado [dd/mm/aa]:	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]
6	38.E03.07	8,5	17/07/2012	20,0	62,5	115,0
7	38.E03.06	8,5	17/07/2012	20,0	62,5	501,7
8	38.E03.08	8,5	17/07/2012	20,0	62,5	1005,9
9	38.E03.09	8,5	17/07/2012	20,0	62,5	1005,9
10	38.E03.05	8,5	17/07/2012	20,0	62,5	115,0

Fonte: O Autor, 2013.

Tabela 15 - Monitoramento realizado em visita posterior ao incidente, 23/07/2012.

Unidades de ensaio	Corpo de prova	Tensão [Mpa]	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]
6	38.E03.07	10,0	23/07/2012	20,2	61,0	237,0
7	38.E03.06	10,0	23/07/2012	20,2	61,0	623,7
8	38.E03.08	10,0	23/07/2012	20,2	61,0	1127,9
9	38.E03.09	10,0	23/07/2012	20,2	61,0	1127,9
10	38.E03.05	10,0	23/07/2012	20,2	61,0	237,1

Fonte: O Autor, 2013.

Em análise investigativa baseada nos dados apresentados nas tabelas anteriores, foi possível determinar o momento de fratura de cada junta. Surpreendentemente, todos os corpos de prova romperam 122 horas após a última coleta de dados realizada em condições normais, ou seja, romperam exatamente no mesmo instante.

O relato de técnicos responsáveis pela manutenção do compressor indicou que o funcionamento anormal do equipamento deveria ter iniciado entre 72 e 96 horas após a visita ao EPF para coleta de dados realizada no dia 17/07/2012. Com base nos fatos, foi possível estimar que a ruptura das juntas ocorreu devido a queda de pressão na linha. Não se sabe com detalhes o que aconteceu, porém, imagina-se ter havido aumento repentino de carregamento nas juntas quando a pressão do reservatório de ar alcançou um nível crítico em relação ao regulador de pressão das unidades de ensaio, culminando na ruptura de todas as juntas simultaneamente, por excesso de carga e não por fluência.

Infelizmente, os dados coletados para tais corpos de prova tiveram de ser descartados e os ensaios repetidos com novas juntas.

Antes de substituir as juntas rompidas, foram separadas e ensaiadas cinco juntas do novo lote fabricado, para monitoramento da tensão média de ruptura com intuito de evidenciar possíveis variações da τ_u entre os lotes fabricados. A Tabela 16 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 16 - Resultados para monitoramento da tensão média de ruptura das juntas, τ_u

Corpo de prova	Tensão [Mpa]	Atualizado [dd/mm/aa]:	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]
38.E20.06	15,0	07/08/2012	19,5	56,0	0,2
38.E20.07	12,9	07/08/2012	19,5	56,0	0,1
38.E20.08	13,6	07/08/2012	19,5	56,0	0,1
38.E20.09	13,6	07/08/2012	19,5	56,0	0,1
38.E20.10	13,6	07/08/2012	19,5	56,0	0,1
Média:	13,7	--	19,5	56,0	0,1
Desv. Padrao [%]	5,1	--	0,0	0,0	3,8

Fonte: O Autor, 2013.

Uma breve análise dos dados indicou redução de 3% na τ_u , e desvios padrão de 5,1%. Aparentemente, foram encontrados os mesmo resultados obtidos inicialmente mostrados na Tabela 9, indicando existir um ótimo padrão de repetibilidade entre os vários lotes fabricados com este adesivo.

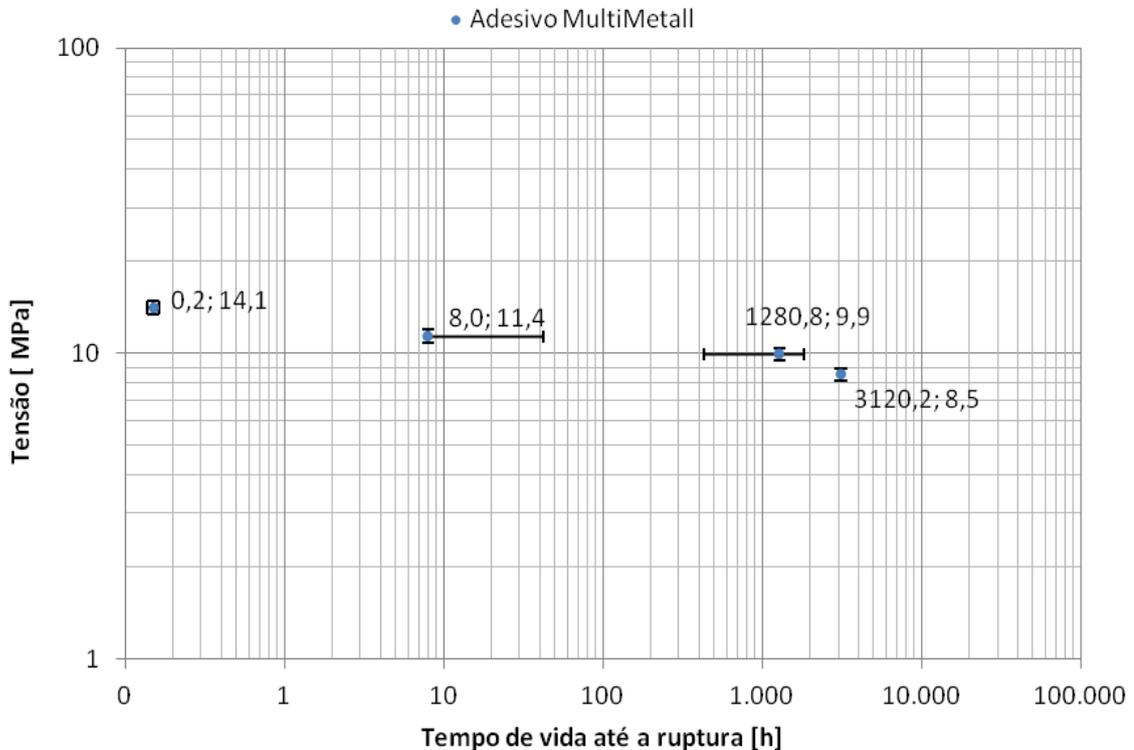
O APÊNDICE-C apresenta as tabelas relativas aos monitoramentos de tensão média de ruptura das juntas, as tabelas com os resultados dos ensaios de fluência realizados e os resultados que foram desconsiderados do estudo.

6.2.1.2 Multi-Metall - Dados experimentais em escala logarítmica.

Os resultados apresentados na Tabela 13 foram plotados no gráfico mostrado na Figura 63, que permiti avaliar sua distribuição em escala logarítmica.

Descartado o ponto de dados à tensão mais inferior, correspondente a 8,5 MPa, o qual representa os testes ainda em andamento, foi possível observar tendência de alinhamento dos dados experimentais de tal modo que uma reta pudesse ser traçada como a melhor representação do comportamento das juntas em escala logarítmica.

Figura 63 - Gráfico da tensão (logaritmo) versus tempo médio de vida (logaritmo) dos dados obtidos experimentalmente para o adesivo Multi-Metall.



Fonte: O Autor, 2013.

De acordo com a teoria descrita na seção 0, foi determinado os coeficientes da (4), utilizando a técnica de regressão linear.

A variável y foi substituída pela tensão de carregamento das juntas, τ ; x pelo tempo de vida até a ruptura, t_r ; e as constantes k e n por k_I e n_I . A (21) representa a relação entre a tensão de carregamento das juntas e o tempo de vida para o adesivo Multi-Metall.

$$\tau = k_I t_r^{n_I} \quad (21)$$

onde:

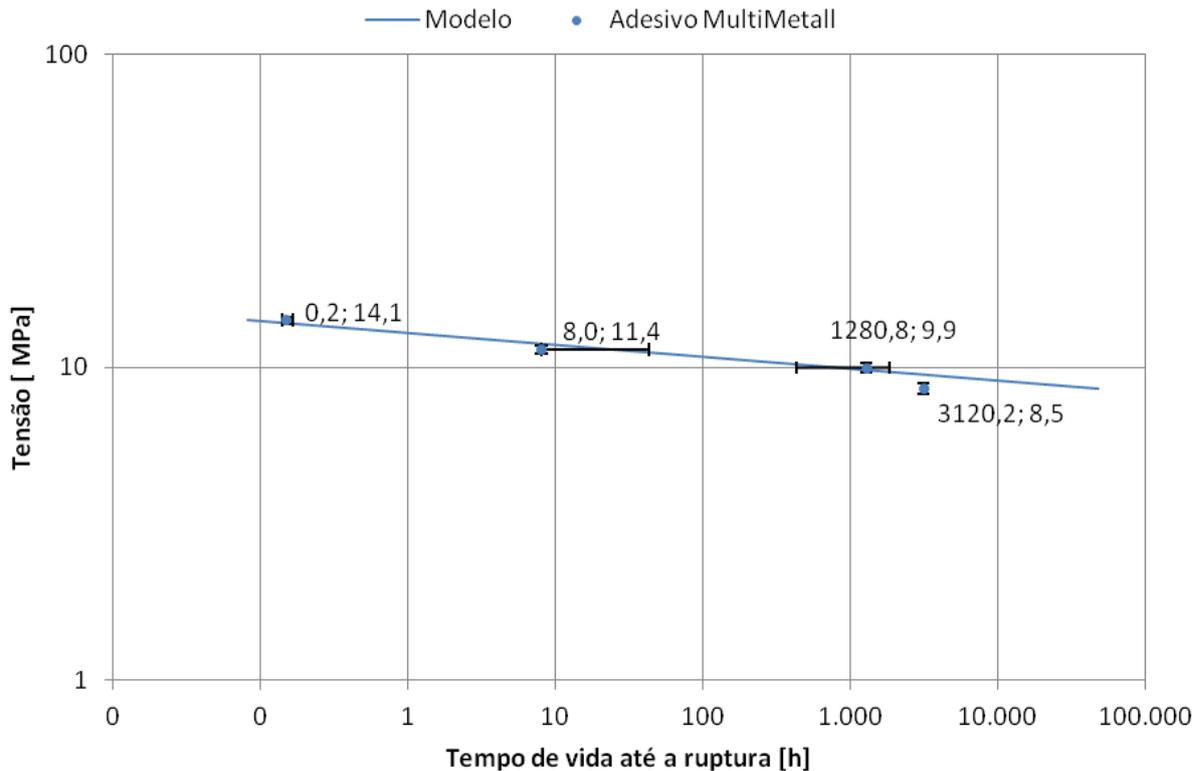
$$n_I = -3,83 \times 10^{-2};$$

$$k_I = 12,84 \text{ MPa/h};$$

A Figura 64 mostra a curva governada pela (21) em escala logarítmica. Foi possível observar que o modelo proposto possuía satisfatória aproximação com os dados

obtidos experimentalmente (pontos no gráfico), e que a curva modelo (linha do gráfico) se sobrepunha em meio aos limites/tolerâncias de cada ponto experimental.

Figura 64 - Gráfico da tensão (logaritmo) versus tempo médio de vida (logaritmo) mostrando os pontos obtidos experimentalmente e a curva modelo em escala logarítmica.

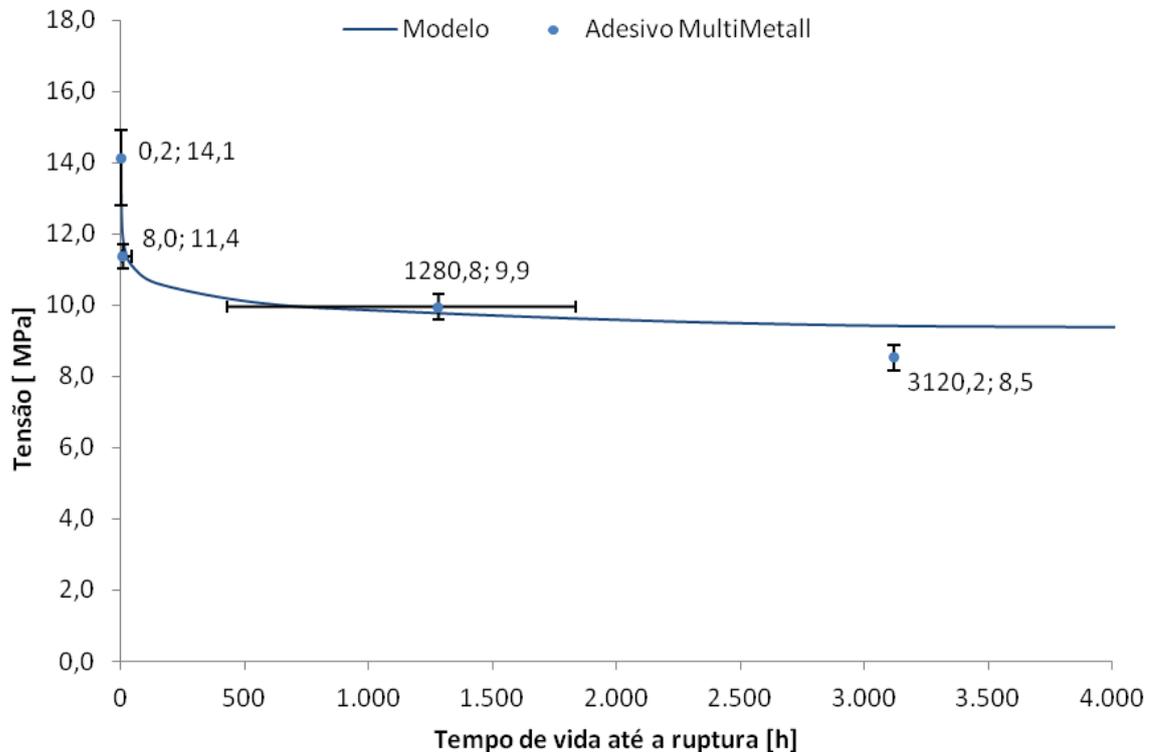


Fonte: O Autor, 2013.

A Figura 65 permite avaliar o comportamento das juntas em escala cartesiana.

Notou-se que, para a tensão de 9,9 MPa, os limites superior e inferior em relação ao tempo de vida são significativamente grandes. Porém, como é representado pelo modelo, o ponto encontra-se na região de estabilização da curva, onde pequenas variações no carregamento, na ordem da resolução do equipamento, teriam forte influência no tempo de vida das juntas.

Figura 65 - Gráfico da tensão versus tempo médio de vida mostrando os pontos obtidos experimentalmente e a curva modelo em escala cartesiana para o adesivo Multi-Metall.



Fonte: O Autor, 2013.

A equação (22) permite estimar teoricamente o tempo de vida das juntas em função do carregamento aplicado. Através desta equação, foi possível estimar o tempo de vida das juntas carregadas a 8,5 MPa que ainda encontravam-se sendo ensaiadas no EPF.

$$t_r = \frac{n_1 \sqrt{\tau}}{\sqrt{k_1}} \quad (22)$$

Substituindo os valores na equação foi possível estimar a t_r das juntas em aproximadamente 48.000 horas ou 5,5 anos.

É relevante enfatizar que para uma estimativa mais precisa é necessário comparar os resultados teóricos obtidos através da equação como outro método, no caso o parâmetro de Larson-Miller. A seção 3.4.3 trata mais detalhadamente sobre esse parâmetro.

6.2.2 Ensaio de fluência das juntas coladas com adesivo FUSOR

Seguindo a metodologia descrita na seção 5.11, foram iniciados os teste em fluência em cinco corpos de prova nos níveis de tensão 13,5 MPa e 12,0MPa. Todas as juntas falharam durante a execução do processo de carregamento, levando a crer que, em analogia ao adesivo anterior, que os tempos de vida das juntas neste nível de carga deveriam ser inferiores a 15 minutos.

A Tabela 17 resume os resultados dos testes em fluência realizados com as juntas coladas com adesivo Fusor. A tensão de 15,0 MPa representa a τ_u estabelecida através do EPF para o adesivo Fusor.

Tabela 17 - Resultado dos ensaios de fluência para o adesivo FUSOR

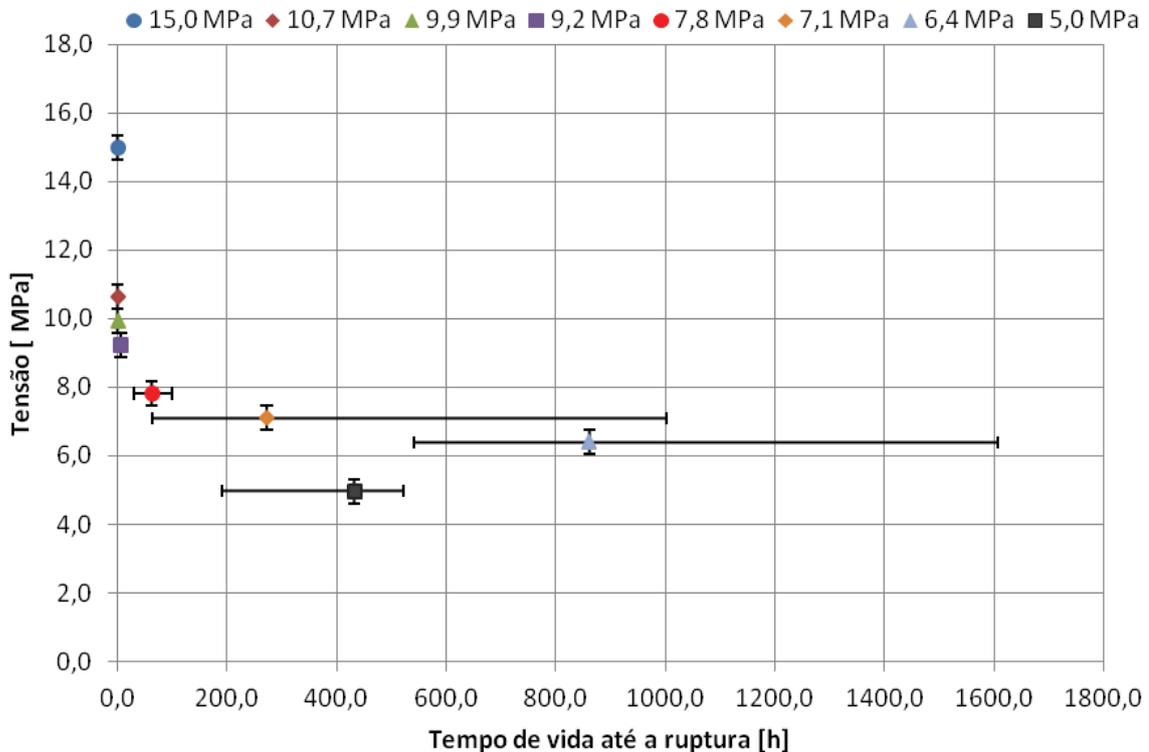
Tensão [MPa]		Tempo até a ruptura [horas]	
Média	Desvio padrão %	Média	Desvio padrão %
15,0	3,9	0,2	5,2
10,7	0,0	0,5	15,3
9,9	0,0	0,1	20,1
9,2	0,0	6,2	60,4
7,8	0,0	62,9	44,3
7,1	0,0	137,8	72,9
6,4	0,0	535,0	11,7
5,0	0,0	432,0	28,0

Fonte: O Autor, 2013.

A Figura 66, representação gráfica dos dados apresentados na Tabela 17, permite avaliar em escala cartesiana o tempo de vida das juntas até a ruptura em função do nível de tensão aplicado.

As juntas coladas com o adesivo Fusor apresentaram padrão comportamental semelhante ao adesivo anterior. Duas regiões são perceptíveis. A região primária, correspondente aos níveis de tensão entre 15,0 MPa e 7,8MPa, apresentou acentuada inclinação negativa, indicando altas taxas de redução de resistência mecânica em tensões próximas ao limite de resistência das juntas. A região secundária, correspondente ao nível de tensão inferior a 7,8 MPa, apresentou taxas de redução de resistência menores, com tendência de estabilização da curva para períodos relativamente longos.

Figura 66 - Tensão versus tempo médio de vida das juntas de cisalhamento coladas com adesivo FUSOR.



Fonte: O Autor, 2013.

6.2.2.1 Comentários – Problemas e Soluções – FUSOR

O APÊNDICE-D apresenta as tabelas relativas ao acompanhamento dos testes em fluência para o adesivo Fusor, os corpos de prova ensaiados em cada nível de tensão e os resultados desconsiderados.

Durante a realização dos testes de fluência, especificamente para os nível de tensão de 7,1 MPa e 6,4 MPa, foi observado comportamento anormal da curva tensão versus tempo de vida. O nível de tensão menor, 6,4 MPa, (Tabela D.2.8 do APÊNDICE-D), apresentou inicialmente tempo de vida de 11,8 horas, menor do que o nível de tensão de 7,1 MPa, (Tabela D.2.5 do APÊNDICE-D), com 533,6 horas.

Intuitivamente, é esperado que juntas sob maior tensão possuam menor tempo de vida e vice versa, ou seja, **tensão e tempo de vida são inversamente proporcionais**.

Foram repetidos os testes para os dois níveis de tensão. A análise dos resultados do segundo grupo de dados se mostrou completamente diferente do primeiro, apresentado agora comportamento dentro do padrão esperado, tensão e tempo de vida inversamente

proporcionais, porém, houve expressiva diferença na ordem de grandeza entre os resultados dos testes iniciais e sua primeira repetição. A Tabela D.2.9 do APÊNDICE-D apresenta os dados obtidos na primeira repetição do ensaio para tensão de 6,4 MPa. O tempo médio de vida encontrado foi de 78,1 horas e a Tabela D.2.6 do APÊNDICE-D apresenta os dados obtidos na primeira repetição na tensão de 7,1 MPa, 18,6 horas em média, bem diferentes dos tempos de 11,8 horas e 533,6 horas encontrados inicialmente.

Uma análise mais específica concluiu que foram utilizados apenas corpos de prova de dois lotes, E08 e E13, e que as ordens de grande dos tempos de vida estavam associadas a cada lote. A Tabela D.2.6 do APÊNDICE-D foi utilizada como referência inicial para chegar a esta conclusão. Notou-se que o corpo de prova 38.E08.10 possuía tempo de vida de 69,3 horas enquanto o restante do grupo amostral, todos cp's do lote E.13, não ultrapassaram tempos de 4 horas. Expandindo a análise sobre as outras tabelas que agrupavam resultados dos lotes E.08 e E.13, ficou evidente que, o lote E.13 apresentou resultados significativamente pequenos, independente no nível de tensão o qual as dez juntas foram ensaiadas, indicando problemas com sua fabricação. Por tal motivo, todos os resultados relacionados ao lote foram desconsiderados no estudo em fluência.

Dois novos lotes de juntas (E.21 e E.22) foram produzidas para repetir os ensaios nas tensões de 7,1 MPa e 6,4 MPa e substituir os dados anteriores.

A fim de garantir o padrão de repetibilidade dos lotes fabricados, cinco juntas foram separadas de cada um dos lotes e ensaiadas no EPF para monitoramento de possíveis variações da τ_u estabelecida inicialmente. As Tabelas D.1.2 e D.1.3 do APÊNDICE-D apresentam os resultados obtidos. A τ_u entre os lotes se mostrou aparentemente igual, 13,5 MPa e 13,8 MPa e certa de 8,6 % menor do que o referencial inicial de 15 MPa.

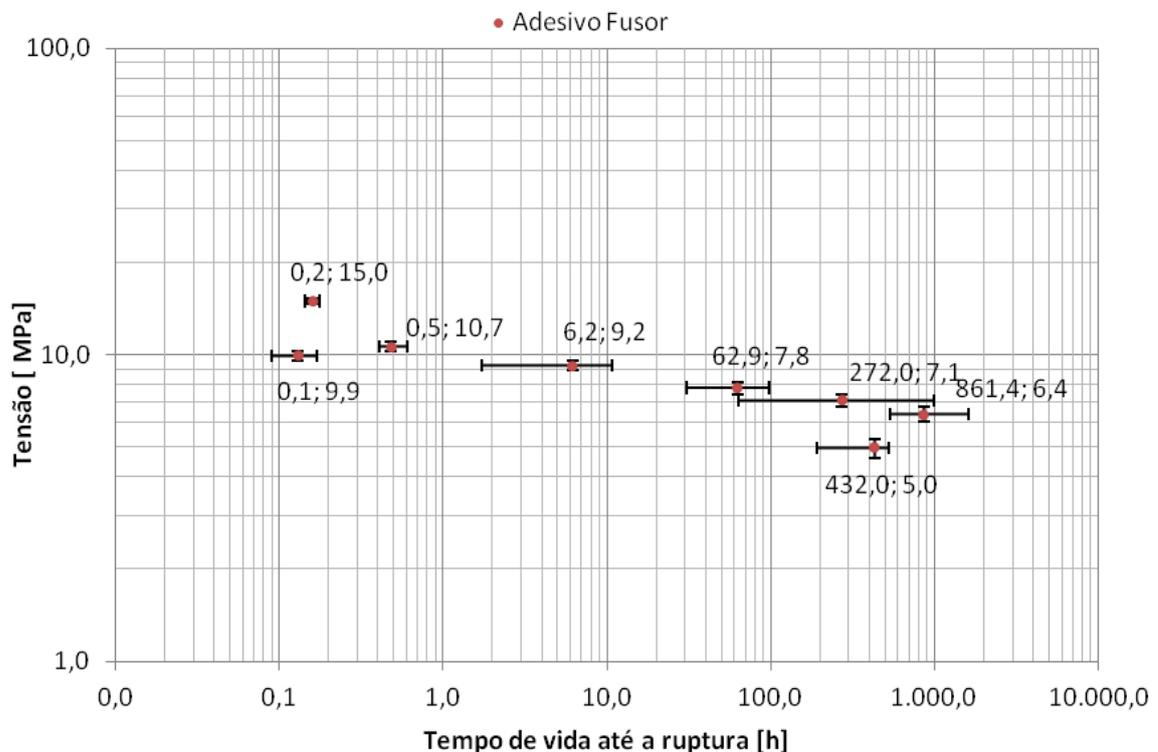
As Tabelas D.2.7 e D.2.10 apresentam os resultados considerados para o cálculo do tempo de vida das juntas nas tensões de 7,1 MPa e 6,4 MPa, apresentando tempos de 272,0 horas e 861,4 horas respectivamente.

6.2.2.2 FUSOR – Dados experimentais em escala logarítmica

Os dados experimentais agrupados na Tabela 17 foram plotados em escala logarítmica, Figura 67.

Descartado o ponto de dados com coordenadas (0,2;15,0), o qual representa a τ_u obtida através do EPF; o ponto (0,1;9,9) que se encontra numa região de alta instabilidade e pouco interesse prático por se tratar de tempos de vida extremamente pequenos, e o ponto (432,0;5,0) por motivos que serão melhor explicados a seguir, foi possível observar tendência de alinhamento dos dados experimentais, de tal modo que uma reta pudesse ser traçada como a melhor representação do comportamento das juntas em escala logarítmica.

Figura 67 - Gráfico da tensão (logaritmo) versus tempo médio de vida (logaritmo) dos dados obtidos experimentalmente para o adesivo Fusor.



Fonte: O Autor, 2013.

De acordo com a teoria descrita na seção 0, foi possível determinar os coeficientes da (4), utilizando a técnica de regressão linear.

A variável y foi substituída pela tensão de carregamento das juntas, τ ; x pelo tempo de vida até a ruptura, t_r ; e as constantes k e n por k_2 e n_2 . A (23) representa a relação entre a tensão de carregamento das juntas e o tempo de vida para o adesivo Fusor.

$$\tau = k_2 t_r^{n_2} \quad (23)$$

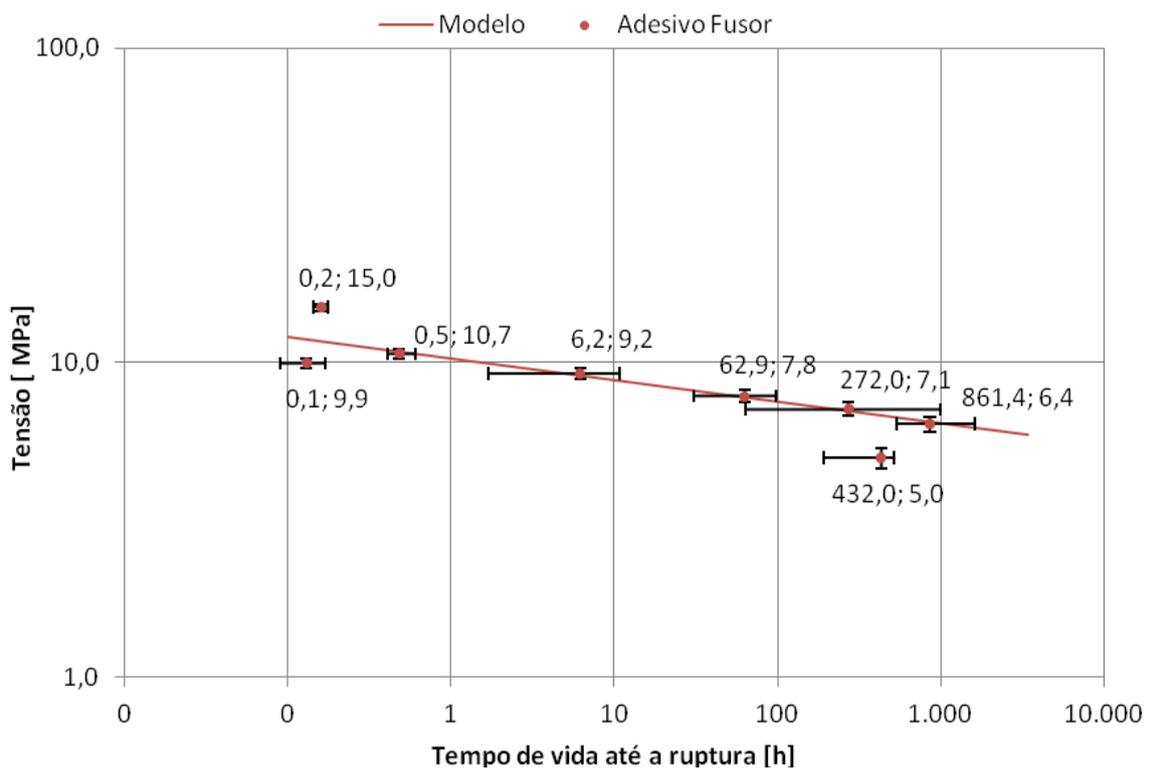
onde:

$$n_2 = -6,77 \times 10^{-2};$$

$$k_2 = 10,28 \text{ MPa/h};$$

A Figura 68 mostra a curva governada pela (23). É possível observar que o modelo proposto possui satisfatória aproximação com os dados obtidos experimentalmente e que a curva modelo se sobrepõe em meio aos limites (tolerâncias) de cada ponto experimental.

Figura 68 - Gráfico da tensão (logaritmo) versus tempo médio de vida (logaritmo) mostrando os pontos obtidos experimentalmente para o adesivo Fusor e a curva modelo.

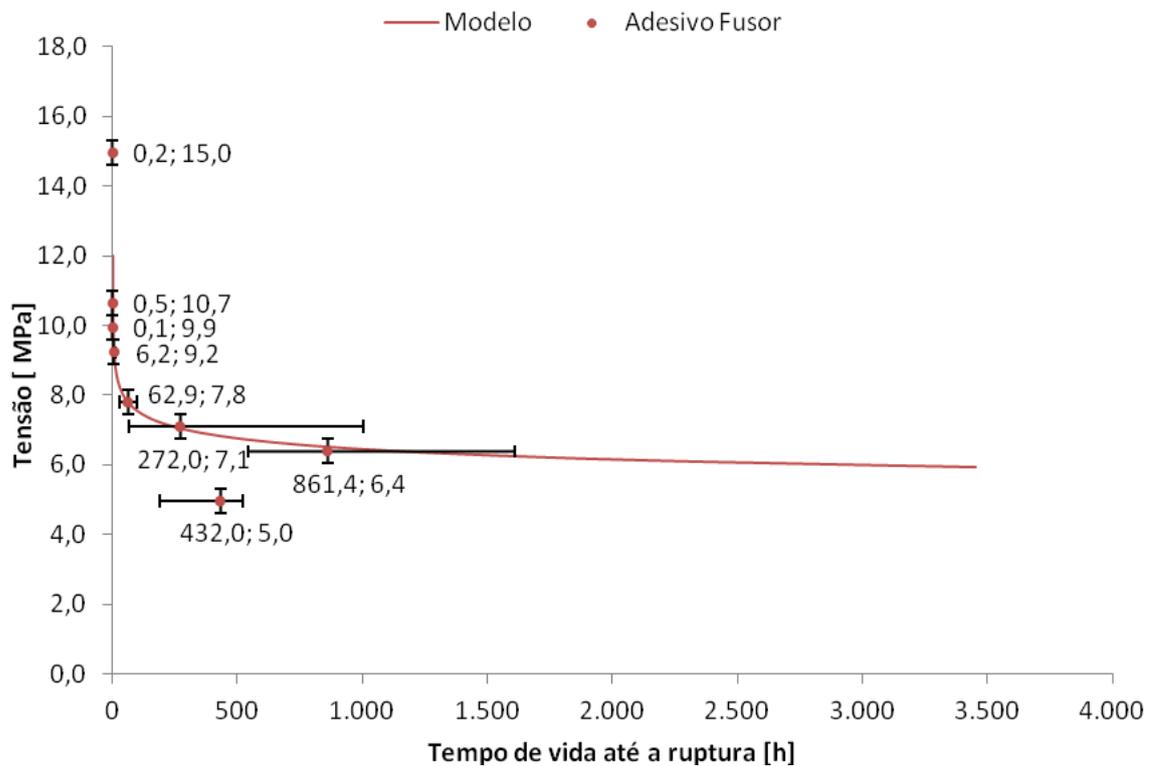


Fonte: O Autor, 2013.

A Figura 69 permite avaliar o comportamento das juntas em escala cartesiana. Notou-se que as juntas apresentaram inclinação negativa acentuada em tensões próximas a τ_u e tendência de estabilização em níveis de tensão medianos.

Notou-se também que as tensões de 7,1 MPa e 6,4 MPa apresentam grande variação entre os limites superior e inferior em relação ao tempo de vida, porém, como é representado pelo modelo, ambos os pontos encontram-se na região de estabilização da curva, onde pequenas variações no carregamento, na ordem da resolução do equipamento, teriam forte influência no tempo de vida das juntas.

Figura 69 - Gráfico da tensão versus tempo médio de vida das juntas coladas com adesivo Fusor.



Fonte: O Autor, 2013.

A (5) permite estimar teoricamente o tempo de vida das juntas em função do carregamento aplicado. Através desta equação, foi possível estimar o tempo de vida das juntas carregadas a 5,0 MPa que, nos gráficos anteriores, observou-se ser um ponto fora da curva modelo.

$$t_r = \sqrt[n_2]{\frac{F}{K_2}}$$

(24)

Substituindo os valores na equação foi possível estimar o t_r das juntas em aproximadamente 42.000 horas ou 4,8 anos.

Apesar dos resultados experimentais para este nível de tensão indicarem que o tempo de vida seja em torno de 432 horas, deve-se levar em consideração a experiência adquirida descrita na seção 6.2.2.1. A Tabela D.2.11 do APÊNDICE-D apresenta os resultados das juntas que foram ensaiadas para compor o grupo amostral considerado para o cálculo do tempo médio de vida na tensão de 5,0 MPa. Notou-se a presença de uma junta do lote E.13, e cinco juntas do lote E.16.

Comparando-se os dados das Tabelas D.2.10 e D.2.11, notou-se que, novamente, o princípio de **tensão e tempo de vida inversamente proporcionais** não foi atendido. As juntas carregadas à tensão de 6,4 MPa, tensão maior, permanecem unidas sob solitação mecânica por mais tempo que as ensaiadas a 5,0 MPa.

Portanto, os resultados iniciais obtidos para o nível de tensão de 5,0 MPa não foram levados em consideração no ajuste da curva modelo em relação aos dados experimentais. Há suspeitas que o lote E.16, semelhante ao lote E.13, tenha problemas relacionado a mistura do adesivo que comprometeram sua resistência mecânica. A seção 6.2.2.3 discute sobre o assunto.

Novos ensaios deveriam ser realizados para reavaliar o tempo médio de vida na tensão de 5,0 MPa, porém, baseado na estimativa obtida através da (24), seria inviável em laboratório sob condições normais, levar os testes até a ruptura das juntas. A solução para este problema deveria abordar o parâmetro de Larson-Miller.

É importante ressaltar que as previsões relacionadas ao comportamento das juntas baseado apenas na equação modelo, para tempos extremamente grandes, correspondem a uma parcela de dados teóricos que são inviáveis de serem comprovados experimentalmente. Uma solução para este problema evolui a repetição dos testes em ambientes com alta temperatura. Desta forma seria possível determinar o parâmetro de Larson-Miller para o adesivo e estimar de forma mais precisa, baseado na convergência dos dois métodos, os tempos de vida das juntas em função da tensão desejada.

6.2.2.3 Hipótese sobre a associação dos tempos de vida em relação aos lotes de juntas coladas com adesivo Fusor

Segundo análise dos dados referentes à colagem de todas as juntas fabricadas para o estudo em fluência e, de acordo com a qualificação visual da região de fratura, há indícios

de que o procedimento adotado apenas para a mistura dos compostos, resina e endurecedor, do adesivo Fusor não tenha nível de exigência adequado para garantir a homogeneidade ideal da mistura, embora, o mesmo procedimento demonstre ser totalmente compatível para o adesivo Multi-Metall. O adesivo Fusor, devido a sua composição química, apresenta considerável liberação de gases durante seu processo de cura, conseqüentemente, o volume da camada adesiva apresenta grandes quantidades de micro bolhas distribuídas uniformemente, vide seção 6.3.2. Quando as juntas são carregadas, as bolhas além de contribuírem para a redução da área sob carregamento, elas aumentam a probabilidade de fratura causada por propagação de trincas.

Adesivos com altas quantidades de bolhas geralmente apresentam comportamento instável, dependes do tamanho e da concentração de poros na camada adesiva. Manter um padrão de repetibilidade das juntas que assegure sempre “mesma” quantidade e tamanho de poros exige redução das tolerâncias aceitáveis para variáveis como: temperatura, umidade relativa, tempo de trabalho, mistura dos compostos dos adesivos entre outros parâmetros difíceis de serem totalmente controlados durante a etapa de colagem.

Para se confirmar a influência destes parâmetros associado a ruptura das juntas coladas com adesivo Fusor, seria necessário desenvolver nova metodologia de colagem das juntas, garantindo maior precisão na fabricação, ensaia-las e comparar os resultados aos obtidos para os lotes E16 e E13.

6.3 Qualificação da fratura das juntas

A qualificação do tipo de fratura das juntas em coesiva e/ou adesiva fornece informações importantes para a determinação da causa de falha. No caso de falha adesiva, o motivo da fratura está intimamente relacionada a interação adesivo/substrato. Possivelmente, o tratamento superficial do substrato não possuía condições ideais para a ancoragem do adesivo à sua superfície.

Quando uma junta falha, é desejada que a análise da superfície, qualifique-a como tendo fratura totalmente coesiva ou com percentual mínimo de fratura adesiva. Desta forma, a resistência da junta está associada principalmente a resistência do adesivo ao cisalhamento. A seção 2.2 oferece mais informações sobre este assunto.

Durante a execução dos ensaios, tanto para obtenção das τ_u das juntas quanto nos testes em fluência, foram acompanhados os tipos de fratura apresentados.

6.3.1 Adesivo MULTI-METALL

A Figura 70 representa o tipo de fratura comumente encontrada nas juntas produzidas com adesivo Multi-Metall.

Figura 70 - Região de fratura do corpo de prova fabricado com adesivo Multi-Metall.



Fonte: O Autor, 2013.

Uma breve análise visual, considerando todas as juntas ensaiadas, tanto para obtenção da τ_u quanto para ensaios em fluência, concluiu que as juntas coladas com adesivo Multi-Metall apresentaram fratura predominantemente coesiva. Por tanto, sua resistência à fratura está associada principalmente a resistência mecânica do adesivo ao cisalhamento.

6.3.2 Adesivo FUSOR

A Figura 71 representa o tipo de fratura comumente encontrada nas juntas produzidas com adesivo Fusor.

Notou-se a presença de grandes quantidades de poros distribuídos uniformemente sobre toda a região de fratura da junta. A fratura assemelha-se com o “rasgar de uma esponja”, inclusive com liberação de flocos.

Foi possível perceber que a cura do adesivo foi acompanhada por grandes quantidades de liberação de gás, provável causa da aparência esponjosa.

Figura 71 - Região de fratura do corpo de prova fabricado com adesivo Fusor.



Fonte: O Autor, 2013.

Uma breve análise visual concluiu que as juntas coladas com adesivo Fusor apresentaram fratura totalmente coesiva, tanto em testes de tração quanto fluência, não havendo exposição do substrato em nenhuma das juntas ensaiadas, levando a concluir que sua resistência mecânica está associada principalmente a resistência mecânica do adesivo ao cisalhamento.

6.4 Testes realizados na máquina de ensaio universal (shimadzu)

6.4.1 Tensões médias de ruptura das juntas

Com objetivo de comparar os valores das τ_u estabelecidas para ambos adesivos através do EPF foram realizados ensaios de tração em juntas de cisalhamento na máquina de ensaio universal AG-X plus SHIMADZU.

A metodologia para ensaio diferiu do primeiro caso apenas pelo parâmetro velocidade. Como comentado na seção 5.10, não foi possível realizar os testes no EPF na velocidade indicada pela norma, sendo necessário adotar a velocidade de 23, 6 kPa/s como padrão para ensaios de tração no EPF.

Como a τ_u dos adesivos representa um referencial inicial, um limite máximo correspondendo a 100% de carregamento, os níveis de tensões menores selecionados para a

execução dos testes em fluência correspondem a percentuais que podem variar entre 100% e 0% da τ_u de acordo com a (25).

$$p = 100 \frac{\tau}{\tau_u} \quad (25)$$

onde

p = percentual do carregamento [%];

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

τ = tensão em fluência [MPa];

Havendo diferença entre os valores da τ_u obtida entre os equipamentos, os valores numéricos da tensão τ referente aos níveis de carregamento escolhidos para execução dos testes em fluência permanecem inalterados, apresentando apenas variações nos valores relativos, ou seja, percentuais, visto que, estes sim, dependem do valor da τ_u , como relacionado pela a (25). Por exemplo, se a τ_u obtida inicialmente fosse de 10 MPa a tensão de 6 MPa referente ao ensaio de fluência corresponderia a 60% da τ_u . Se a nova τ_u obtida através da SHIMADZU fosse igual a 8 MPa, o valor de 6 MPa passaria a representar 75% da τ_u .

6.4.1.1 Adesivo Multi-Metall

Os ensaios na SHIMADZU foram realizados na velocidade de 1,3 mm/min, de acordo com a ASTM D 1002. O comprimento inicial do corpo de prova, l_0 , considerado para o cálculo da deformação foi de 140 mm, comprimento total da junta menos 25 mm de cada extremidade presa às garras. A área considerada para o cálculo da tensão de cisalhamento foi 322,58 mm². O deslocamento registrado foi informado pela máquina de ensaio. Não foi utilizado extensômetro. A Tabela 18 apresenta os resultados para tensões médias de rupturas das juntas coladas com adesivo Multi-Metall.

Tabela 18 - Resultado dos ensaios realizados na máquina de ensaio universal para obtenção da tensão média de ruptura das juntas, τ_u , coladas com adesivo Multi-Metall.

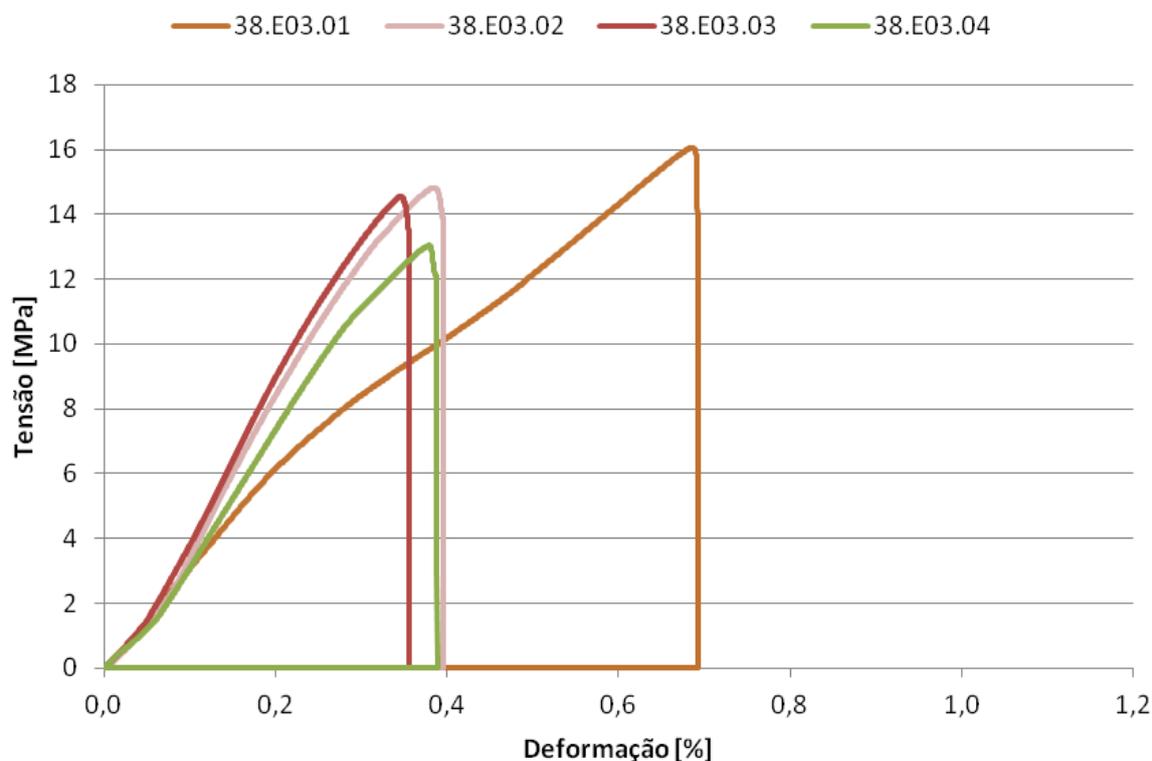
Corpo de prova	Força de ruptura [N]	Tensão de ruptura [Mpa]	Deslocamento [mm]	Deformação [%]	Velocidade [mm/min]	Tempo [s]
38.E03.01	5177,59	16,05	0,97	0,69	1,30	44,80
38.E03.02	4782,17	14,82	0,55	0,40	1,30	25,63
38.E03.03	4694,16	14,55	0,50	0,36	1,30	23,08
38.E03.04	4204,99	13,04	0,54	0,39	1,30	25,16
Média:	4714,73	14,62	0,64	0,46	1,30	29,67
Desv. Padrao [%]	7,34	7,34	29,66	29,66	0,00	29,63

Fonte: O Autor, 2013.

A análise dos resultados indicou τ_u de 14,6 MPa com desvio padrão de 7,3 %. Comparando-a com a τ_u estabelecida inicialmente através do EPF, no valor de 14,1 MPa com desvio padrão de 5,2 %, concluiu-se que a velocidade do ensaio não interferiu sensivelmente nos resultados, visto que, aparentemente ambos são os mesmos. Para o adesivo Multi-Metall, os ensaios realizados no EPF representam a mesma realidade encontrada através da máquina de ensaio universal.

A Figura 72, apresenta o comportamento tensão-deformação das juntas. Nota-se que a fratura foi predominantemente frágil.

Figura 72 - Gráfico tensão versus deformação das juntas de cisalhamento coladas com adesivo Multi-Metall.



Fonte: O Autor, 2013.

6.4.1.2 Adesivo Fusor

Os ensaios na SHIMADZU foram realizados na velocidade de 1,3 mm/min, de acordo com a ASTM D 1002. O comprimento inicial do corpo de prova, l_0 , considerado para o cálculo da deformação foi de 140 mm, comprimento total da junta menos 25 mm de cada extremidade presa às garras. A área considerada para o cálculo da tensão de cisalhamento foi 322,58 mm². O deslocamento registrado foi informado pela máquina de ensaio. Não foi utilizado extensômetro. A Tabela 19 apresenta os resultados para tensões médias de rupturas das juntas coladas com adesivo Fusor.

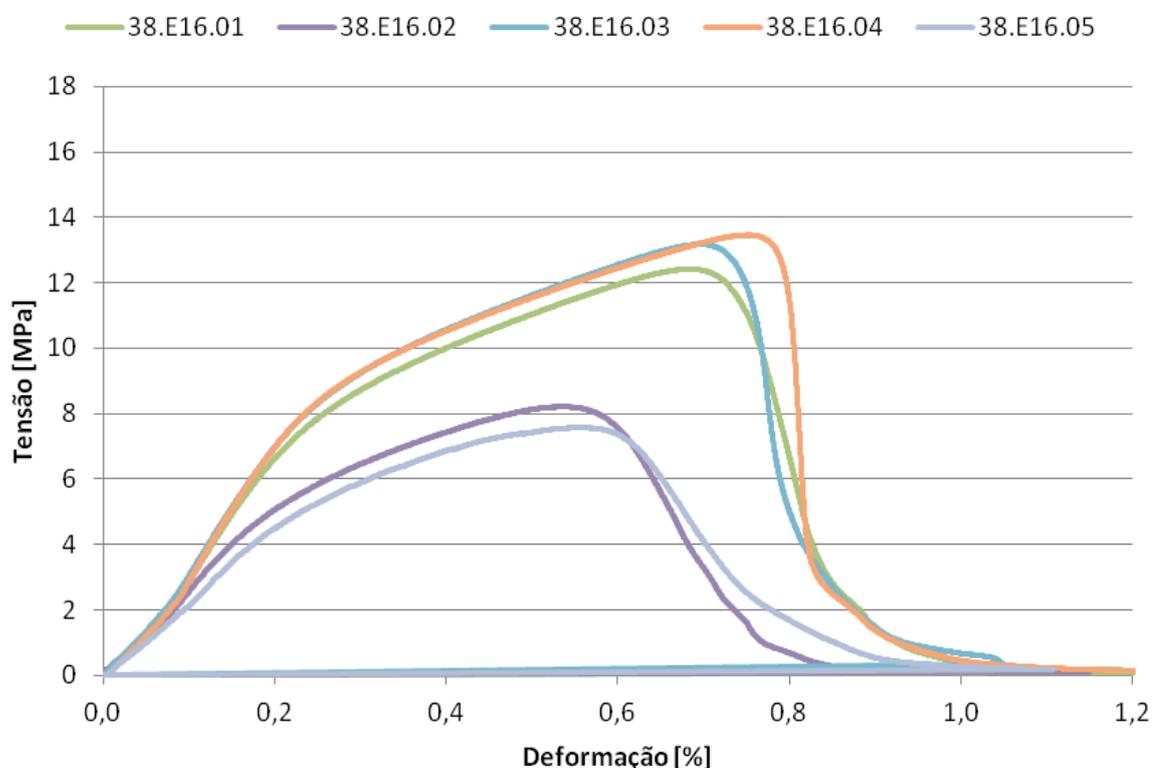
Tabela 19 - Resultado dos ensaios realizados na máquina de ensaio universal para obtenção da tensão média de ruptura das juntas, τ_u , coladas com adesivo Fusor.

Corpo de prova	Força de ruptura [N]	Tensão de ruptura [Mpa]	Deslocamento [mm]	Deformação [%]	Velocidade [mm/min]	Tempo [s]
38.E16.01	4005,88	12,42	1,92	1,37	1,30	88,74
38.E16.02	2648,72	8,21	1,61	1,15	1,30	74,28
38.E16.03	4249,75	13,17	1,47	1,05	1,30	67,88
38.E16.04	4342,94	13,46	2,00	1,43	1,30	92,19
38.E16.05	2442,30	7,57	1,55	1,11	2,30	71,62
Média:	3537,92	10,97	1,71	1,22	1,50	78,94
Desv. Padrao [%]	23,19	23,19	12,28	12,28	26,67	12,27

Fonte: O Autor, 2013.

Analisando comparativamente os resultados obtidos através dos dois equipamentos foi possível notar diferença considerável nos níveis de tensão encontrados. A τ_u estabelecida inicialmente através do EPF foi de 15,0 MPa, Tabela 11, com desvio padrão de 39 %. Os resultados fornecidos pela SHIMADZU estabelecem o valor da τ_u em 11,0 MPa, com desvio padrão de 23,19%, cerca de 27% menor no que estabelecido inicialmente. Para este caso, nota-se que a velocidade de ensaio interferiu significativamente nos resultados. Os testes realizados na velocidade mais alta levaram a uma τ_u menor e a uma maior dispersão. Ficou evidente que, diferente do caso anterior, o adesivo Fusor é sensível a velocidade de carregamento. A Figura 73 apresenta o comportamento tensão-deformação das juntas.

Figura 73 - Gráfico tensão versus deformação das juntas de cisalhamento coladas com adesivo Fusor



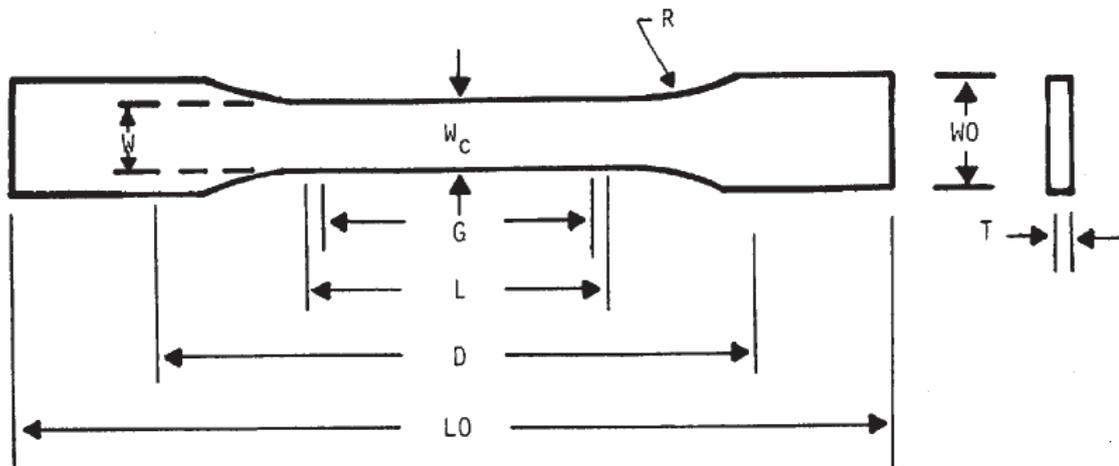
. Fonte: O Autor, 2013.

Nota-se que, em relação ao gráfico anterior, as juntas apresentaram comportamento predominantemente dúctil, não apresentando um ponto específico de fratura e sim uma região com perda de resistência até a ruptura completa do adesivo. A deformação foi cerca de 2,5 vezes maior e a tensão de ruptura foi 25% menor em relação ao adesivo Multi-Metall.

6.4.2 Módulo de elasticidade do adesivo

Com o objetivo de determinar o módulo de elasticidade dos adesivos selecionados para a execução desta pesquisa foram realizados ensaios de tração em corpos de prova fabricados puramente de adesivo. Os corpos de prova foram produzidos segundo a norma ASTM D638. A Figura 74 e a Tabela 20 apresentam a geometria e as dimensões dos cp's.

Figura 74 - Corpo de prova para ensaio de tração.



Fonte: ASTM D 638, 2003.

Tabela 20 - Dimensões do corpo de prova

Variáveis	Dimensões [mm]
D	115
G	25
L	60
L0	165
R	15
T	3 ($\pm 0,1$)
W	13
W0	19

Fonte: O Autor, 2013.

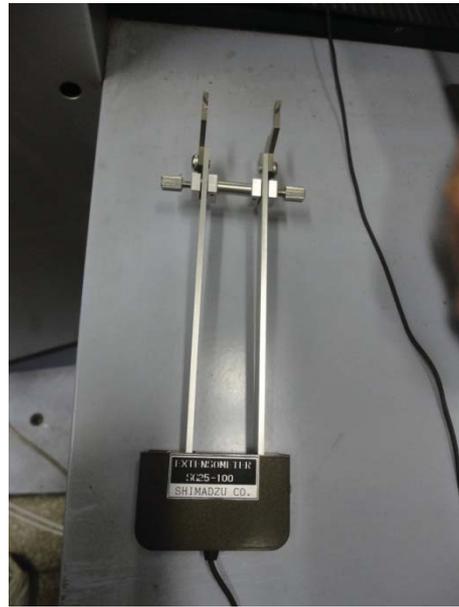
Os ensaios foram realizados na máquina de ensaio universal AG-X plus SHIMADZU (Figura 75) instalada em sala climatizada com temperatura de 25°C ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) e úmida relativa de 70% (± 5). A velocidade utilizada foi de 1 mm/min . O deslocamento foi medido utilizando o extensômetro SHIMADZU SG25-100 com dimensão inicial de 25 mm , mostrado na Figura 76.

Figura 75 - Corpo de prova em ensaio de tração.



Fonte: O Autor, 2013.

Figura 76 - Extensômetro Shimadzu SG25-100.

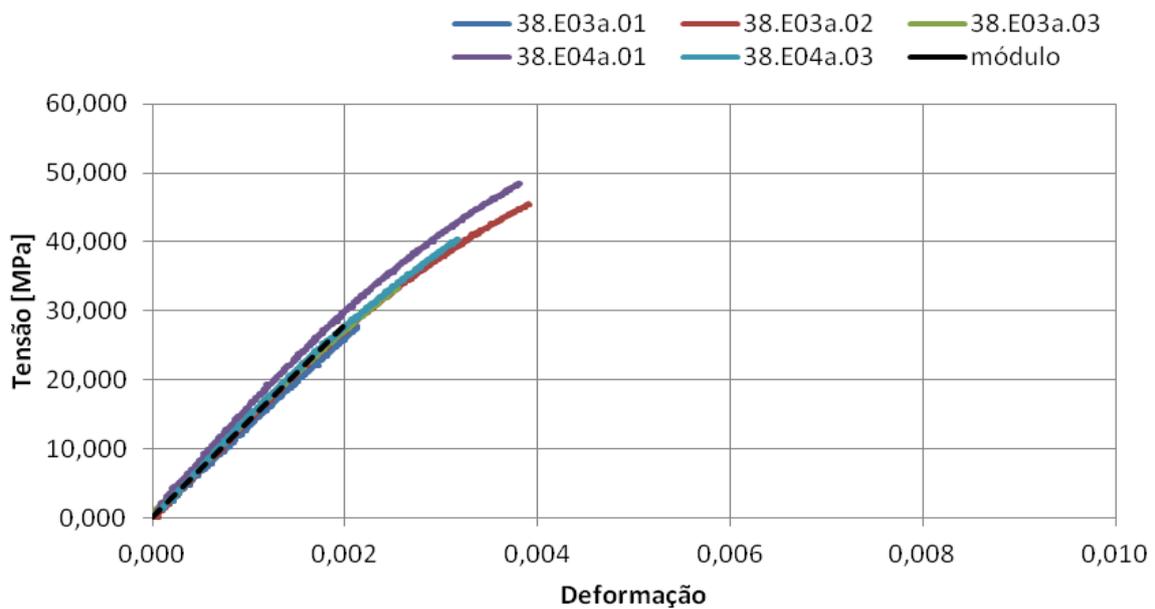


Fonte: O Autor, 2013.

6.4.2.1 Adesivo Multi-Metall

A Figura 77 mostra o comportamento do corpo de prova produzido com o adesivo Multi-Metall.

Figura 77 - Gráfico tensão versus deformação dos corpos de prova produzidos com adesivo Multi-Metall.



Fonte: O Autor, 2013.

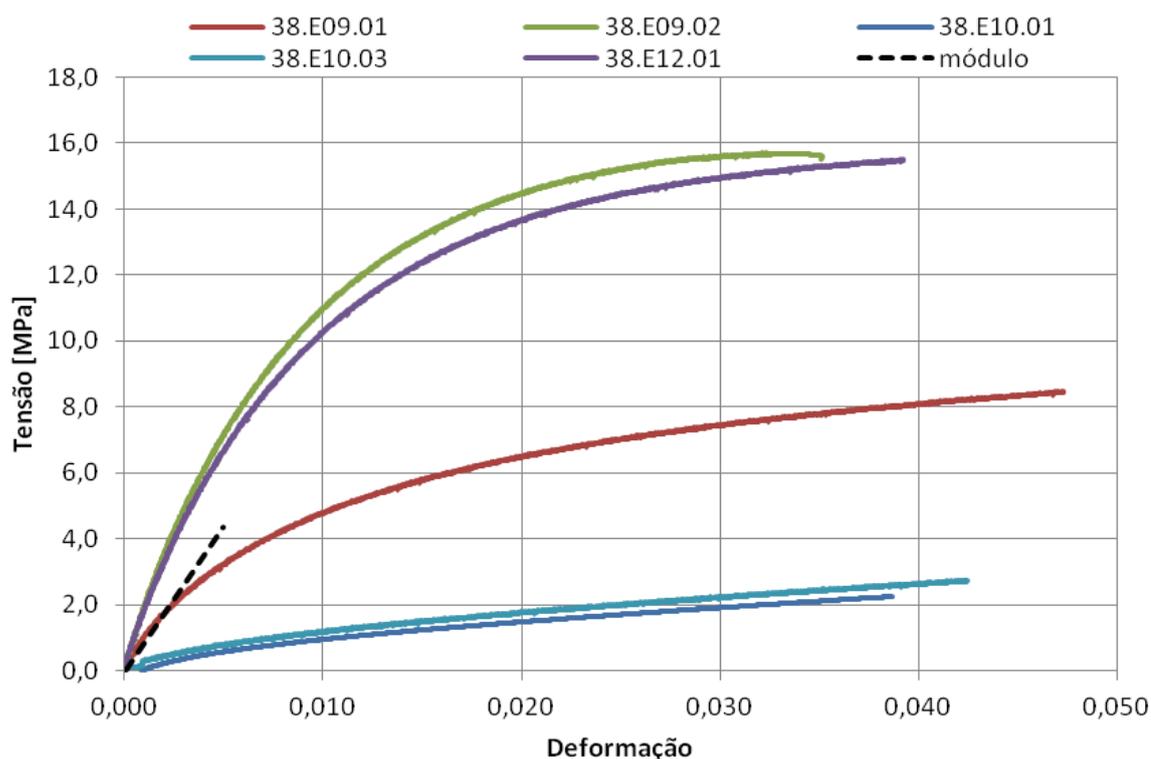
Notou-se que os cinco corpos de prova ensaiados possuem comportamento semelhantes independente do lote o qual pertencem.

O módulo de elasticidade foi calculado utilizando com referência o intervalo de deformação entre 0,0 e 0,002, correspondente a região elástica do material. Obteve-se para o adesivo Multi-Metall módulo de elasticidade igual a 14 GPa ($\pm 1,5$).

6.4.2.2 Adesivo Fusor

A Figura 78 mostra graficamente o comportamento do corpo de prova produzido com o adesivo Fusor.

Figura 78 - Gráfico tensão versus deformação dos corpos de prova produzidos com adesivo Fusor.



Fonte: O Autor, 2013.

Notou-se que, embora os testes tenham sido conduzidos da mesma forma, há presença de três grupos com padrão comportamental diferente. Observou-se que o primeiro grupo é composto pelos cp's, 38.E09.02 e 38.E12.01 e o segundo grupo pelos cp's 38.E10.01,

representando os extremos do comportamento do material. O terceiro grupo composto apenas pelo cp 38.E09.01, apresenta comportamento intermediário.

Ficou evidente que o material não apresenta região elástica característica e que o módulo de elasticidade possui grande dispersão.

O módulo foi calculado utilizando com referência o intervalo de deformação entre 0,0 e 0,005. Obteve-se para o adesivo Fusor módulo de elasticidade igual a 0,88 GPa ($\pm 0,7$).

6.5 Relação entre o comportamento em fluência e a tensão média de rupturas das juntas

Em resumo, é possível dizer que a τ_u encontrada para o adesivo Multi-Metall através da SHIMADZU foi aparentemente a mesma τ_u determinada inicialmente pelo EPF, igual a 14,1 MPa, ou seja, os resultados não apresentaram dependência devido a velocidade de ensaio ser seis vezes maior do que nos testes realizados no EPF.

No entanto, os resultados encontrados para as juntas coladas com o adesivo Fusor mostraram um panorama diferente. A velocidade de ensaio teve influência significativa no valor da τ_u . A τ_u estabelecida pelo EPF era de 15,0 MPa, agora através da SHIMADZU houve redução de 4 MPa, estabelecendo o novo valor em 11,0 MPa.

Ensaio em máquinas universais correspondem a grande parcela do histórico de estudos relacionados a testes de caracterização dos materiais. A norma ASTM D 1002 regulamenta as condições para a realização dos ensaios em juntas de cisalhamento e é adotada pela grande maioria dos pesquisadores na área de juntas coladas. Como não foi possível realizar os testes de tração no EPF em total conformidade com a ASTM, devido à apenas a velocidade de ensaio exigida pela norma, os valores das τ_u obtidos através da SHIMADZU foram utilizados como referência para avaliação da relação entre a tensão crítica em fluência e a tensão média de ruptura das juntas.

6.5.1 Adesivo Multi-Metall

A Tabela 21 apresenta os dados referentes aos ensaios de fluência em juntas coladas com adesivo Multi-Metall. A primeira coluna ($100\tau/\tau_u$ [%]) representa o percentual de tensão que cada grupo de juntas foi ensaiado em fluência.

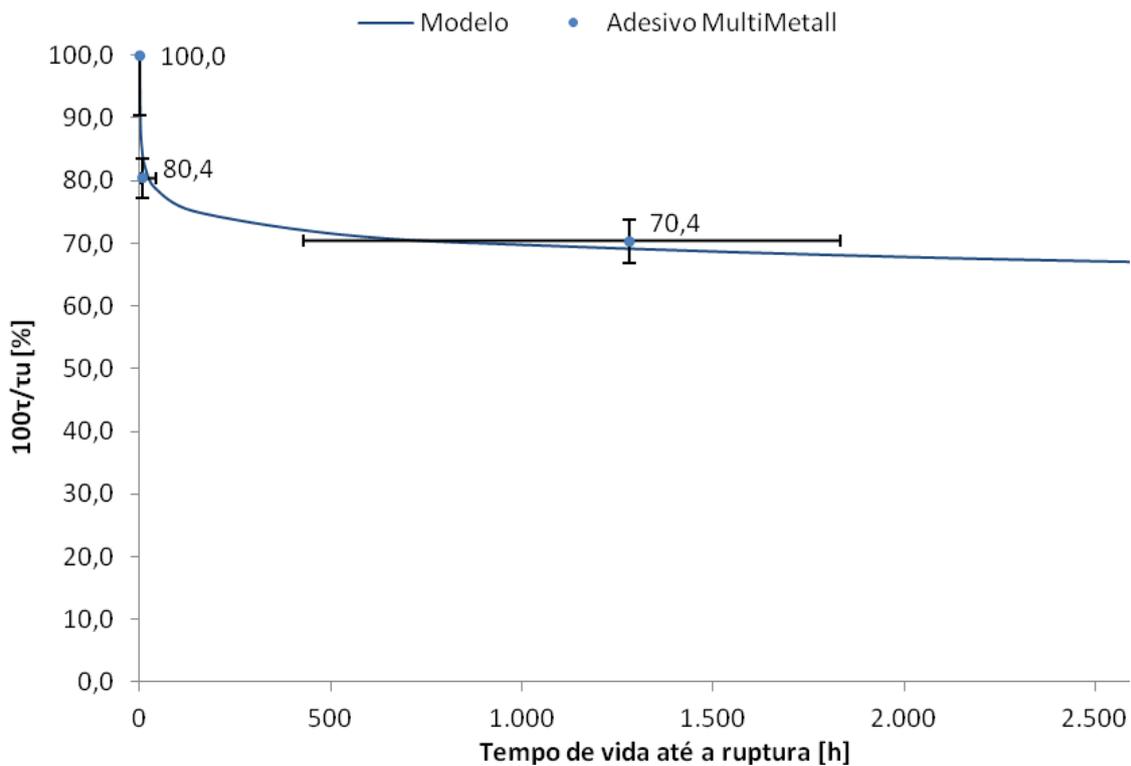
Tabela 21 - Resultados percentuais dos ensaios de fluência para o adesivo Multi-Metall

100 τ/τ_u [%]	Tensão [MPa]			Tempo até a ruptura [horas]		
	Média	Erro positivo [%]	Erro negativo [%]	Média	Erro positivo	Erro negativo
100,0	14,1	5,5	9,5	0,2	0,0	0,0
80,4	11,4	3,1	3,1	8,0	34,5	8,0
70,4	9,9	3,5	3,5	1280,8	553,1	853,5
60,3	8,5	4,1	4,1	2334,0	0,0	0,0

Fonte: O Autor, 2013.

A Figura 79 apresenta graficamente o comportamento das juntas, relacionando o percentual de tensão ao tempo de vida até a ruptura. A τ_u estabelecida para as juntas corresponde ao valor de 100% no gráfico.

Figura 79 - Gráfico, Percentual de carregamento em relação a τ_u versus o tempo de vida até a ruptura das juntas para o adesivo Multi-Metall.



Fonte: O Autor, 2013.

Nota-se que a curva modelo representa o limite máximo de tensão que este tipo de junta carregada suporta em longo prazo e a temperatura ambiente de 20°C.

De forma geral é possível dizer que para o projeto de juntas simples de cisalhamento coladas com adesivo Multi-Metall que prevejam carregamento estático por períodos na ordem de até 2 anos e em ambientes com temperatura constante de 20°C e umidade relativa de 60% ±10, é necessário adotar como tensão admissível em projeto o valor corresponde a 60% da τ_u , ou seja, 60% do valor obtido através de ensaios de ruptura por cisalhamento realizados segundo a norma ASTM D 1002.

6.5.2 Adesivo Fusor

A Tabela 22 apresenta os dados referentes aos ensaios de fluência em juntas coladas com adesivo Fusor.

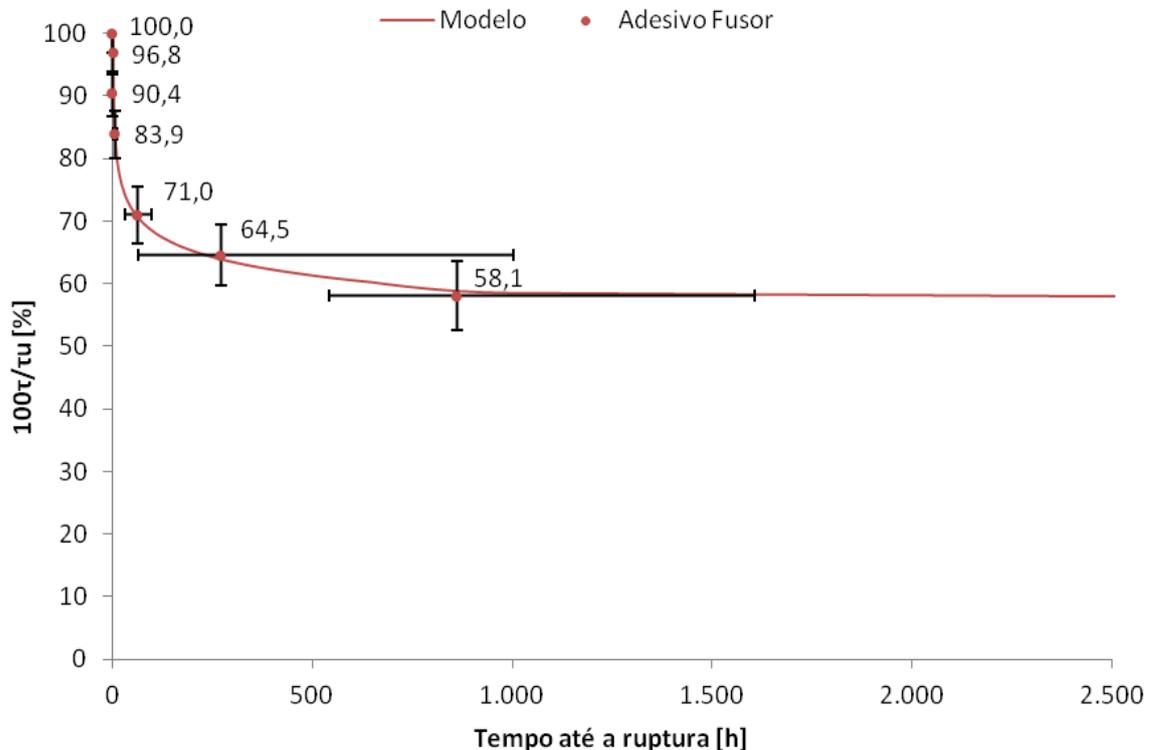
Tabela 22 - Resultados percentuais dos ensaios de fluência para o adesivo Fusor

100 τ / τ_u [%]	Tensão [MPa]			Tempo até a ruptura [horas]		
	Média	Erro positivo [%]	Erro negativo [%]	Média	Erro positivo	Erro negativo
100,0	11,0	3,2	3,2	0,2	0,0	0,0
96,8	10,7	3,3	3,3	0,5	0,1	0,1
90,4	9,9	3,5	3,5	0,1	0,0	0,0
83,9	9,2	3,8	3,8	6,2	4,7	4,5
71,0	7,8	4,5	4,5	62,9	35,8	32,0
64,5	7,1	4,9	4,9	272,0	731,2	208,0
58,1	6,4	5,5	5,5	861,4	746,0	320,6

Fonte: O Autor, 2013.

A Figura 80 mostra graficamente o comportamento das juntas coladas com o adesivo, relacionando o percentual de tensão ao tempo de vida até a ruptura. A τ_u estabelecida para as juntas corresponde ao valor de 100% no gráfico.

Figura 80 - Gráfico, Percentual de carregamento em relação a τ_u versus o tempo de vida até a ruptura das juntas para o adesivo Fusor.



Fonte: O Autor, 2013.

Nota-se que o patamar da curva modelo também representa o limite superior da região “segura” ao projeto das juntas em longo prazo. Porém, ao levarmos em consideração o período de 2 anos adotado no caso anterior, observou-se através da (23 que o percentual de carregamento relativo equivaleria ao intervalo de 48% a 45% da τ_u , estabelecida através da máquina de ensaio universal, no valor de 11,0 MPa.

Nota-se que a curva modelo, semelhante ao caso anterior, também representa o limite máximo de tensão que este tipo de junta carregada suporta em longo prazo e a temperatura ambiente de 20°C.

Em analogia ao adesivo Multi-Metall, é possível dizer que, de forma geral, para o projeto de juntas simples de cisalhamento coladas com adesivo Fusor que prevejam carregamento estático por períodos na ordem de até 2 anos e em ambientes com temperatura constante de 20°C e umidade relativa de 60% \pm 10, é necessário adotar como tensão admissível em projeto o valor corresponde a 45% da τ_u , ou seja, 45% do valor obtido através de ensaios de ruptura por cisalhamento realizados segundo a norma ASTM D 1002.

CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou o comportamento em fluência de juntas metálicas coladas com adesivo de base epóxi e poliuretano. Ao todo, foram analisadas em torno de 150 juntas coladas e 25 corpos de prova de tração em ensaios realizados no Equipamento Pneumático de Fluência (EPF) e na máquina de ensaio universal SHIMADZU AG-X plus.

Com auxílio do EPF, equipamento desenvolvido pelo LAA especificamente para o estudo em fluência, foi possível realizar dez ensaios simultâneos, adotando as configurações desejadas de carregamento à cada corpo de prova. Além do equipamento viabilizar o estudo das juntas em um curto intervalo de tempo, foi possível produzir dados suficientes para a realização de tratamentos estatísticos confiáveis.

Segundo os resultados obtidos foi possível comprovar que o conceito pneumático, princípio de funcionamento do equipamento, é um método eficaz para se aplicar e manter-se constante o carregamento nas juntas por longos períodos de tempo. Os resultados dos ensaios de tração em juntas de cisalhamento para determinação das τ_u realizados no EPF apresentaram pequeno desvio padrão, na ordem de 5% e, além de demonstrarem a acurácia do equipamento, comprovam o padrão de repetibilidade das juntas fabricada para o estudo.

Com base no estudo desenvolvido, foi possível perceber que alterações mínimas nos parâmetros: tempo de trabalho, umidade e temperatura, relativas ao procedimento de colagem utilizando o adesivo Fusor, interferiam consideravelmente na dispersão dos resultados.

A diferença entre o EPF e a SHIMADZU AG-X, quanto a velocidade dos ensaios para obtenção da τ_u das juntas, revelou haver considerável dependência deste parâmetro em relação à resistência mecânica do adesivo Fusor. O adesivo Multi-Metal não apresentou variação significativa mesmo tendo suas juntas ensaiadas no EPF numa velocidade seis vezes menor do que o indicado pela norma ASTM D 1002. Já o adesivo Fusor teve resistência mecânica 30% menor quando ensaiado na velocidade maior, acompanhado de aumento na dispersão dos resultados, saltando de 3,9% no EPF, para 23,2% na SHIMADZU em ensaios realizados segunda a velocidade indicada pela norma.

A metodologia pré-estabelecida para ensaios de fluência em materiais metálicos se mostrou bastante compatível para avaliação deste conceito em juntas coladas com adesivos estruturais, porém, juntas coladas são susceptíveis a fluência mesmo em temperaturas ambientes, em torno dos 20°C.

Embora os ensaios de tração em juntas de cisalhamento realizados segundo a norma ASTM D 1002 caracterizem a tensão aparente de ruptura das juntas, os valores obtidos não devem ser adotados como um fator decisivo em projetos que prevejam carregamento estático, por longos períodos de tempo, em tensões próximas ao limite estabelecido pelos ensaios.

Os ensaios realizados no EPF possibilitaram o levantamento de dados experimentais essenciais para a obtenção de equações que representassem o comportamento em fluência das juntas.

Plotando os resultados em escala logarítmica, foi observado tendência de alinhamento dos dados experimentais. Com auxílio da técnica de regressão linear adaptada ao logaritmo foram ajustadas as constantes da equação com o objetivo de obter-se uma curva que representasse satisfatoriamente o comportamento das juntas. O modelo obtido possibilitou prever o comportamento das juntas em longo prazo com relativa segurança, porém apenas para temperatura ambiente.

Por exemplo, considerando o tempo de vida de 17532 horas, o equivalente a 2 anos, foi possível mostrar através das equações modelos que, para o adesivo Multi-Metall, apenas as juntas carregadas em tensão menores que 60% da sua τ_u ultrapassariam este limite de tempo. Já para o adesivo Fusor, as tensões não deveriam ultrapassar 48% de sua τ_u .

A grande dispersão dos resultados reforça o fato do projeto de juntas coladas não ser uma tarefa simples. A adoção de fatores de segurança razoáveis é necessária para garantir a segurança de projetos que as empregue.

Foi avaliada a existência de uma constante, que independesse do adesivo e que pudesse correlacionar a tensão crítica em fluência com a tensão média de ruptura das juntas, a τ_u , normalmente estimada através da norma ASTM D 1002. Os resultados mostraram que cada adesivo possui uma razão diferente, não havendo um valor comum que relacionasse diretamente os dados obtidos por meio da norma ASTM com os limites em fluência. Cada adesivo precisa ser ensaiado em fluência e os dados experimentais utilizados como referência no ajuste de equações modelos. Desta forma, teoricamente, é possível prever o comportamento em longo prazo das juntas submetidas a um carregamento estático.

Como proposta para trabalhos futuros, é necessário a repetição dos ensaios nos mesmos níveis de tensão, porém, em temperatura superior, na ordem de 100 a 120°C. Segundo o parâmetro de Larson-Miller, existe uma relação onde o tempo de vida até a ruptura varia em função da temperatura. Os resultados dos dois ensaios no mesmo nível de tensão porém em temperaturas distintas seriam suficientes para obter-se esta relação, e constituir um

segundo método na predição do comportamento das juntas. A convergência dos resultados obtidos através dos dois métodos, equação modelo e parâmetro de Larson-Miller, seria ideal para elevar o nível de confiabilidade das previsões, tanto para condições normais de serviço quanto para operação das juntas em temperaturas elevadas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM A 36: standard specification for carbon structural steel, 1996, 3 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM D 1002: standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to-metal). West Conshohokem, 2005, 5 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM D 2094: standard test method for preparation of bar and rod specimens for adhesion tests. West Conshohokem, 2000, 4 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM D 2294: standard test method for creep properties of adhesives in shear by tension loading (metal to metal). West Conshohokem, 1996, 3 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM D 638M ASTM E 139. standard practice for conducting creep, creep-rupture test of metallic materials. West Conshohokem, 1998, 10 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM D 638M: standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohokem, 1996, 10 p.

ASKELAND D. R., PHULÉ P. P., Ciência e Engenharia dos Materiais. tradução: VTAT. São Paulo : CENGAGE Learning, 2011.

BERRY, N. G. 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.

BRANCO, F.J.F.G, TADEU, A.J.B. Efeito da Temperatura em Juntas Coladas. Publicação, reprodução, execução: direitos autorais. In: Congresso Latino-Americano Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios, 1., 1998, São Paulo. Anais do Congresso de Publicações. p.8.

CALLISTER, Jr. WILLIAN D., Materials Science and Engineering : An Introduction, 7th edition : JOHN WILEY / Sons, Inc., 2007.

COUTINHO, F.M.B., DELPECH, M.C. Poliuretanos como Materiais de Revestimentos de Superfície. Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia, , p.8, 1999.

DOWN AUTOMOTIVE. Disponível em: <http://www.dowautomotive.com/> Acesso em: 10 jun. 2012.

FARIA, Rui Duarte Diniz. Caracterização do Comportamento Mecânico de Adesivos Epóxicos. 2010. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM, Universidade de Aveiros, Aveiro, 2010.

FARINA, Luís Claudio. Caracterização Viscoelástica por Meio de Ensaio de Fluência e Ruptura por Fluência de Compósitos Poliméricos de Matriz de Resina Epoxídica e Fibras de Carbono. 2009. 114f. Dissertação (Mestrado em Ciência na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais) – Programa de Pós Graduação em Ciência na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais – PPGCATNM, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – UPS, São Paulo, 2009.

GOLAND, M.; REISSNER E., The Stress in Cemented Joints. Journal of Applied Mechanics, 66, A17-A27, 1944

LIMA, Hermes G. Influência da Velocidade do Ensaio de Tração nos Seus Resultados. 2004. 3f. Dissertação Resumida (Mestrado em Engenharia Mecânica – Técnicas de Pesquisa Experimental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM, Universidade Federal de Pernambuco – UFP, Pernambuco, 2004.

LIMAVERDE FILHO, A. M. *et al.* Influência do tratamento superficial na resistência mecânica de juntas de cisalhamento coladas. Publicação, reprodução, execução: direitos autorais. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 4, 2006, Recife, Anais do Congresso de Publicações. p.11.

MOURA, M.F.S.F et al, Elementos Finitos de Interface Aplicados ao Estudo do Comportamento Mecânico de Juntas Coladas, Revista Iberoamericana, v.10, n.2, p. 69-79, 2006.

MOURÃO, T.C *et al.* Efeito do Tratamento Superficial Sobre a Carga de Ruptura de Juntas Sobrepostas Simples Unidas por Adesão. Publicação, reprodução, execução: direitos autorais. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 14, 2000, São Paulo. Anais do Congresso de Publicações. p.8.

PACHECO, Marcos Fernando Molon. Síntese e Caracterização de Elastômeros Microcelulares de Poliuretano. 2006. 80f. Dissertação (Mestrado em Materiais) – Programa de Mestrado em Materiais – PPGMM, Universidade de Caxias do Sul – UCS, Caxias do Sul, 2006.

PEREIRA, A.B., MORAIS, A.B. Influência das Tensões de Borda na Resistência de Juntas Coladas de Sobreposição. Revista Iberoamericana, v.8, n.3. p.69-79, 2004.

PEREIRA, António Manuel de Bastos. Fractura de Juntas Coladas. 2002. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM, Universidade de Aveiros – UA, Aveiro, 2002.

PETROBRAS. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/> Acesso em: 10 jun. 2012.

RT TMEC n°003/08 – Qualificação de Adesivo para Reparo Estrutural

SAMPAIO, E.M. *et al.* Aderência de Juntas Metálicas de Cisalhamento Coladas com Adesivos Epoxídicos de Baixa e Alta Viscosidade. Publicação, reprodução, execução: direitos autorais. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 17, 2006, Foz do Iguaçu . Anais do Congresso de Publicações. p.12.

SAMPAIO, Eduardo Martins. Um Modelo de Dano em Juntas Coladas. 1998. 111f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – PPGEMM, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 1998.

SHIGLEY J. E. ; MISCHKE C. R. ; BUDYNAS R. G. Projeto e Engenharia Mecânica. tradução: AGUIAR J. B. ; AGUIAR J. M. Porto Alegre : Bookman, 2005.

SILVA, Antonio Henrique Monteiro da Fonseca Thome da. Critério de Falha para Juntas Coladas Submetidas a Carregamentos Complexos. 2010. 236f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2010.

SILVA, Antonio Henrique Monteiro da Fonseca Thome da. Proposta de um Critério de Resistência para Juntas Metálicas Coladas. 2007. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM. Universidade Federal Fluminense – UFF, Niterói, 2007.

SOARES, L.P. *et al.* Avaliação Comparativa, por Meio de Rugosimetria Tridimensional, de Diferentes Tratamentos Superficiais para Cimentação Adesiva de Compósitos. Publicação, reprodução, execução: direitos autorais. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 17, 2006, Foz do Iguaçu. Anais do Congresso de Publicações. p.11.

TEIXEIRA, Luís Manuel Barbosa Santos. Caracterização Do Comportamento Mecânico de Juntas de Sobreposição Simples Coladas Com Adesivos Estruturais. 2000. 197 f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Manutenção Industrial - PPGMI, Faculdade de Engenharia da Universidade Federal do Porto, Porto, 2000.

WASILKOSKI, Cleuza Maria. Comportamento Mecânico dos Materiais Poliméricos. 2006. 82f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia – PPGE, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

APÊNDICE-A – rugosidade e colagem

Tabela A.1: Resultados das análises de rugosidade, pré e pós ataque químico do lote 01 jateado.

12/04/2012 Amostra	Pós Jateamento abrasivo				Pós Ataque químico			
	Ra	Rq	Rt	Rz	Ra	Rq	Rt	Rz
1	12,2	19,5	113,0	58,3	12,3	19,3	114,0	60,7
2	12,2	20,0	112,0	57,9	11,4	19,3	104,0	58,2
3	15,4	24,8	127,0	70,2	12,0	19,5	107,0	59,2
4	10,7	16,8	101,0	52,1	9,7	16,7	110,0	51,1
5	7,2	12,6	81,9	39,3	8,0	12,5	76,8	41,8
Média:	11,5	18,7	107,0	55,6	10,7	17,5	102,4	54,2
Máximo:	15,4	24,8	127,0	70,2	12,3	19,5	114,0	60,7
Mínimo:	7,2	12,6	81,9	39,3	8,0	12,5	76,8	41,8
Desv. Padrao [%]	23,0	21,4	14,0	18,1	15,2	15,4	12,9	13,0

Tabela A.2: Resultados das análises de rugosidade, pré e pós ataque químico do lote 02 jateado.

12/07/2012 Amostra	Pós Jateamento abrasivo				Pós Ataque químico			
	Ra	Rq	Rt	Rz	Ra	Rq	Rt	Rz
1	9,6	15,8	94,9	50,0	9,2	15,1	93,7	50,5
2	14,5	22,9	127,0	69,5	13,8	22,0	125,4	65,6
3	10,3	16,9	92,8	51,8	9,9	16,7	90,5	49,3
4	11,9	18,9	112,0	57,6	12,0	18,1	111,4	56,4
5	10,8	18,0	105,0	55,1	11,1	17,7	95,1	54,0
Média:	11,4	18,5	106,3	56,8	11,2	17,9	103,2	55,2
Máximo:	14,5	22,9	127,0	69,5	13,8	22,0	125,4	65,6
Mínimo:	9,6	15,8	92,8	50,0	9,2	15,1	90,5	49,3
Desv. Padrao [%]	15,0	13,2	11,7	12,1	14,5	12,8	12,8	10,5

Tabela A.3: Resultados das análises de rugosidade, pré e pós ataque químico do lote 03 jateado.

31/08/2012 Amostra	Pós Jateamento abrasivo				Pós Ataque químico			
	Ra	Rq	Rt	Rz	Ra	Rq	Rt	Rz
1	8,7	13,4	82,4	44,0	8,5	12,4	81,1	41,6
2	8,8	14,0	78,9	44,4	8,6	13,2	80,3	45,0
3	9,3	14,4	78,4	46,0	9,4	12,6	81,4	47,1
4	9,0	13,3	76,1	44,1	9,1	13,0	83,5	45,0
5	9,7	17,7	91,5	47,8	9,5	17,2	93,1	47,1
6	9,5	14,4	85,8	46,7	9,0	13,7	85,3	47,4
7	10,2	15,6	89,7	50,2	10,3	14,6	93,1	48,6
Média:	9,3	14,7	83,3	46,2	9,2	13,8	85,4	46,0
Máximo:	10,2	17,7	91,5	50,2	10,3	17,2	93,1	48,6
Mínimo:	8,7	13,3	76,1	44,0	8,5	12,4	80,3	41,6
Desv. Padrao [%]	5,4	9,7	6,6	4,6	6,1	11,2	6,0	4,7

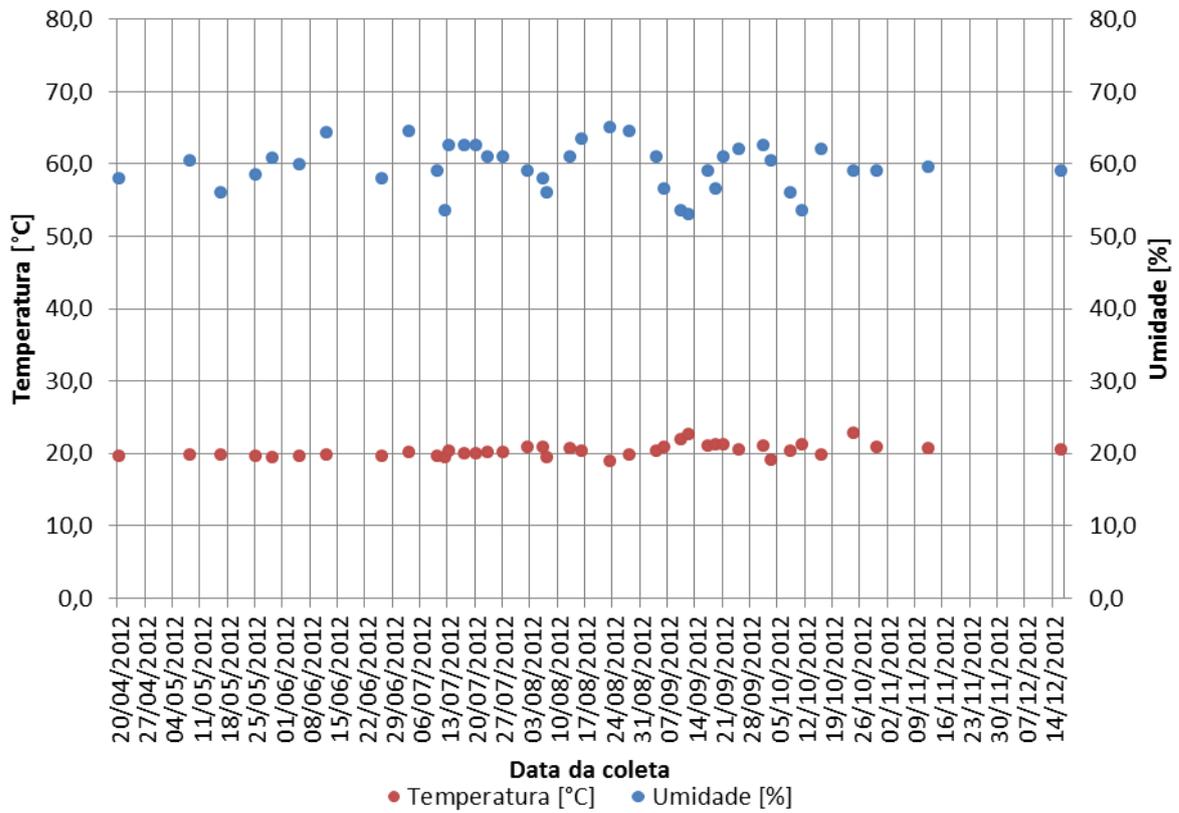
Tabela A.4: Parâmetros de colagem das juntas.

Lote	Atualizado. [dd/mm/aa]	Rugosidade (Rt) [mm]	Temp. Colag. [°C]	Umidade Colag. [%]	Tempo Trabalho [min]	Adesivo
38.E01	11/04/2012	102,4	21,0	69,0	13,0	MM
38.E02	12/04/2012	102,4	23,9	67,9	12,0	MM
38.E03	13/04/2012	102,4	23,1	61,1	15,0	MM
38.E04	26/04/2012	102,4	21,6	69,3	10,0	MM
38.E05	14/05/2012	102,4	20,8	65,6	10,0	FF
38.E06	22/05/2012	102,4	25,0	56,0	5,0	FF
38.E07	10/05/2012	102,4	25,0	69,0	6,0	FF
38.E08	04/06/2012	102,4	25,4	67,3	4,0	FF
38.E13	13/06/2012	102,4	25,1	60,3	6,0	FF
38.E16	10/07/2012	103,2	25,0	51,0	4,0	FF
38.E20	02/08/2012	103,2	21,8	69,2	8,0	MM
38.E21	05/09/2012	85,4	25,0	53,9	5,0	FF
38.E22	11/09/2012	85,4	25,1	60,3	5,0	FF

APÊNDICE-B – monitoramento da temperatura e umidade

	Temperatura [C°]			Umidade [%]		
	Min. T.	Máx. T.	Média T.	Min. U	Máx. U	Média U.
Média:	<u>17,8</u>	<u>22,7</u>	<u>20,3</u>	<u>48,3</u>	<u>71,3</u>	<u>59,8</u>
Máximo:	<u>19,7</u>	<u>26,6</u>	<u>22,8</u>	<u>57,4</u>	<u>79,0</u>	<u>65,0</u>
Mínimo:	<u>16,4</u>	<u>20,3</u>	<u>18,9</u>	<u>40,0</u>	<u>61,0</u>	<u>53,0</u>
Desv. Padrao [%]	<u>5,1</u>	<u>5,7</u>	<u>4,2</u>	<u>10,5</u>	<u>6,7</u>	<u>5,4</u>
Período:	16/09/2011			a	16/12/2012	

Monitoramento da temperatura e umidade



APÊNCIDE-C – ensaios de cisalhamento com o adesivo multi-metall

Tabela C.1.1: TMR1 - tensão média de ruptura das juntas ensaiadas no EPF. Valor encontrado [MPa]:

14,1

Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
38.E02.01	<u>1</u>	<u>4,2</u>	<u>14,9</u>	<u>19,9</u>	<u>60,5</u>	<u>0,2</u>	<u>105,5</u>	<u>08/05/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E02.02	<u>2</u>	<u>4,2</u>	<u>14,9</u>	<u>19,9</u>	<u>60,5</u>	<u>0,2</u>	<u>105,5</u>	<u>08/05/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E02.03	<u>3</u>	<u>3,8</u>	<u>13,5</u>	<u>19,9</u>	<u>60,5</u>	<u>0,1</u>	<u>95,5</u>	<u>08/05/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E02.04	<u>4</u>	<u>4,2</u>	<u>14,9</u>	<u>19,9</u>	<u>60,5</u>	<u>0,2</u>	<u>105,5</u>	<u>08/05/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E02.05	<u>5</u>	<u>3,8</u>	<u>13,5</u>	<u>19,9</u>	<u>60,5</u>	<u>0,1</u>	<u>95,5</u>	<u>08/05/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E01.06	<u>6</u>	<u>4,0</u>	<u>14,2</u>	<u>19,7</u>	<u>58,0</u>	<u>0,1</u>	<u>100,5</u>	<u>20/04/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E01.07	<u>7</u>	<u>4,0</u>	<u>14,2</u>	<u>19,7</u>	<u>58,0</u>	<u>0,1</u>	<u>100,5</u>	<u>20/04/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E01.08	<u>8</u>	<u>4,2</u>	<u>14,9</u>	<u>19,7</u>	<u>58,0</u>	<u>0,2</u>	<u>105,5</u>	<u>20/04/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E01.09	<u>9</u>	<u>3,6</u>	<u>12,8</u>	<u>19,7</u>	<u>58,0</u>	<u>0,1</u>	<u>90,5</u>	<u>20/04/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E01.10	<u>10</u>	<u>3,8</u>	<u>13,5</u>	<u>19,7</u>	<u>58,0</u>	<u>0,1</u>	<u>95,5</u>	<u>20/04/2012</u>	<u>EPF</u>
Média:	6	4,0	14,1	19,8	59,3	0,2	100,0	--	--
Máximo:	10	4,2	14,9	19,9	60,5	0,2	105,5	--	--
Mínimo:	1	3,6	12,8	19,7	58,0	0,1	90,5	--	--
Desv. Pad. [%]	--	5,2	5,2	0,4	2,1	5,7	5,2	--	--

Tabela C.1.2: TMR2 - tensão média de ruptura das juntas ensaiadas no EPF. Valor encontrado [MPa]:

13,6

Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
38.E20.06	<u>6</u>	<u>4,2</u>	<u>14,9</u>	<u>19,5</u>	<u>56,0</u>	<u>0,2</u>	<u>105,5</u>	<u>07/08/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E20.07	<u>7</u>	<u>3,6</u>	<u>12,8</u>	<u>19,5</u>	<u>56,0</u>	<u>0,1</u>	<u>90,5</u>	<u>07/08/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E20.08	<u>8</u>	<u>3,8</u>	<u>13,5</u>	<u>19,5</u>	<u>56,0</u>	<u>0,1</u>	<u>95,5</u>	<u>07/08/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E20.09	<u>9</u>	<u>3,8</u>	<u>13,5</u>	<u>19,5</u>	<u>56,0</u>	<u>0,1</u>	<u>95,5</u>	<u>07/08/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E20.10	<u>10</u>	<u>3,8</u>	<u>13,5</u>	<u>19,5</u>	<u>56,0</u>	<u>0,1</u>	<u>95,5</u>	<u>07/08/2012</u>	<u>EPF</u>
Média:	8	3,84	13,63	19,50	56,00	0,14	96,48	--	--
Máximo:	10	4,20	14,91	19,50	56,00	0,15	105,53	--	--
Mínimo:	6	3,60	12,78	19,50	56,00	0,13	90,45	--	--
Desv. Pad. [%]	--	5,10	5,10	0,00	0,00	3,81	5,10	--	--

Tabela C.1.3: TMR3 - tensão média de ruptura das juntas ensaiadas na SHIMADZU. Valor encontrado [MPa]:

14,6

Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
38.E03.01	<u>0</u>	<u>0,0</u>	<u>16,1</u>	<u>25,0</u>	<u>60,0</u>	<u>0,0</u>	<u>114,0</u>	<u>09/10/2012</u>	<u>shimadzu</u>
38.E03.02	<u>0</u>	<u>0,0</u>	<u>14,8</u>	<u>25,0</u>	<u>60,0</u>	<u>0,0</u>	<u>104,7</u>	<u>09/10/2012</u>	<u>shimadzu</u>
38.E03.03	<u>0</u>	<u>0,0</u>	<u>14,6</u>	<u>25,0</u>	<u>60,0</u>	<u>0,0</u>	<u>103,3</u>	<u>09/10/2012</u>	<u>shimadzu</u>
38.E03.04	<u>0</u>	<u>0,0</u>	<u>13,0</u>	<u>25,0</u>	<u>60,0</u>	<u>0,0</u>	<u>92,0</u>	<u>09/10/2012</u>	<u>shimadzu</u>
Média:	0	0,00	14,63	25,00	60,00	0,00	103,51	--	--
Máximo:	0	0,00	16,10	25,00	60,00	0,00	113,95	--	--
Mínimo:	0	0,00	13,00	25,00	60,00	0,00	92,01	--	--
Desv. Pad. [%]	--	#DIV/0!	7,53	0,00	0,00	#DIV/0!	7,53	--	--

Legenda:	Ensaio desconsiderado		-	-	Em adamento	
-----------------	-----------------------	--	---	---	-------------	--

Tensões Médias de Ruptura

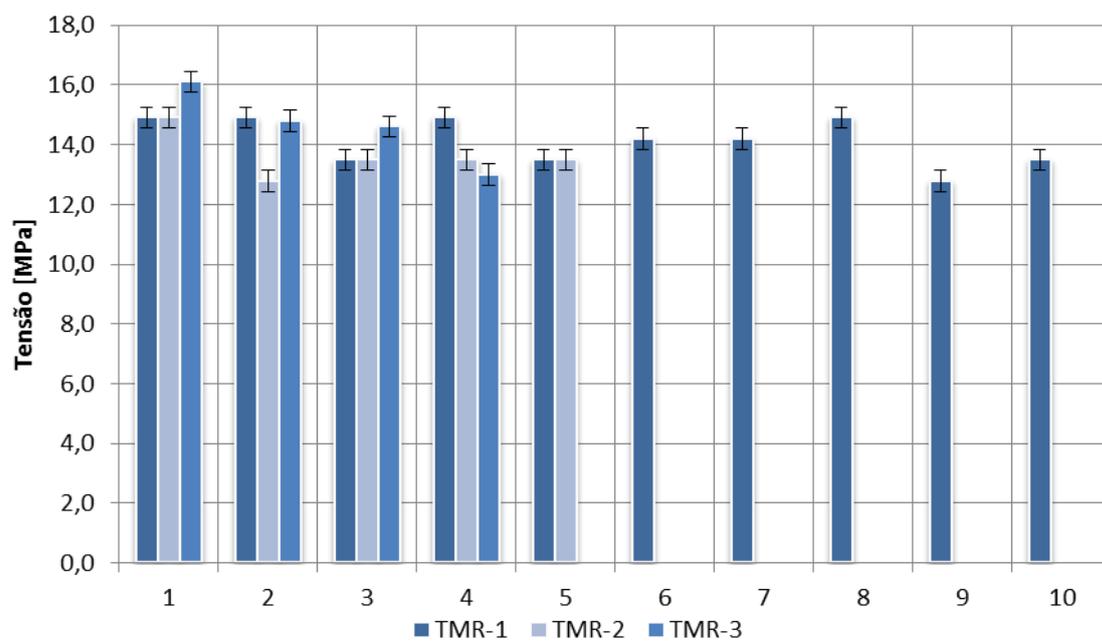


Tabela C.2.1: Teste de Fluência - Adesivo Multi-Metal - Grupo amostral para tensão de [MPa]:

11,4

Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
38.E04.01	<u>1</u>	<u>3,2</u>	<u>11,4</u>	<u>19,5</u>	<u>60,7</u>	<u>0,0</u>	<u>80,4</u>	<u>29/05/2012</u>	EPF
38.E04.02	<u>2</u>	<u>3,2</u>	<u>11,4</u>	<u>19,5</u>	<u>60,7</u>	<u>0,2</u>	<u>80,4</u>	<u>29/05/2012</u>	EPF
38.E04.03	<u>3</u>	<u>3,2</u>	<u>11,4</u>	<u>19,5</u>	<u>60,7</u>	<u>14,8</u>	<u>80,4</u>	<u>29/05/2012</u>	EPF
38.E04.04	<u>4</u>	<u>3,2</u>	<u>11,4</u>	<u>19,5</u>	<u>60,7</u>	<u>42,5</u>	<u>80,4</u>	<u>29/05/2012</u>	EPF
38.E04.05	<u>5</u>	<u>3,2</u>	<u>11,4</u>	<u>19,5</u>	<u>60,7</u>	<u>0,3</u>	<u>80,4</u>	<u>29/05/2012</u>	EPF
38.E04.06	<u>6</u>	<u>3,2</u>	<u>11,4</u>	<u>19,5</u>	<u>60,7</u>	<u>0,3</u>	<u>80,4</u>	<u>29/05/2012</u>	EPF
38.E04.07	<u>7</u>	<u>3,2</u>	<u>11,4</u>	<u>19,5</u>	<u>60,7</u>	<u>0,2</u>	<u>80,4</u>	<u>29/05/2012</u>	EPF
38.E04.08	<u>8</u>	<u>3,2</u>	<u>11,4</u>	<u>19,5</u>	<u>60,7</u>	<u>0,2</u>	<u>80,4</u>	<u>29/05/2012</u>	EPF
38.E04.09	<u>9</u>	<u>3,2</u>	<u>11,4</u>	<u>19,5</u>	<u>60,7</u>	<u>0,2</u>	<u>80,4</u>	<u>29/05/2012</u>	EPF
38.E04.10	<u>10</u>	<u>3,2</u>	<u>11,4</u>	<u>19,5</u>	<u>60,7</u>	<u>21,3</u>	<u>80,4</u>	<u>29/05/2012</u>	EPF
Média:	6	3,2	11,4	19,5	60,7	8,0	80,4	--	--
Máximo:	10	3,2	11,4	19,5	60,7	42,5	80,4	--	--
Mínimo:	1	3,2	11,4	19,5	60,7	0,0	80,4	--	--
Desv. Pad. [%]	--	0,0	0,0	0,0	0,0	169,7	0,0	--	--

Tabela C.2.2: Teste de Fluência - Adesivo Multi-Metal - Grupo amostral para tensão de [MPa]:

9,9

Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
03.02	<u>2</u>	<u>2,8</u>	<u>9,9</u>	<u>19,5</u>	<u>63,1</u>	<u>2500,0</u>	<u>70,4</u>	<u>23/12/2011</u>	EPF
03.03	<u>3</u>	<u>2,8</u>	<u>9,9</u>	<u>19,5</u>	<u>63,1</u>	<u>2500,0</u>	<u>70,4</u>	<u>23/12/2011</u>	EPF
03.01	<u>1</u>	<u>2,8</u>	<u>9,9</u>	<u>19,5</u>	<u>63,1</u>	<u>1581,2</u>	<u>70,4</u>	<u>23/12/2011</u>	EPF
03.04	<u>4</u>	<u>2,8</u>	<u>9,9</u>	<u>19,5</u>	<u>63,1</u>	<u>1833,9</u>	<u>70,4</u>	<u>23/12/2011</u>	EPF
03.05	<u>5</u>	<u>2,8</u>	<u>9,9</u>	<u>19,8</u>	<u>64,9</u>	<u>427,4</u>	<u>70,4</u>	<u>21/10/2011</u>	EPF
Média:	3	2,8	9,9	19,5	63,4	1280,8	70,4	--	--
Máximo:	5	2,8	9,9	19,8	64,9	1833,9	70,4	--	--
Mínimo:	1	2,8	9,9	19,5	63,1	427,4	70,4	--	--
Desv. Pad. [%]	--	0,0	0,0	0,7	1,1	47,8	0,0	--	--

Tabela C.2.3: Teste de Fluência - Adesivo Multi-Metal - Grupo amostral para tensão de [MPa]:

8,5

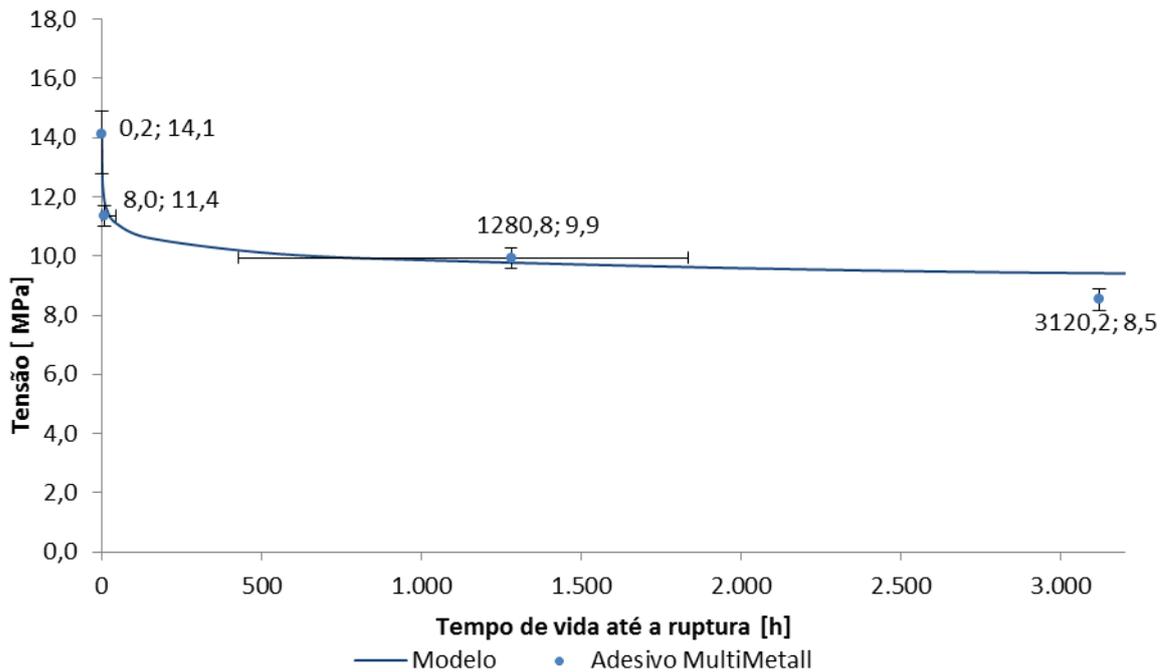
Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
01.01	<u>1</u>	<u>2,4</u>	<u>8,5</u>	<u>19,0</u>	<u>62,2</u>	<u>1100,0</u>	<u>60,3</u>	<u>16/09/2011</u>	EPF
01.07	<u>2</u>	<u>2,4</u>	<u>8,5</u>	<u>19,0</u>	<u>62,2</u>	<u>1100,0</u>	<u>60,3</u>	<u>16/09/2011</u>	EPF
01.08	<u>3</u>	<u>2,4</u>	<u>8,5</u>	<u>19,0</u>	<u>62,2</u>	<u>1100,0</u>	<u>60,3</u>	<u>16/09/2011</u>	EPF
01.09	<u>4</u>	<u>2,4</u>	<u>8,5</u>	<u>19,0</u>	<u>62,2</u>	<u>1100,0</u>	<u>60,3</u>	<u>16/09/2011</u>	EPF
01.10	<u>5</u>	<u>2,4</u>	<u>8,5</u>	<u>19,0</u>	<u>62,2</u>	<u>1100,0</u>	<u>60,3</u>	<u>16/09/2011</u>	EPF
38.E03.07	<u>6</u>	<u>2,4</u>	<u>8,5</u>	<u>20,2</u>	<u>61,0</u>	<u>237,0</u>	<u>60,3</u>	<u>23/07/2012</u>	EPF
38.E03.06	<u>7</u>	<u>2,4</u>	<u>8,5</u>	<u>20,2</u>	<u>61,0</u>	<u>623,7</u>	<u>60,3</u>	<u>23/07/2012</u>	EPF
38.E03.08	<u>8</u>	<u>2,4</u>	<u>8,5</u>	<u>20,2</u>	<u>61,0</u>	<u>1127,9</u>	<u>60,3</u>	<u>23/07/2012</u>	EPF
38.E03.09	<u>9</u>	<u>2,4</u>	<u>8,5</u>	<u>20,2</u>	<u>61,0</u>	<u>1127,9</u>	<u>60,3</u>	<u>23/07/2012</u>	EPF
38.E03.05	<u>10</u>	<u>2,4</u>	<u>8,5</u>	<u>20,2</u>	<u>61,0</u>	<u>237,1</u>	<u>60,3</u>	<u>23/07/2012</u>	EPF
Média:	6	2,4	8,5	19,6	61,6	--	60,3	--	--
Máximo:	10	2,4	8,5	20,2	62,2	--	60,3	--	--
Mínimo:	1	2,4	8,5	19,0	61,0	--	60,3	--	--
Desv. Pad. [%]	--	0,0	0,0	3,1	1,0	--	0,0	--	--

Legenda:	Ensaio desconsiderado		-	-	Em adamento	
-----------------	-----------------------	--	---	---	-------------	--

Tabela C.2.4: Teste de Fluência - Adesivo Multi-Metal - Grupo amostral para tensão de [MPa]:

8,5

Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
38.E20.05	<u>6</u>	<u>2,4</u>	<u>8,5</u>	<u>20,6</u>	<u>59,0</u>	<u>3120,2</u>	<u>60,3</u>	<u>16/12/2012</u>	EPF
38.E20.04	<u>7</u>	<u>2,4</u>	<u>8,5</u>	<u>20,6</u>	<u>59,0</u>	<u>3120,2</u>	<u>60,3</u>	<u>16/12/2012</u>	EPF
38.E20.03	<u>8</u>	<u>2,4</u>	<u>8,5</u>	<u>20,6</u>	<u>59,0</u>	<u>3120,2</u>	<u>60,3</u>	<u>16/12/2012</u>	EPF
38.E20.02	<u>9</u>	<u>2,4</u>	<u>8,5</u>	<u>20,6</u>	<u>59,0</u>	<u>3120,2</u>	<u>60,3</u>	<u>16/12/2012</u>	EPF
38.E20.01	<u>10</u>	<u>2,4</u>	<u>8,5</u>	<u>20,6</u>	<u>59,0</u>	<u>3120,2</u>	<u>60,3</u>	<u>16/12/2012</u>	EPF
Média:	8	2,4	8,5	20,6	59,0	3120,2	60,3	--	--
Máximo:	10	2,4	8,5	20,6	59,0	3120,2	60,3	--	--
Mínimo:	6	2,4	8,5	20,6	59,0	3120,2	60,3	--	--
Desv. Pad. [%]	--	<u>0,0</u>	<u>0,0</u>	<u>0,0</u>	<u>0,0</u>	<u>0,0</u>	<u>0,0</u>	--	--



Legenda:	Ensaio desconsiderado		-	-	Em adamento	
-----------------	-----------------------	--	---	---	-------------	--

APÊNDICE-D – ensaios de cisalhamento com o adesivo fusor

Tabela D.1.1: TMR1 - tensão média de ruptura das juntas ensaiadas no EPF. Valor encontrado [MPa]:

15,0

Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
38.E06.01	<u>1</u>	4,4	15,6	19,7	58,6	0,2	104,3	25/05/2012	EPF
38.E06.02	<u>2</u>	4,4	15,6	19,7	58,6	0,2	104,3	25/05/2012	EPF
38.E06.03	<u>3</u>	4,2	14,9	19,7	58,6	0,2	99,5	25/05/2012	EPF
38.E06.04	<u>4</u>	4,2	14,9	19,7	58,6	0,2	99,5	25/05/2012	EPF
38.E06.05	<u>5</u>	4,0	14,2	19,7	58,6	0,1	94,8	25/05/2012	EPF
38.E06.06	<u>6</u>	4,4	15,6	19,7	58,6	0,2	104,3	25/05/2012	EPF
38.E06.07	<u>7</u>	4,0	14,2	19,7	58,6	0,1	94,8	25/05/2012	EPF
38.E06.08	<u>8</u>	4,2	14,9	19,7	58,6	0,2	99,5	25/05/2012	EPF
38.E06.09	<u>9</u>	4,4	15,6	19,7	58,6	0,2	104,3	25/05/2012	EPF
38.E06.10	<u>10</u>	4,0	14,2	19,7	58,6	0,1	94,8	25/05/2012	EPF
Média:	6	4,2	15,0	19,7	58,6	0,2	100,0	--	--
Máximo:	10	4,4	15,6	19,7	58,6	0,2	104,3	--	--
Mínimo:	1	4,0	14,2	19,7	58,6	0,1	94,8	--	--
Desv. Pad. [%]	--	3,9	3,9	0,0	0,0	6,4	3,9	--	--

Tabela D.1.2: TMR2 - tensão média de ruptura das juntas ensaiadas no EPF. Valor encontrado [MPa]:

13,5

Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
38.E21.01	<u>1</u>	3,4	12,1	20,9	56,5	0,1	80,6	06/09/2012	EPF
38.E21.02	<u>2</u>	4,4	15,6	20,9	56,5	0,2	104,3	06/09/2012	EPF
38.E21.03	<u>3</u>	3,8	13,5	20,9	56,5	0,1	90,0	06/09/2012	EPF
38.E21.04	<u>4</u>	3,8	13,5	20,9	56,5	0,1	90,0	06/09/2012	EPF
38.E21.05	<u>5</u>	3,6	12,8	20,9	56,5	0,1	85,3	06/09/2012	EPF
Média:	3	3,8	13,5	20,9	56,5	0,1	90,0	--	--
Máximo:	5	4,4	15,6	20,9	56,5	0,2	104,3	--	--
Mínimo:	1	3,4	12,1	20,9	56,5	0,1	80,6	--	--
Desv. Pad. [%]	--	8,8	8,8	0,0	0,0	9,8	8,8	--	--

Tabela D.1.3: TMR3 - tensão média de ruptura das juntas ensaiadas no EPF. Valor encontrado [MPa]:

13,8

Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
38.E22.01	<u>1</u>	3,8	13,5	22,6	53,0	0,1	90,0	12/09/2012	EPF
38.E22.02	<u>2</u>	4,0	14,2	22,6	53,0	0,2	94,8	12/09/2012	EPF
38.E22.03	<u>3</u>	4,0	14,2	22,6	53,0	0,2	94,8	12/09/2012	EPF
38.E22.04	<u>4</u>	4,4	15,6	22,6	53,0	0,2	104,3	12/09/2012	EPF
38.E22.05	<u>5</u>	3,2	11,4	22,6	53,0	0,1	75,8	12/09/2012	EPF
Média:	3	3,9	13,8	22,6	53,0	0,1	91,9	--	--
Máximo:	5	4,4	15,6	22,6	53,0	0,2	104,3	--	--
Mínimo:	1	3,2	11,4	22,6	53,0	0,1	75,8	--	--
Desv. Pad. [%]	--	10,1	10,1	0,0	0,0	11,3	10,1	--	--

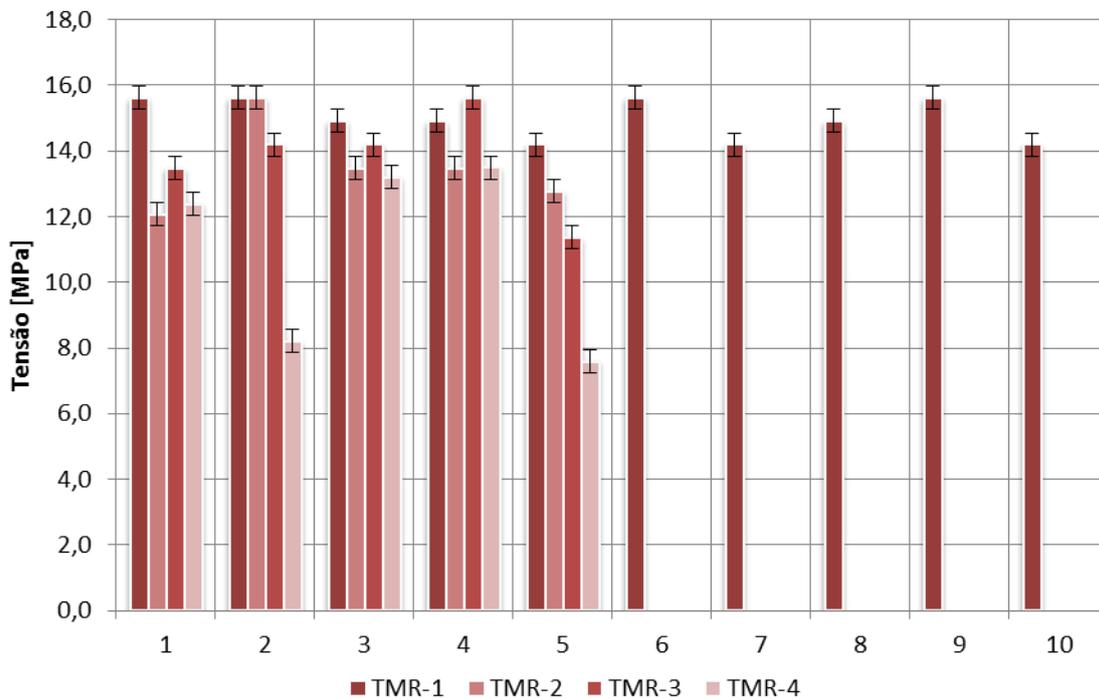
Legenda:	Ensaio desconsiderado		-	-	Em adamento	
-----------------	-----------------------	---	---	---	-------------	---

Tabela D.1.1: TMR4 - tensão média de ruptura das juntas ensaiadas no EPF. Valor encontrado [MPa]:

11,0

Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
38.E16.01	0	0,0	12,4	25,0	60,0	0,0	82,8	09/10/2012	shimadzu
38.E16.02	0	0,0	8,2	25,0	60,0	0,0	54,7	09/10/2012	shimadzu
38.E16.03	0	0,0	13,2	25,0	60,0	0,0	88,1	09/10/2012	shimadzu
38.E16.04	0	0,0	13,5	25,0	60,0	0,0	90,1	09/10/2012	shimadzu
38.E16.05	0	0,0	7,6	25,0	60,0	0,0	50,7	09/10/2012	shimadzu
Média:	0	0,00	10,98	25,00	60,00	0,00	73,29	--	--
Máximo:	0	0,00	13,50	25,00	60,00	0,00	90,11	--	--
Mínimo:	0	0,00	7,60	25,00	60,00	0,00	50,73	--	--
Dev. Pad. [%]	--	#DIV/0!	23,20	0,00	0,00	#DIV/0!	23,20	--	--

Tensões Médias de Ruptura



Legenda:	Ensaio desconsiderado	-	-	Em adamento	-
-----------------	-----------------------	---	---	-------------	---

Tabela D.2.1: Teste de Fluência - Grupo amostral para tensão de [MPa]:

10,7

Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
38.E07.05	<u>5</u>	<u>3,0</u>	<u>10,7</u>	<u>19,6</u>	<u>59,9</u>	<u>0,4</u>	<u>71,1</u>	<u>05/06/2012</u>	EPF
38.E07.06	<u>6</u>	<u>3,0</u>	<u>10,7</u>	<u>19,6</u>	<u>59,9</u>	<u>0,4</u>	<u>71,1</u>	<u>05/06/2012</u>	EPF
38.E07.08	<u>8</u>	<u>3,0</u>	<u>10,7</u>	<u>19,6</u>	<u>59,9</u>	<u>0,6</u>	<u>71,1</u>	<u>05/06/2012</u>	EPF
38.E07.09	<u>9</u>	<u>3,0</u>	<u>10,7</u>	<u>19,6</u>	<u>59,9</u>	<u>0,5</u>	<u>71,1</u>	<u>05/06/2012</u>	EPF
38.E07.10	<u>10</u>	<u>3,0</u>	<u>10,7</u>	<u>19,6</u>	<u>59,9</u>	<u>0,4</u>	<u>71,1</u>	<u>05/06/2012</u>	EPF
Média:	8	3,0	10,7	19,6	59,9	0,5	71,1	--	--
Máximo:	10	3,0	10,7	19,6	59,9	0,6	71,1	--	--
Mínimo:	5	3,0	10,7	19,6	59,9	0,4	71,1	--	--
Desv. Pad. [%]	--	0,0	0,0	0,0	0,0	15,3	0,0	--	--

Tabela D.2.2: Teste de Fluência - Grupo amostral para tensão de [MPa]:

9,9

Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
38.E07.01	<u>1</u>	<u>2,8</u>	<u>9,9</u>	<u>19,6</u>	<u>59,9</u>	<u>0,1</u>	<u>66,4</u>	<u>05/06/2012</u>	EPF
38.E07.02	<u>2</u>	<u>2,8</u>	<u>9,9</u>	<u>19,6</u>	<u>59,9</u>	<u>0,1</u>	<u>66,4</u>	<u>05/06/2012</u>	EPF
38.E07.03	<u>3</u>	<u>2,8</u>	<u>9,9</u>	<u>19,6</u>	<u>59,9</u>	<u>0,1</u>	<u>66,4</u>	<u>05/06/2012</u>	EPF
38.E07.04	<u>4</u>	<u>2,8</u>	<u>9,9</u>	<u>19,6</u>	<u>59,9</u>	<u>0,2</u>	<u>66,4</u>	<u>05/06/2012</u>	EPF
38.E07.07	<u>7</u>	<u>2,8</u>	<u>9,9</u>	<u>19,6</u>	<u>59,9</u>	<u>0,1</u>	<u>66,4</u>	<u>05/06/2012</u>	EPF
Média:	3	2,8	9,9	19,6	59,9	0,1	66,4	--	--
Máximo:	7	2,8	9,9	19,6	59,9	0,2	66,4	--	--
Mínimo:	1	2,8	9,9	19,6	59,9	0,1	66,4	--	--
Desv. Pad. [%]	--	0,0	0,0	0,0	0,0	20,1	0,0	--	--

Tabela D.2.3: Teste de Fluência - Grupo amostral para tensão de [MPa]:

9,2

Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
38.E08.01	<u>1</u>	<u>2,6</u>	<u>9,2</u>	<u>19,8</u>	<u>64,4</u>	<u>10,9</u>	<u>61,6</u>	<u>12/06/2012</u>	EPF
38.E08.02	<u>2</u>	<u>2,6</u>	<u>9,2</u>	<u>19,8</u>	<u>64,4</u>	<u>6,0</u>	<u>61,6</u>	<u>12/06/2012</u>	EPF
38.E08.03	<u>3</u>	<u>2,6</u>	<u>9,2</u>	<u>19,8</u>	<u>64,4</u>	<u>1,7</u>	<u>61,6</u>	<u>12/06/2012</u>	EPF
Média:	2	2,6	9,2	19,8	64,4	6,2	61,6	--	--
Máximo:	3	2,6	9,2	19,8	64,4	10,9	61,6	--	--
Mínimo:	1	2,6	9,2	19,8	64,4	1,7	61,6	--	--
Desv. Pad. [%]	--	0,0	0,0	0,0	0,0	60,4	0,0	--	--

Tabela D.2.4: Teste de Fluência - Grupo amostral para tensão de [MPa]:

7,8

Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
38.E08.04	<u>4</u>	<u>2,2</u>	<u>7,8</u>	<u>19,8</u>	<u>64,4</u>	<u>59,1</u>	<u>52,1</u>	<u>12/06/2012</u>	EPF
38.E08.05	<u>5</u>	<u>2,2</u>	<u>7,8</u>	<u>19,8</u>	<u>64,4</u>	<u>98,7</u>	<u>52,1</u>	<u>12/06/2012</u>	EPF
38.E08.06	<u>6</u>	<u>2,2</u>	<u>7,8</u>	<u>19,8</u>	<u>64,4</u>	<u>30,8</u>	<u>52,1</u>	<u>12/06/2012</u>	EPF
Média:	5	2,2	7,8	19,8	64,4	62,9	52,1	--	--
Máximo:	6	2,2	7,8	19,8	64,4	98,7	52,1	--	--
Mínimo:	4	2,2	7,8	19,8	64,4	30,8	52,1	--	--
Desv. Pad. [%]	--	0,0	0,0	0,0	0,0	44,3	0,0	--	--

Legenda:	Ensaio desconsiderado		-	-	Em adamento	
-----------------	-----------------------	---	---	---	-------------	---

Tabela D.2.5: Teste de Fluência - Grupo amostral para tensão de [MPa]:

7,1

Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
38.E08.07	<u>1</u>	<u>2,0</u>	<u>7,1</u>	<u>19,6</u>	<u>57,9</u>	<u>387,4</u>	<u>47,4</u>	<u>26/06/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E08.08	<u>2</u>	<u>2,0</u>	<u>7,1</u>	<u>20,0</u>	<u>62,5</u>	<u>889,3</u>	<u>47,4</u>	<u>17/07/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E08.09	<u>3</u>	<u>2,0</u>	<u>7,1</u>	<u>19,6</u>	<u>57,9</u>	<u>324,2</u>	<u>47,4</u>	<u>26/06/2012</u>	<u>EPF</u>
Média:	2	2,0	7,1	19,7	59,4	533,6	47,4	--	--
Máximo:	3	2,0	7,1	20,0	62,5	889,3	47,4	--	--
Mínimo:	1	2,0	7,1	19,6	57,9	324,2	47,4	--	--
Desv. Pad. [%]	--	0,0	0,0	1,0	3,6	47,4	0,0	--	--

Tabela C.2.6: Teste de Fluência - Grupo amostral para tensão de [MPa]:

7,1

Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
38.E08.10	<u>7</u>	<u>2,0</u>	<u>7,1</u>	<u>20,2</u>	<u>64,5</u>	<u>69,3</u>	<u>47,4</u>	<u>03/07/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E13.05	<u>5</u>	<u>2,0</u>	<u>7,1</u>	<u>20,2</u>	<u>64,5</u>	<u>1,2</u>	<u>47,4</u>	<u>03/07/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E13.06	<u>4</u>	<u>2,0</u>	<u>7,1</u>	<u>19,6</u>	<u>57,9</u>	<u>0,3</u>	<u>47,4</u>	<u>26/06/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E13.09	<u>10</u>	<u>2,0</u>	<u>7,1</u>	<u>20,2</u>	<u>64,5</u>	<u>3,6</u>	<u>47,4</u>	<u>03/07/2012</u>	<u>EPF</u>
Média:	7	2,0	7,1	20,0	62,9	18,6	47,4	--	--
Máximo:	10	2,0	7,1	20,2	64,5	69,3	47,4	--	--
Mínimo:	4	2,0	7,1	19,6	57,9	0,3	47,4	--	--
Desv. Pad. [%]	--	0,0	0,0	1,2	4,5	157,5	0,0	--	--

Tabela D.2.7: Teste de Fluência - Grupo amostral para tensão de [MPa]:

7,1

Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
38.E21.08	<u>3</u>	<u>2,0</u>	<u>7,1</u>	<u>22,0</u>	<u>53,5</u>	<u>66,0</u>	<u>47,4</u>	<u>10/09/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E21.09	<u>2</u>	<u>2,0</u>	<u>7,1</u>	<u>22,0</u>	<u>53,5</u>	<u>64,1</u>	<u>47,4</u>	<u>10/09/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E21.10	<u>1</u>	<u>2,0</u>	<u>7,1</u>	<u>22,0</u>	<u>53,5</u>	<u>91,9</u>	<u>47,4</u>	<u>10/09/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E22.09	<u>4</u>	<u>2,0</u>	<u>7,1</u>	<u>21,2</u>	<u>56,5</u>	<u>135,0</u>	<u>47,4</u>	<u>19/09/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E22.10	<u>5</u>	<u>2,0</u>	<u>7,1</u>	<u>20,7</u>	<u>59,5</u>	<u>1003,3</u>	<u>47,4</u>	<u>12/11/2012</u>	<u>EPF</u>
Média:	3	2,0	7,1	21,6	55,3	272,0	47,4	--	--
Máximo:	5	2,0	7,1	22,0	59,5	1003,3	47,4	--	--
Mínimo:	1	2,0	7,1	20,7	53,5	64,1	47,4	--	--
Desv. Pad. [%]	--	0,0	0,0	2,4	4,3	134,7	0,0	--	--

Tabela D.2.8: Teste de Fluência - Grupo amostral para tensão de [MPa]:

6,4

Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
38.E13.07	<u>3</u>	<u>1,8</u>	<u>6,4</u>	<u>19,6</u>	<u>57,9</u>	<u>0,4</u>	<u>42,7</u>	<u>26/06/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E13.08	<u>1</u>	<u>1,8</u>	<u>6,4</u>	<u>20,2</u>	<u>64,5</u>	<u>23,2</u>	<u>42,7</u>	<u>03/07/2012</u>	<u>EPF</u>
Média:	2	1,8	6,4	19,9	61,2	11,8	42,7	--	--
Máximo:	3	1,8	6,4	20,2	64,5	23,2	42,7	--	--
Mínimo:	1	1,8	6,4	19,6	57,9	0,4	42,7	--	--
Desv. Pad. [%]	--	0,0	0,0	1,4	5,4	96,4	0,0	--	--

Legenda:	Ensaio desconsiderado		-	-	Em adamento	
-----------------	-----------------------	--	---	---	-------------	--

Tabela D.2.9: Teste de Fluência - Grupo amostral para tensão de [MPa]:

6,4

Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
38.E13.01	<u>4</u>	<u>1,8</u>	<u>6,4</u>	<u>20,2</u>	<u>64,5</u>	<u>48,9</u>	<u>42,7</u>	<u>03/07/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E13.02	<u>5</u>	<u>1,8</u>	<u>6,4</u>	<u>20,2</u>	<u>64,5</u>	<u>6,8</u>	<u>42,7</u>	<u>03/07/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E13.03	<u>6</u>	<u>1,8</u>	<u>6,4</u>	<u>20,2</u>	<u>64,5</u>	<u>174,0</u>	<u>42,7</u>	<u>03/07/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E13.04	<u>7</u>	<u>1,8</u>	<u>6,4</u>	<u>20,2</u>	<u>64,5</u>	<u>82,9</u>	<u>42,7</u>	<u>03/07/2012</u>	<u>EPF</u>
Média:	6	1,8	6,4	20,2	64,5	78,1	42,7	--	--
Máximo:	7	1,8	6,4	20,2	64,5	174,0	42,7	--	--
Mínimo:	4	1,8	6,4	20,2	64,5	6,8	42,7	--	--
Desv. Pad. [%]	--	0,0	0,0	0,0	0,0	78,7	0,0	--	--

Tabela D.2.10: Teste de Fluência - Grupo amostral para tensão de [MPa]:

6,4

Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
38.E21.06	<u>5</u>	<u>1,8</u>	<u>6,4</u>	<u>22,0</u>	<u>53,5</u>	<u>16,8</u>	<u>42,7</u>	<u>10/09/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E21.07	<u>4</u>	<u>1,8</u>	<u>6,4</u>	<u>20,7</u>	<u>59,5</u>	<u>1607,4</u>	<u>42,7</u>	<u>12/11/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E22.06	<u>1</u>	<u>1,8</u>	<u>6,4</u>	<u>20,4</u>	<u>56,0</u>	<u>540,8</u>	<u>42,7</u>	<u>08/10/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E22.07	<u>2</u>	<u>1,8</u>	<u>6,4</u>	<u>20,4</u>	<u>56,0</u>	<u>568,8</u>	<u>42,7</u>	<u>08/10/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E22.08	<u>3</u>	<u>1,8</u>	<u>6,4</u>	<u>19,8</u>	<u>62,0</u>	<u>728,8</u>	<u>42,7</u>	<u>16/10/2012</u>	<u>EPF</u>
Média:	3	1,8	6,4	20,7	57,4	861,4	42,7	--	--
Máximo:	5	1,8	6,4	22,0	62,0	1607,4	42,7	--	--
Mínimo:	1	1,8	6,4	19,8	53,5	540,8	42,7	--	--
Desv. Pad. [%]	--	0,0	0,0	3,5	5,2	50,7	0,0	--	--

Tabela D.2.11: Teste de Fluência - Grupo amostral para tensão de [MPa]:

5,0

Corpo de prova	Unidade de ensaio	Pressão [bar]	Tensão (τ) [Mpa]	Temp. [C°]	UR [%]:	Tempo [h]	%	Atualizado [dd/mm/aaaa]:	Equipam. de teste
38.E13.10	<u>1</u>	<u>1,4</u>	<u>5,0</u>	<u>19,5</u>	<u>53,5</u>	<u>1,7</u>	<u>33,2</u>	<u>12/07/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E16.06	<u>2</u>	<u>1,4</u>	<u>5,0</u>	<u>20,7</u>	<u>61,0</u>	<u>480,1</u>	<u>33,2</u>	<u>13/08/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E16.07	<u>1</u>	<u>1,4</u>	<u>5,0</u>	<u>20,3</u>	<u>63,5</u>	<u>490,3</u>	<u>33,2</u>	<u>16/08/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E16.08	<u>4</u>	<u>1,4</u>	<u>5,0</u>	<u>20,7</u>	<u>61,0</u>	<u>522,0</u>	<u>33,2</u>	<u>13/08/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E16.09	<u>3</u>	<u>1,4</u>	<u>5,0</u>	<u>20,7</u>	<u>61,0</u>	<u>475,9</u>	<u>33,2</u>	<u>13/08/2012</u>	<u>EPF</u>
38.E16.10	<u>5</u>	<u>1,4</u>	<u>5,0</u>	<u>20,0</u>	<u>62,5</u>	<u>191,9</u>	<u>33,2</u>	<u>20/07/2012</u>	<u>EPF</u>
Média:	3	1,4	5,0	20,3	60,4	432,0	33,2	--	--
Máximo:	5	1,4	5,0	20,7	63,5	522,0	33,2	--	--
Mínimo:	1	1,4	5,0	19,5	53,5	191,9	33,2	--	--
Desv. Pad. [%]	--	0,0	0,0	2,1	5,4	28,0	0,0	--	--

Legenda:	Ensaio desconsiderado		-	-	Em adamento	
-----------------	-----------------------	--	---	---	-------------	--

