



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto Politécnico

Ricardo Hudson da Silva

**Estudo do fator de forma de área em reparo com chapa colada em
tubulações com furo**

Nova Friburgo

2015

Ricardo Hudson da Silva

Estudo do fator de forma de área em reparo com chapa colada em tubulações com furo

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

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio

Nova Friburgo
2015

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

S586 Silva, Ricardo Hudson da.
Estudo do fator de forma de área em reparo com
chapa colada em tubulações com furo / Ricardo Hudson da
Silva. - 2015.
99 f. : il.

Orientador: Eduardo Martins Sampaio.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do
Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Tubos - Manutenção e reparos - Teses. 2.
Tubulações - Manutenção e reparos - Teses. 3. Adesivos -
Reparos e reconstrução - Teses. 4. Adesão - Teses. I.
Sampaio, Eduardo Martins. II. Universidade do Estado do
Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. III. Título.

CDU 621.643-77

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

Assinatura

Data

Ricardo Hudson da Silva

Estudo do fator de forma de área em reparo com chapa colada em tubulações com furo

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

Aprovada em ____ de _____ de 2015.

Banca examinadora:

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

Prof. Dr. Antônio Henrique Monteiro da Fonseca Thomé da Silva
Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis
Instituto Politécnico - UERJ

Prof. Dr. Silvio de Barros
CEFET –RJ

Nova Friburgo

2015

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Manoel Hudson da Silva e Maria das Graças da Silva pelo êxito na
educação de valores de seus filhos;
A minha esposa Alessandra Santos Araújo e minha filha Milena Hudson da Silva pelo
incentivo e apoio incondicional na realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por iluminar os meus caminhos ao longo desta etapa.

A minha esposa Alessandra e minha filha Milena pela compreensão e carinho.

Ao meu orientador Prof.: Dr. Eduardo Martins Sampaio pela oportunidade, incentivo, companheirismo, amizade e ensinamento.

Ao Prof.: Dr. Antônio Henrique Monteiro da Fonseca Thomé da Silva pela realização dos testes estatísticos.

Aos funcionários da Biblioteca do IPRJ/UERJ por toda presteza e dedicação.

Ao Instituto Politécnico / UERJ pela oportunidade da realização deste curso.

Aos professores da pós em Ciência e Tecnologia de Materiais pela dedicação dispensada ao curso.

Ao meu amigo Ney Robson Ferreira Rohem pela grande ajuda dispensada na realização deste trabalho.

Ao técnico Anselmo Luiz Duarte por toda disposição na realização das colagens e testes hidrostáticos.

Ao técnico do LAA Marcelo pelas medidas de rugosidade das chapas.

Aos técnicos da oficina mecânica, Jorge Ricardo de A. Costa e Umberto Allan Franco pelo incentivo, corte e desenho das chapas.

A toda equipe do Laboratório de Adesão e Aderência (LAA) por todo apoio e incentivo.

Aos funcionários da secretaria da pós pela atenção apresentada.

A felicidade é um sentimento simples; você pode encontrá-la e deixá-la ir embora, por não perceber a sua simplicidade.

MahatmaGandhi

RESUMO

SILVA, Ricardo Hudson. *Estudo do fator de forma de área em reparo com chapa colada em tubulações com furo*. 2015. 99 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2015.

Este trabalho tem por finalidade o estudo da resistência à pressão hidrostática do reparo realizado com chapa de aço de baixo carbono, colada com adesivo estrutural à base de epóxi em tubulações de aço com furo. Tubulações de parede fina, sob pressão interna, a tensão na direção longitudinal é a metade da tensão circunferencial do tubo, deste modo, o fator de forma da área do reparo, ou seja, a variação das dimensões da chapa nas direções longitudinal e circunferencial do tubo foi investigado. A influência da força de falha do reparo, quando varia-se a dimensão da chapa nas direções citadas, foram analisadas estatisticamente utilizando-se um planejamento fatorial de experimentos. Altos valores de resistência hidrostática do reparo foram encontrados (em torno de 240 bar) quando comparados com as pressões normais de trabalho (em torno de 70 bar) de uma tubulação similar as utilizadas nos testes. Os resultados da pressão de falha do reparo dos 10 grupos analisados apresentaram desvios padrão pequenos, menor que 12 %, demonstrando a eficiência dos procedimentos adotados na confecção do reparo. Os estudos demonstram a não existência de um fator de forma na resistência do reparo devido a variação nas dimensões da chapa nas direções longitudinal e circunferencial do tubo bem como a alta influência na resistência do reparo quando aumenta a área da chapa. Os resultados apontam para o desenvolvimento de um novo procedimento de reparo de contingência.

Palavras-chave: Adesão. Aderência. Colagem. Reparo de dutos. Adesivo estrutural.

ABSTRACT

SILVA, Ricardo Hudson. Study of form factor of repair in area with plate stuck in pipes with hole. 2015. 99 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2015.

In this work, the resistance to hydrostatic pressure of repair with steel plate low carbon, glued with structural adhesive epoxy in the steel pipes with hole was investigated. Thin-wall pipes under internal pressure, the tension in the longitudinal direction is half the circumferential stress the pipe, thus the shape factor of repair area, that is, the change of the plate size in the longitudinal and circumferential directions tube was evaluated. The influence of repair failure strength when vary the size of the plate in the mentioned directions, were statistically analyzed using a factorial experiments desing. High values of the hydrostatic resistance in the repair were found (around 240 bar) compared with the normal working pressure (around 70 bar) in a similar pipe used in the tests. The results of repair failure pressure of the 10 groups analyzed small standard deviations, less than 12%, demonstrating the efficiency of the procedures adopted in the bonding mechanism. The study demonstrated of any existence of the form factor in the repair resistance due to variation in the dimensions of the plate in the longitudinal and circumferential direction, even as the high influence in the repair resistance with the increase from the area plate. The results point to the development of a new contingency repair procedure.

Keywords: Adherence. Adhesion. Glue. Duct repair. Adhesive structural.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Braçadeira com grampo	21
Figura 2– Braçadeira com pino centralizador para pequenos furos	22
Figura 3 – Braçadeira mecânica aparafusada com “vent”	22
Figura 4 – Braçadeira mecânica aparafusada	24
Figura 5 – Depósito com solda	24
Figura 6 – Luva inteiriça soldada	25
Figura 7 – Braçadeira com pino centralizador soldada	29
Figura 8 – Luva bipartida (dupla calha)	29
Figura 9 – Luva bipartida com conexão soldada sem reforço	29
Figura 10 – Luva bipartida com conexão soldada com refoço	30
Figura 11 – Detalhe do mata-junta (solda longitudinal)	30
Figura 12 – Corpo rígido seccionado no plano yz	31
Figura 13 – Componentes das tensões	32
Figura 14 – Cubo de tensões	32
Figura 15 – Componentes dos vetores tensão	33
Figura 16 – Tetraedro infinitesimal	33
Figura 17 – Tubo cilíndrico de raio r e espessura t sob pressão interna de um fluido ...	34
Figura 18 – Trecho do tubo sob pressão interna p	35
Figura 19 – Trecho do tubo perpendicular ao eixo x	36
Figura 20 – Oleoduto rompido por corrosão	37
Figura 21–Representação da ligação iônica do cloreto de sódio (NaCl)	38
Figura 22 – Representação da ligação covalente da molécula de metano (CH_4)	38
Figura 23 – Representação de uma ligação metálica	39
Figura 24 – Rugosidade (R_a e R_t em μm) versus Aderência (tensão de ruptura em MPa)	41
Figura 25 – Energia de ligação em função do tipo de ligação	42
Figura 26 – Interface líquido – ar	43
Figura 27 – Gotas de água sobre uma superfície hidrofóbica	44
Figura 28 – Trabalho de coesão	44
Figura 29 – Trabalho de adesão	45
Figura 30 – Tipos de falhas em juntas adesivas	46

Figura 31 – Molhabilidade entre um líquido e um sólido.	46
Figura 32 – Tubo utilizado para reparo	49
Figura 33 – Chapa de controle para os experimentos – Grupo 3	50
Figura 34 – Dimensão L constante, variando-se apenas C para mais e para menos	51
Figura 35 – Dimensão C constante, variando-se apenas L para mais e para menos	51
Figura 36 – Corte da chapa na guilhotina.....	53
Figura 37 – Tira da chapa cortada	53
Figura 38 – Localização do centro da chapa utilizando o traçador de altura	54
Figura 39 – Prensa utilizada para calandrar as chapas	55
Figura 40 – Dispositivo utilizado para calandragem das chapas.....	55
Figura 41 – Chapas calandradas com dimensão constante na direção L do tubo.....	56
Figura 42 – Chapas calandradas com dimensão constante na direção C do tubo	56
Figura 43 – Equipamento de jateamento	57
Figura 44 – Jateamento das chapas dentro da câmara de jateamento.....	57
Figura 45 – Rugosímetro Tridimensional.....	58
Figura 46 – Tubo e chapa após o jateamento com granalha G40.....	59
Figura 47 – Rugosímetro portátil	59
Figura 48 – Marcação de guia do centro do furo para auxiliar na colagem da chapa	60
Figura 49 – Limpeza da área que serão coladas	60
Figura 50 – Processo de colagem da chapa no tubo	61
Figura 51 – Chapa colada no tubo	62
Figura 52 – Tubo com reparo de chapa colada.....	62
Figura 53 – Bomba utilizada no teste hidrostático	63
Figura 54 – Tubos prontos para ensaio hidrostático.....	63
Figura 55 – Gráfico da normalidade dos resíduos	64
Figura 56 – Histograma – Resíduos	65
Figura 57 – Gráfico de distribuição dos resíduos	66
Figura 58 – Força de ruptura do reparo de cada grupo.....	71
Figura 59 – Força x área para variações nas direções longitudinal L e circunferencial C da área da chapa colada.....	72
Figura 60 – Ruptura do reparo após ensaio hidrostático	73
Figura 61 – Análise de normalidade e homoscedasticidade - Comparação por pares ...	75
Figura 62 – Grupos utilizados no planejamento fatorial de experimentos.....	79

Figura 63 – Histograma dos resíduos da variável de resposta para os grupos utilizados no planejamento fatorial de experimento	80
Figura 64 – Gráfico de distribuição dos resíduos para os grupos utilizados no planejamento fatorial de experimento	81
Figura 65 – Efeito da dimensão longitudinal L na força de ruptura das chapas coladas	85
Figura 66 – Efeito da dimensão circunferencial C na força de ruptura dos reparos.....	85
Figura 67 – Curvas de nível para força de ruptura da chapa em função de L e C.....	86
Figura 68 – Curva contínua distribuição de probabilidade.....	94
Figura 69 – Curva de uma distribuição normal padrão	95
Figura 70 – Gráfico da probabilidade entre valores de z.....	96
Figura 71 – Valores de z que corresponde a 95 % da área de uma distribuição normal padrão.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Reparos temporários	23
Tabela 2 – Reparos permanentes	28
Tabela 3 – Energia ao descascamento de folhas de cobre em função da topografia superficial	40
Tabela 4 – Definição dos grupos utilizados neste trabalho	52
Tabela 5 – Áreas efetivas em função das dimensões nas direções longitudinal e circunferencial	52
Tabela 6 – Representa os efeitos principais de cada variável e sua respectiva interação	68
Tabela 7 – Análise de variância para planejamento fatorial 2 x 2.....	69
Tabela 8 – Resultado da força de ruptura para cada grupo ensaiado	70
Tabela 9 – Análise da normalidade – comparação de pares.....	76
Tabela 10 – Análise da homoscedasticidade – comparação por pares	77
Tabela 11 – Teste Fisher – comparação por pares.....	77
Tabela 12 – Grupos utilizados no planejamento fatorial de experimentos.....	78
Tabela 13 – Tabela ANOVA para o grupo utilizado no planejamento fatorial de experimentos.....	82
Tabela 14 – Valores dos efeitos para os fatores avaliados	82
Tabela 15 – Tabela dos coeficientes da regressão não escalonados para força de ruptura do reparo	84

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Tensão
τ	Tensão de cisalhamento
ΔF	Força aplicada
\mathbf{n}	Vetor unitário normal
A	Área
\mathbf{F}	Força
D	Diâmetro externo do tubo
t	Espessura do tubo
r	Raio interno do tubo
σ_1	Tensão circunferencial do tubo
σ_2	Tensão longitudinal do tubo
p	pressão interna no tubo
R_a	Rugosidade aritmética ou média
R_t	Maior valor das rugosidades parciais que se apresenta no percurso de medição
γ	Energia superficial
γ_{lv}	Energia superficial do líquido com vapor
γ_{ls}	Energia superficial do líquido com o sólido
γ_{sv}	Energia superficial do sólido com o vapor
W_c	Trabalho de coesão
W_A	Trabalho de adesão
R	Constante dos gases ideais
T	Temperatura absoluta
Γ	Concentração de vapor
θ	Ângulo de contato entre fases para análise de molhabilidade
S	Coefficiente de equilíbrio de difusão
\bar{x}	Média amostral
s^2	Variância amostral
s	Desvio padrão
P_r	Probabilidade
μ	Média populacional

σ^2	Variância populacional
α	Nível de significância estatística
H_0	Hipótese nula (teste estatístico)
p	Calculado por programa estatístico
SS	Soma quadrática
MS	Média quadrática
R^2	Quadrado dos resíduos

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	16
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
1.1	Reparos em dutos	18
1.1.1	Critérios para execução de reparos em dutos	18
1.1.2	Reparos de contingência	19
1.1.3	Reparos temporários	22
1.1.4	Reparos permanentes	25
1.2	Tensão	30
1.2.1	Tensão em tubos de parede fina	34
1.3	Interações intermoleculares	37
1.3.1	Ligações primárias.....	38
1.3.2	Ligações secundárias ou ligações de Van der Walls	39
1.4	Adesão e aderência	39
1.4.1	Interligação mecânica	40
1.4.2	Interação absorção	42
1.4.3	Tensão superficial.....	42
1.4.4	Trabalho de coesão e adesão	44
1.4.5	Molhabilidade	46
2	METODOLOGIA	49
2.1	Dimensões dos tubos	49
2.2	Dimensões das chapas	50
2.3	Corte das chapas em guilhotina	53
2.3.1	Marcação do centro das chapas	54
2.3.2	Calandragem das chapas.....	54
2.4	Jateamentos das chapas e dos tubos utilizando granalha G40	56
2.4.1	Jateamento dos tubos	58
2.5	Preparação e colagem das chapas nos tubos	60
2.6	Teste hidrostático	62
2.7	Análise estatística	63
2.7.1	Comparação entre os resultados obtidos na força de falha nos diversos grupos	64

2.7.2	Análise por Planejamento Fatorial de Experimentos	66
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
3.1	Análise dos dados	70
3.2	Análise das falhas.....	72
3.3	Comparação estatística da força de ruptura para os grupos de mesma área.....	74
3.3.1	Análise de normalidade e homoscedasticidade para cada par de grupos de mesma área	74
3.4	Comparação dos grupos principais utilizados no planejamento fatorial de experimentos	78
	CONCLUSÕES.....	87
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
	REFERÊNCIAS.....	91
	APÊNDICE A - Estatística.....	93
	APÊNDICE B – Tabelas e gráficos com os resultados obtidos nos experimentos.....	98

INTRODUÇÃO

A utilização de tubos para o transporte de fluido vem acontecendo desde a antiguidade. A humanidade já utilizou madeira, bambu, cerâmica e chumbo para confecção de tubos, porém, para o desenvolvimento econômico da sociedade contemporânea os tubos de aço passaram a dominar em larga escala quase todos os campos de aplicação industrial. Somente em 1886, com a primeira patente dos irmãos Mannesmann, do laminador oblíquo, foi possível produzir economicamente tubos de aço sem costura. Por essa época os tubos de aço eram necessários principalmente para resistir às pressões cada vez mais altas das tubulações de vapor. Hoje todas as indústrias têm redes de tubulações de maior ou menor importância, e quase todas essas redes são essenciais ao funcionamento da indústria (TELLES, 2001). Contudo, qualquer tipo de tubulação está sujeita a desgastes em suas superfícies, interna e externa, devido a agentes corrosivos no meio externo ou no próprio fluido transportado pelo tubo. Quando isso acontece, técnicas que viabilizem o reparo rápido, eficiente e confiável de dutos são de fundamental importância para aumentar sua vida útil, prevenir acidentes, minimizar danos ao meio ambiente e permitir que a linha continue operando.

Os adesivos estruturais têm sido muito utilizados na indústria de petróleo, aeroespacial, automobilística entre outras de uma forma geral. Alguns fatores tais como uma distribuição mais uniforme das tensões em comparação com as juntas convencionais (parafusos, rebites e solda), não necessitar de aporte de calor na sua aplicação, apresentar boa resistência às intempéries e simplicidade de aplicação, fizeram com que muitos trabalhos de investigação fossem realizados. O Laboratório de Adesão e Aderência (LAA) do Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (IPRJ/UERJ) tem contribuído ativamente através de vários estudos para aplicação dos adesivos estruturais, entre os trabalhos realizados, podemos destacar: Desenvolvimento de toda a metodologia que culminou na RT/TMEC nº 003/08 (recomendação técnica para qualificação de adesivos para reparo estrutural – CENPES/PETROBRAS); Desenvolvimento e construção de equipamento destinado ao estudo do comportamento em fluência de juntas metálicas coladas (ALBANI, 2013); Estudo do fator de forma nas juntas coladas (SILVA, 2007); Critério de falha para juntas coladas submetidas a carregamentos complexos (SILVA, 2009);

Desenvolvimento de sistema de reparo para dutos e tubulações industriais utilizando materiais compósitos de matriz polimérica (ROHEM, 2010).

O trabalho desenvolvido por SILVA, 2007 conclui que existe um fator de forma para juntas coladas com adesivos estruturais, ou seja, quanto à variação da geometria da área colada a partir dos valores propostos na norma ASTM 1002-72, verificou-se que o comprimento da junta colada foi o fator que influenciou de forma mais significativa na resistência da junta. De uma forma geral, para juntas de mesma área, um aumento no comprimento produz uma junta com resistência à ruptura inferior às juntas aumentadas em largura (SILVA, 2007). A partir da conclusão que existe um fator de forma nas juntas coladas e da necessidade de desenvolver reparos de contingência de forma simples e rápida aproveitando todas as vantagens proporcionadas pelos adesivos estruturais, será proposto um reparo emergencial de contingência para tubos metálicos utilizando chapa de aço colada com adesivo estrutural. As tubulações sob pressão interna ficam submetidas a tensões longitudinais e circunferenciais diferentes, como será mostrado adiante, nesse trabalho será investigado o fator de forma de chapa de aço colada com adesivo estrutural em um tubo de aço de 6" de diâmetro com espessura de parede de 6,35 mm contendo um furo de 10 mm quanto à pressão de falha. Foi investigado também em qual das dimensões do tubo, circunferencial ou longitudinal, existe maior efeito na pressão de falha da chapa colada. Foi utilizado o planejamento fatorial de experimentos para se propor uma equação para força de falha da chapa colada nas condições descritas neste trabalho.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Reparos em dutos

Existem muitos trabalhos destinados ao reparo de tubos de aço para escoamento de petróleo, gás e outros fluidos. Dentre algumas propostas de trabalhos para reparos em tubos podemos citar: corte e substituição da região corroída, dupla calha soldada, dupla calha com enchimento e o uso de materiais compósitos entre outros. O Laboratório de Adesão e Aderência do Instituto Politécnico da UERJ realizou os seguintes trabalhos focados para o reparo de tubos para indústria de petróleo e gás: Desenvolvimento de sistema de reparo para dutos e tubulações industriais utilizando materiais compósitos de matriz polimérica (ROHEM, 2010. Em conformidade com a Norma ISO 24817:2006); Desenvolvimento de sistema inovador de reparo emergencial em dutos com danos transpassantes (ALBANI, 2011); Equipamento para fabricação de reparo em material compósito laminado para dutos em ambiente aquoso (QUEIROZ, 2012); Desenvolvimento de reparo emergencial em material compósito para tubulações em ambiente aquoso (SANTOS,2013).

Neste sentido, será apresentado uma revisão dos critérios de reparos adotados na indústria de petróleo e gás bem como os conhecimentos utilizados no procedimento de confecção do reparo proposto.

A Norma PETROBRAS N-2737 define os critérios e os tipos de reparos que devem ser executados nos tubos.

1.1.1 Critérios para execução de reparos em dutos

A seguir são listados os critérios nos quais determinados danos devem ser reparados ou removidos:

- a) Qualquer dano com vazamento;

- b) Sulcos e cavas, quando apresentam profundidade maior que: 12,5% da espessura nominal da parede, para oleodutos; 10% da espessura nominal da parede, para gasodutos;
- c) Mossas que afetam os cordões de solda; mossas contendo ranhuras, sulcos ou cavas; mossas com profundidade > 6 mm em dutos com diâmetro ≤ 4 " ou com profundidade $> 6\%$ do diâmetro nominal do duto, para diâmetro nominal > 4 ";
- d) Mordeduras com as seguintes dimensões:
Profundidade $> 0,8$ mm ou $> 12,5\%$ da espessura nominal (o que for menor);
Profundidade $> 0,4$ mm ou entre 6% e 12,5% da espessura nominal (o que for menor) e com comprimento $>$ que 50 mm em 300 mm contínuos de solda ou 1/6 do comprimento total da solda (o que for menor);
- e) Qualquer tipo de trinca;
- f) Toda solda não aceita pelos "critérios de aceitação – testes não-destrutivos" da Norma API STD 1104 ou pela especificação de fabricação do tubo;
- g) Áreas corroídas cujas dimensões resultem em tensões acima de valores admissíveis de acordo com os critérios da Norma PETROBRAS N-2098;
- h) Áreas corroídas atravessando soldas;
- i) Dutos tensionados com tensão longitudinal devido à pressão interna, cargas de sustentação e outras forças externas, $> 54\%$ da tensão mínima de escoamento especificada do material do tubo (SMYS).

Nota: Mossas superiores a 10 % do diâmetro nominal do duto devem ser avaliadas considerando a interferência com a passagem do "pig" instrumentado. Caso não seja aceitável, a técnica de reparo adotada deve ser a substituição do trecho do duto.

1.1.2 Reparos de contingência

Os reparos de contingência são precedidos de ações operacionais para minimizar os impactos ao meio ambiente e pessoas, e servem para conter vazamentos e permitir a intervenção no duto com objetivo de viabilizar a execução de reparos temporários ou permanentes. São tipos de reparos de contingência:

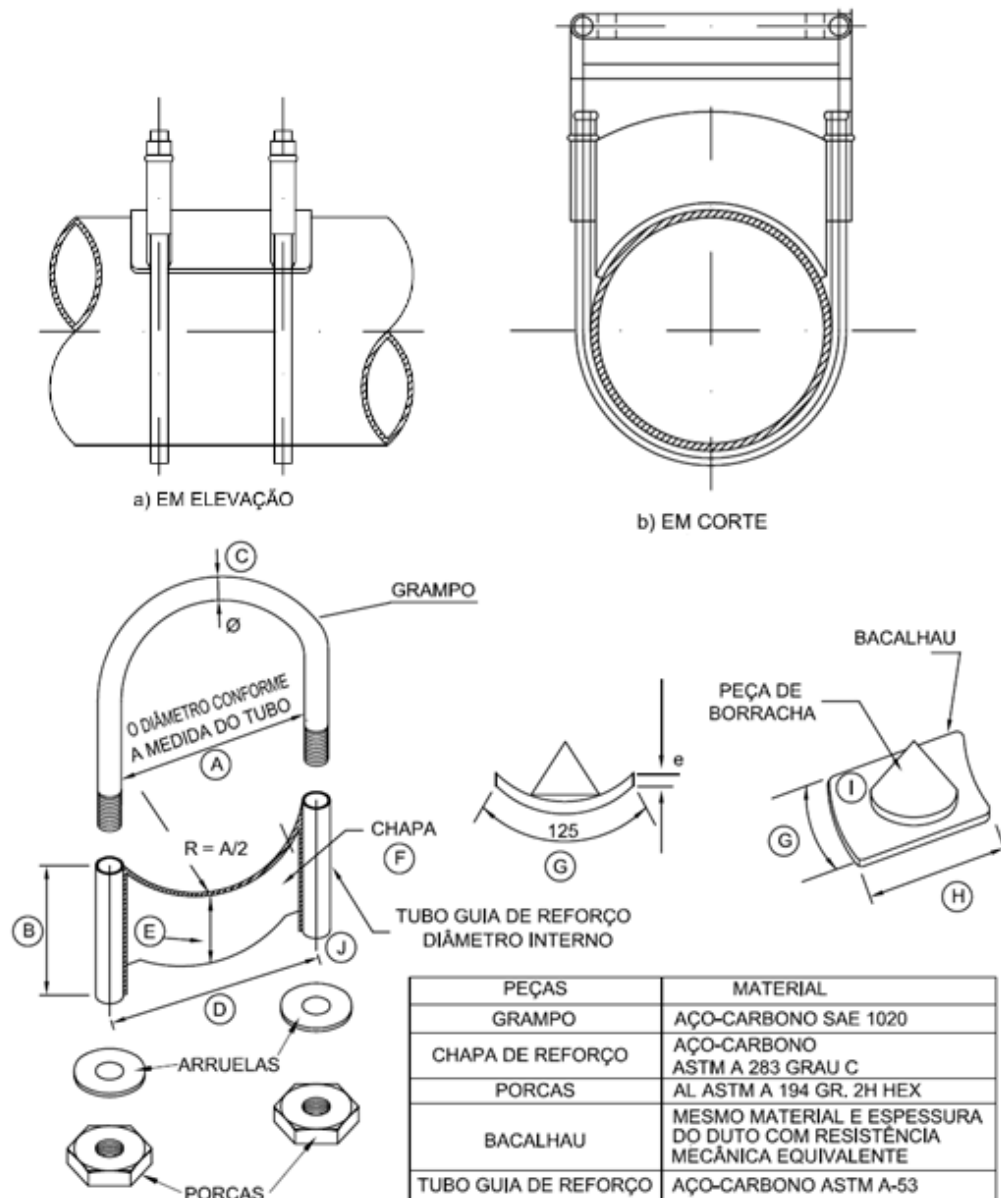
- a) braçadeira com grampos (ver FIGURA 1); no caso de furos em oleodutos, devem ser instalados sequencialmente os seguintes materiais:
- batoque e/ou remendo de borracha (Neoprene/Viton®1)) para complementar a vedação;
 - chapa metálica para prensar o remendo de borracha contra o batoque;
 - grampos de aço com barra de aperto, no mínimo 2 grampos, com rosca, porcas e arruelas, para fixação do bacalhau (chapa de reforço estrutural) contra a superfície do duto;

Nota: Para chapa metálica com comprimento maior do que o mostrado na FIGURA 1, deve ser calculado o número de grampos a serem instalados.

- b) braçadeiras com pino centralizador para pequenos furos (ver FIGURA 2);
- c) braçadeiras mecânicas aparafusadas com ou sem “vent” (ver FIGURAS 3e 4); o uso do “vent” é apropriado quando não se conseguir estancar o vazamento.

Nota: - Para dimensionamento das peças deve ser considerada a pressão de projeto do duto.

Figura 1 – Braçadeira com grampo



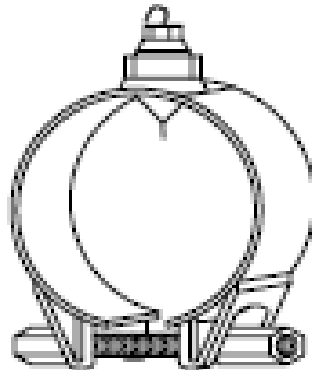
DN DUTO	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	TUBO GUIA DE REFORÇO
4"	114	70	1/2"	130	50	1/4"	90	150	ESPESSURA MAIOR OU IGUAL A DO TUBO	1/2"	DN 5/8" SCH 40
6"	170	100	1/2"	185	60	1/4"	120	150		1/2"	
8"	220	125	3/4"	242	80	3/8"	120	150		1"	DN 1 1/4" SCH 80
10"	310	170	3/4"	335	120	3/8"	125	150		1 1/4"	
12"	325	170	3/4"	350	120	3/8"	125	150		1 1/4"	
14"	365	170	1"	390	140	1/2"	125	220		1 1/4"	
16"	410	200	1"	435	140	1/2"	125	220		1 1/4"	
18"	457	200	1"	505	140	1/2"	125	220		1 1/4"	
20"	520	200	1"	545	140	1/2"	125	220		1 1/4"	
22"	565	230	1"	590	170	1/2"	125	220		1 1/4"	
24"	620	230	1"	645	170	1/2"	125	220	1 1/4"		

c) DETALHE DO GRAMPO

NOTA: DIMENSÕES EM MILÍMETROS E POLEGADAS.

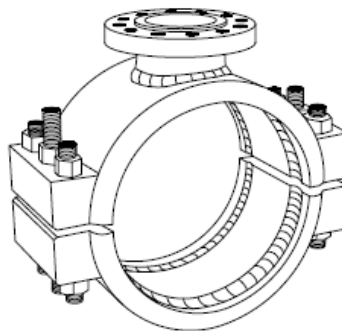
Fonte: Norma N-2737, BR.

Figura 2– Braçadeira com pino centralizador para pequenos furos



Fonte: Norma N-2737, BR.

Figura 3 – Braçadeira mecânica aparafusada com “vent”



Fonte: Norma N-2737, BR.

1.1.3 Reparos temporários

Os reparos temporários servem para reforçar regiões que apresentem danos, garantindo a segurança e a continuidade operacional do duto, quando a execução do reparo definitivo for inviável. O reparo temporário deve ser substituído por um reparo permanente num prazo analisado caso a caso, considerando a progressão do dano, não devendo ser superior a 2 anos. A TABELA 1 apresenta os principais tipos de reparos temporários e respectivas aplicações. São tipos de reparos temporários:

- a) braçadeiras mecânicas aparafusadas (ver Figura 4);
- b) depósito com solda (ver Figura 5): este reparo é empregado para recompor a espessura corroída;
 - caso o duto esteja operando, o depósito com solda deve atender aos critérios da norma PETROBRAS N-2163;
 - após a deposição da solda deve ser feito o esmerilhamento para acabamento;
- c) luva de material compósito;
- d) bacalhau;
 - deve estar conformado e ajustado com a mesma curvatura do tubo;
 - a resistência da chapa deve ser igual ou maior do que a do tubo;
 - a dimensão máxima do bacalhau na direção longitudinal do duto deve ser de 150 mm e o ângulo máximo deve ser de 180° e possuir os cantos arredondados;
- e) luva inteiriça (ver FIGURA 6): este reparo é mais empregado para fechamento de “tie-in”.

Notas:

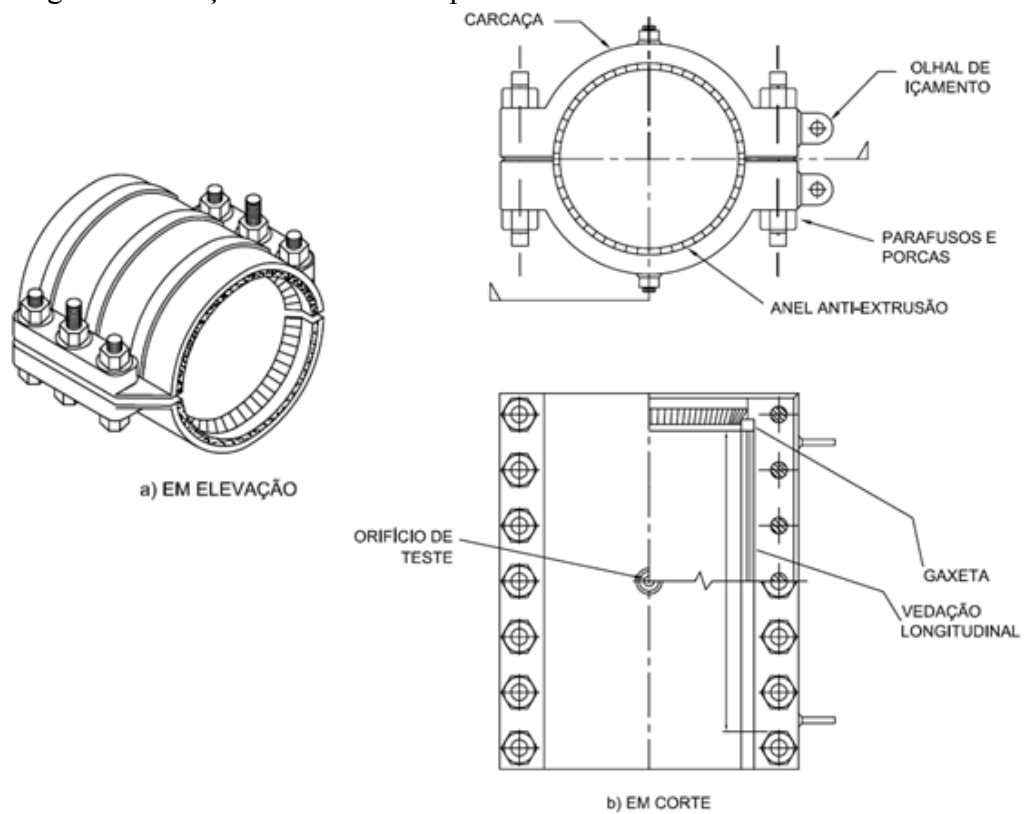
- 1) Recomenda-se avaliar a necessidade de monitoração periódica para verificação da estanqueidade. **[Prática Recomendada]**
- 2) Para dimensionamento das peças deve ser considerada a pressão de projeto do duto.

Tabela 1 – Reparos temporários

Tipos de Reparos	Aplicação
Braçadeira mecânica aparafusada sem solda.	Sulcos, cavas, mossas e áreas corroídas ou esmerilhadas.
Depósito com solda.	Áreas com corrosão interna e em geometrias complexas.
Luva de material compósito.	Áreas com corrosão interna ou com mossas.
Bacalhau.	Defeitos localizados, somente em tubos com tensão de escoamento > 42000 psi e diâmetro nominal > 12”.
Luva inteiriça sem solda.	Interligação de “tie-in” sem soldagem.

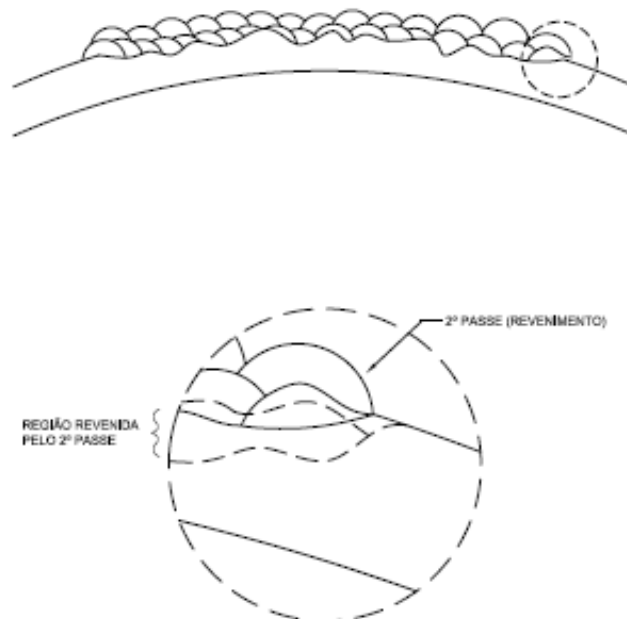
Fonte: Norma N-2737, BR.

Figura 4 – Braçadeira mecânica aparafusada



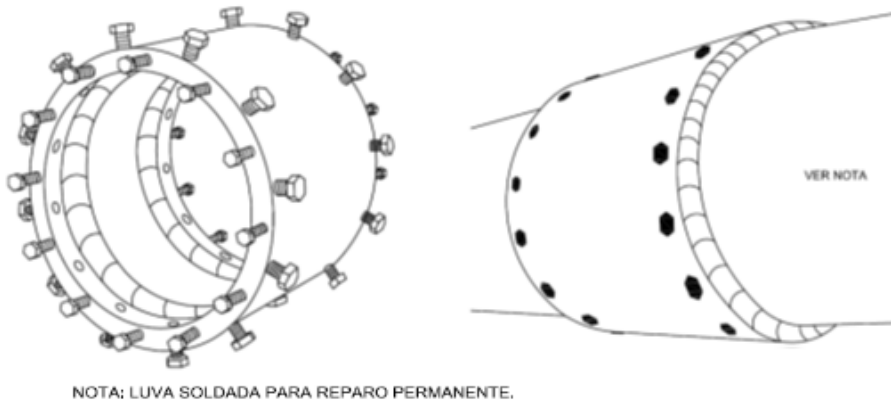
Fonte: Norma N-2737, BR.

Figura 5 – Depósito com solda



Fonte: Norma N-2737, BR.

Figura 6 – Luva inteiriça soldada



NOTA: LUVA SOLDADA PARA REPARO PERMANENTE.

Fonte: Norma N-2737, BR.

1.1.4 Reparos permanentes

Os reparos permanentes servem para recompor integralmente a resistência mecânica do duto. A TABELA 2 apresenta os principais tipos de reparos permanentes e respectivas aplicações. São tipos de reparos permanentes:

- a) esmerilhamento, remoção mecânica do defeito (disco rotativo ou ponta montada):
 - esta operação deve ser acompanhada por inspeção adequada para monitorar perda de espessura e eliminação do defeito;
 - a área esmerilhada deve ser avaliada como uma área corroída pelos critérios da norma PETROBRAS N-2098;
- b) depósito com solda:
 - caso o duto esteja operando, o depósito com solda deve atender aos critérios da norma PETROBRAS N-2163;
 - após a deposição da solda deve ser feito o esmerilhamento para acabamento;
- c) bacalhau:
 - deve estar conformado e ajustado com a mesma curvatura do tubo;
 - a resistência da chapa deve ser igual ou maior do que a do tubo;
 - a dimensão máxima do bacalhau na direção longitudinal do duto deve ser de 150 mm e o ângulo máximo deve ser de 180° e possuir os cantos arredondados;
- d) braçadeira com pino centralizador soldada (ver FIGURA 7);
 - instalação de um tampão soldado envolvendo a região do furo;

- e) braçadeira mecânica aparafusada e soldada;
 - soldar longitudinalmente, circunferencialmente e selar todos os parafusos;
- f) luva inteiriça e soldada;
 - soldar circunferencialmente e selar todos os parafusos;
- g) luva de material compósito;
- h) luva bipartida (dupla calha, ver FIGURAS 8 e 9):
 - o comprimento mínimo deve ser o suficiente para envolver a região do defeito acrescido de 50 mm em cada extremidade; não existe um limite para comprimento máximo;

Notas:

- 1) Caso necessária a instalação de sucessivas duplas calhas, recomenda-se a utilização de mata-junta embutido na solda circunferencial. **[Prática Recomendada]**
- 2) As seguintes situações requerem reinspeção a cada 5 anos: defeitos passantes ou que possam se transformar em passantes (como por exemplo, corrosão interna e trincas); risco geológico; duplas calhas gomadas maiores que 3 m de comprimento.

- deve ser projetada para a condição de tubo novo, ou seja, suportar tensões da ordem de 100 % do SMYS (tensão de escoamento mínima especificada);
- a solda longitudinal deve ser de topo e não atingir o duto, com mata-junta embutido, conforme norma PETROBRAS N-2163;
- a solda circunferencial deve ser de ângulo com eletrodos de baixo hidrogênio, conforme normas API STD 1104 e PETROBRAS N-2163;
- em caso de reparos de mossas ou corrosão externa, antes da aplicação da luva, deve ser preenchido o espaço anular com massa epóxi com limite mínimo de resistência à compressão de 15 ksi e tempo de cura de 45 a 60 minutos;

i) trepanação do defeito (“hot tap”):

- deve ser previsto, caso necessário, reforço na conexão, conforme a norma ASME B31.4;
- caso seja necessário a instalação de uma luva bipartida com conexão soldada, os procedimentos básicos são os mesmos descritos para luva bipartida comum e os parâmetros estipulados na norma API STD 1104 seguindo as FIGURAS 9, 10 e 11;

j) troca do trecho:

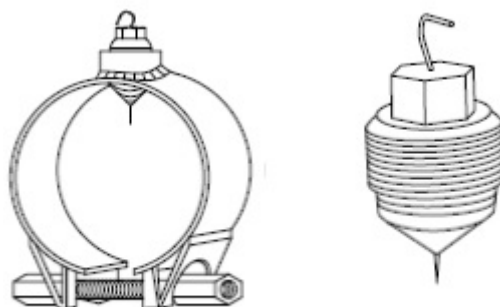
- normalmente a troca do trecho envolve parada operacional, entretanto técnicas alternativas (como por exemplo, bloqueio e derivação) contemplando trepanação podem evitar a parada operacional;
 - o comprimento mínimo do trecho a ser removido deve ser o maior valor entre 100 mm ou uma vez o diâmetro nominal do duto;
 - não é permitido o reparo de raiz e enchimento em solda de “tie in”;
 - niple(s) a ser(em) instalado(s) deve(m) ter pressão de projeto maior ou igual ao do duto no ponto de instalação;
 - testar hidrosticamente os tubos novos que devem ser utilizados na fabricação do(s) niple(s);
- k) escavação para alívio de tensão:
- comprimento do trecho escavado pode ser definido por simulação numérica ou medição de tensão “in-situ”, mas deve aliviar toda tensão longitudinal superior a 54 % do SMYS.

Tabela 2 – Reparos permanentes

Tipos de Reparos	Aplicação
Esmerilhamento	Sucos, cavas e trincas superficiais
Depósito com solda	Áreas corroídas externamente ou esmerilhadas
Bacalhau	Defeitos localizados, somente em tubos com tensão de escoamento ≤ 42 ksi e diâmetro nominal $\leq 12''$
Braçadeira com pino centralizador e soldada	Furos
Braçadeira mecânica aparafusada e soldada	Sulcos, cavas, mossas e áreas corroídas ou esmerilhadas
Luva inteiriça e soldada	Interligação em “tien-in”
Luva de material compósito	Áreas corroídas externamente com perda de espessura $< 70\%$
Dupla – calha	Todos os defeitos
Trepanação do defeito	Pequenos defeitos com extensão enquadrada na capacidade da máquina de trepanar, limitada a 1 (um) diâmetro nominal do tubo
Troca de trecho (niple)	Todos os defeitos
Escavação de seção do duto	Dutos com tensão longitudinal superior a 54% do SMYS

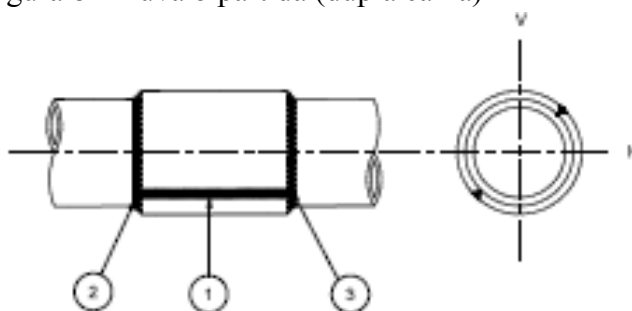
Fonte: Norma N-2737, BR.

Figura 7 – Braçadeira com pino centralizador soldada



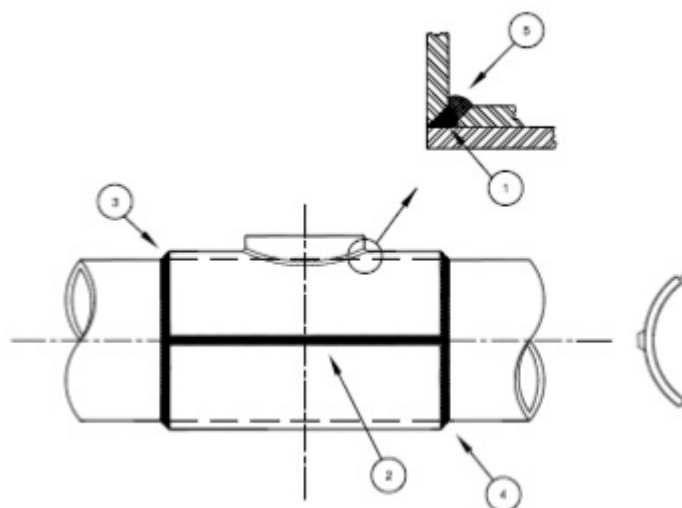
Fonte: Norma N-2737, BR.

Figura 8 – Luva bipartida (dupla calha)



Fonte: Norma N2737, BR.

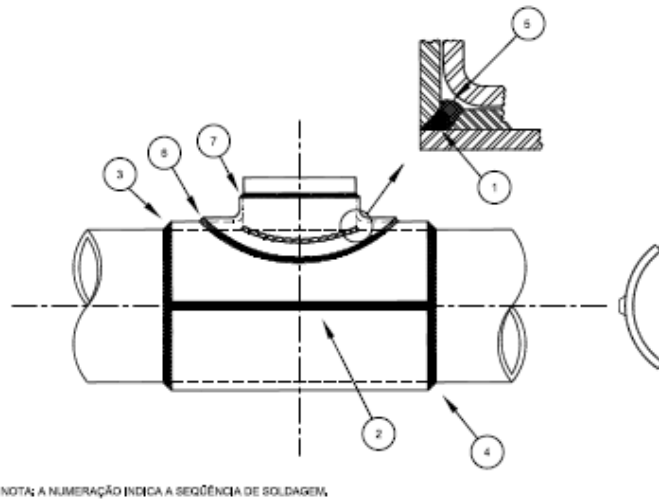
Figura 9 – Luva bipartida com conexão soldada sem reforço



Nota: Numeração inicia a sequência de soldagem.

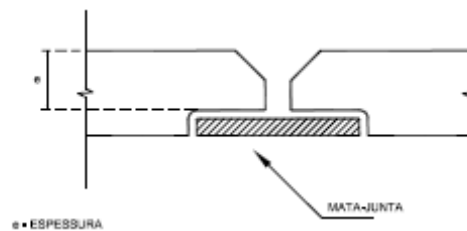
Fonte: Norma N-2737, BR.

Figura 10 – Luva bipartida com conexão soldada com reforço



Fonte: Norma N-2737, BR.

Figura 11 – Detalhe do mata-junta (solda longitudinal)



Fonte: Norma N-2737, BR.

1.2 Tensão

Qualquer ponto no interior de um corpo rígido está sujeito a esforços devido ao peso próprio, além daqueles gerados pela ação de forças externas. Estes esforços resultam em estados de tensão normal (σ) e cisalhante (τ), que variam em função do plano considerado.

O conceito de tensão em um ponto é definido pela equação

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1)$$

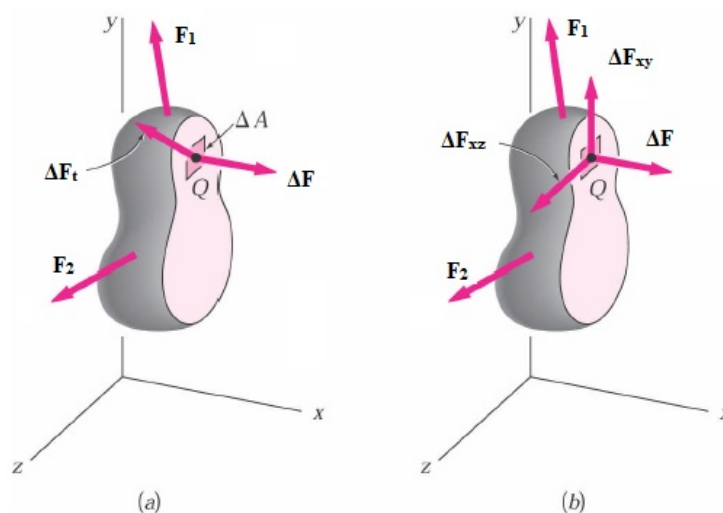
onde:

ΔF = força que atua na área ΔA ;

ΔA = área.

Para entendermos o estado de tensão criado pelos esforços sobre um ponto genérico Q localizado no interior do corpo, secciona-se o corpo através de um plano qualquer e que inclua Q, como por exemplo o plano yz, Figura 12 (a). Nesta figura, ΔF e ΔF_t são forças normal e tangencial que atuam numa área ΔA na vizinhança do ponto Q. A força normal ΔF possui direção bem definida enquanto que a força tangencial ΔF_t pode ter qualquer direção no plano yz. Fazendo-se a decomposição da força tangencial ΔF_t nas direções dos eixos y e z obtemos ΔF_{xy} e ΔF_{xz} , Figura 12 (b).

Figura 12 – Corpo rígido seccionado no plano yz



Fonte: IPB, 2014.

As três componentes da tensão são obtidas dividindo-se o módulo de cada força pela área ΔA e fazendo ΔA tender a zero.

$$\sigma_x = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

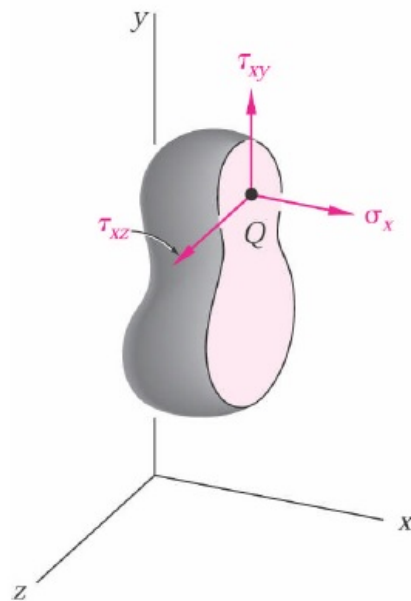
$$\tau_{xy} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_{xy}}{\Delta A}$$

$$\tau_{xz} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_{xz}}{\Delta A}$$

(2)

As três componentes da tensão no ponto Q é mostrada na Figura 13.

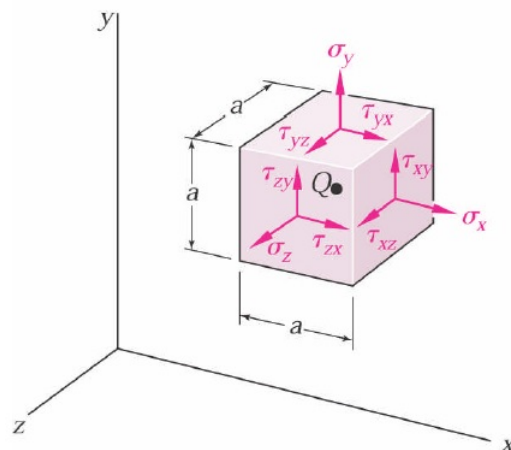
Figura 13 – Componentes das tensões



Fonte: IPB, 2014.

De forma análoga a anterior, seccionando-se o corpo paralelamente aos planos xz e xy através do ponto Q define-se as componentes de tensão que são perpendiculares a cada um dos eixos x , y e z , conforme Figura 14 (cubo de tensões).

Figura 14 – Cubo de tensões



Fonte: IPB, 2014.

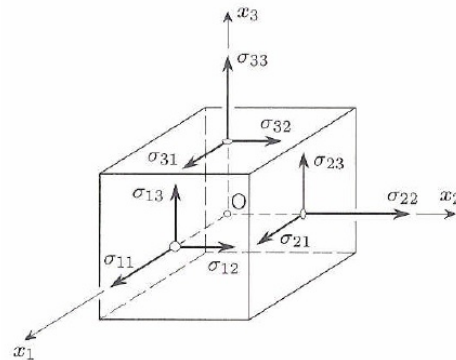
Através do sistema de eixos ortogonais que passam pelo ponto Q, as componentes de tensão ficam definidas por 9 parcelas que podem ser representadas pela matriz mostrada a seguir.

$$\begin{matrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{matrix}$$

O estado de tensão num ponto em estudo, em relação a um referencial $[Ox_1x_2x_3]$ Figura 15, pode ser designada por uma matriz tensor de tensões que indica o estado de tensão em um ponto de estudo.

$$[\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

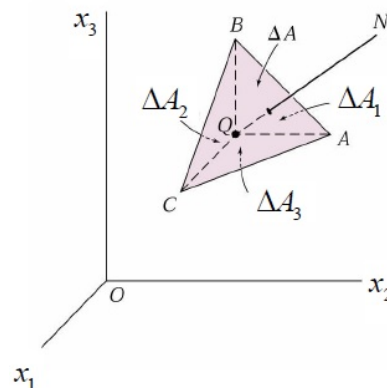
Figura 15 – Componentes dos vetores tensão



Fonte: IPB, 2014.

O vetor tensão que atua sobre uma área ΔA em uma direção qualquer aos eixos coordenados, consideremos um tetraedro infinitesimal no qual três faces são paralelas aos planos coordenados e a quarta é inclinada relativamente a estes, Figura 16.

Figura 16 – Tetraedro infinitesimal



Fonte: IPB, 2014.

Seja \mathbf{n} a normal unitária à área ΔA oblíqua em relação aos eixos coordenados. As componentes ($\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3$) são cossenos diretores. Dessa forma, a área ΔA paralela a um plano coordenado pode ser obtida pela relação: $\Delta A_i = \Delta A \cdot \mathbf{n}_i$ sendo $\mathbf{n}_i = \cos \theta$ (θ é o ângulo formado entre \mathbf{n} e x_i).

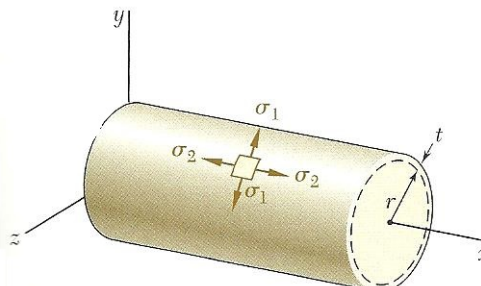
O vetor das tensões relativo a uma direção qualquer pode ser obtido como uma combinação linear dos vetores das tensões relativas a três planos que passam pelo ponto de normais paralelas aos eixos coordenados, essa relação vetorial é a equação de Cauchy, Equação 4.

$$\sigma_n = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.2.1 Tensão em tubos de parede fina

São considerados tubos de parede fina quando o diâmetro externo D do tubo é maior do que 10 (dez) vezes a espessura t da parede do tubo, $\frac{D}{t} \gg 10$. Quando um tubo de parede fina fica submetido à pressão interna p , exercida por um fluido, o material constitutivo do tubo fica submetidos às tensões circunferencial σ_1 e longitudinal σ_2 nas paredes do tubo, Figura 17.

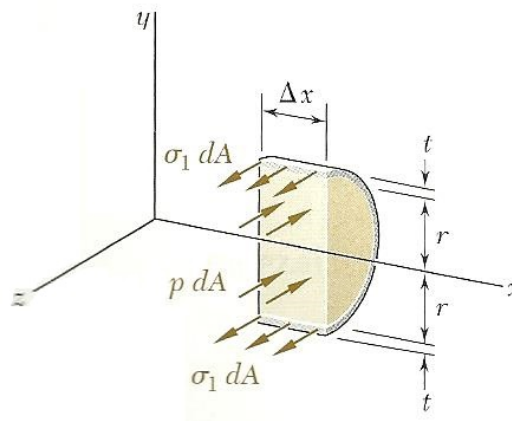
Figura 17 – Tubo cilíndrico de raio r e espessura t sob pressão interna de um fluido



Fonte: BEER et al, 2011.

Para se determinar a tensão σ_1 na direção circunferencial do tubo, destaca-se um trecho do tubo formado pelo plano xy e por dois planos paralelos ao plano yz distantes Δx um do outro, Figura 18.

Figura 18 – Trecho do tubo sob pressão interna p



Fonte: BEER et al, 2011

Aplicando-se a equação de equilíbrio das forças na direção do eixo z , no trecho considerado do tubo, tem-se:

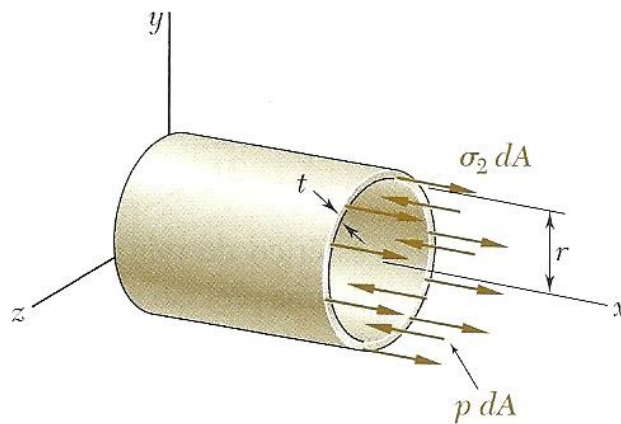
$$\Sigma F_z = 0 \Rightarrow \sigma_1(2 \cdot t \cdot \Delta x) - p(2r \cdot \Delta x) = 0$$

fazendo-se o desenvolvimento da igualdade acima, chega-se para o valor da tensão circunferencial a seguinte equação:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot r}{t} \quad (5)$$

Para determinar a tensão σ_2 na direção longitudinal do tubo, destaca-se agora, um trecho perpendicular ao eixo x do tubo, Figura 19.

Figura 19 – Trecho do tubo perpendicular ao eixo x



Fonte: BEER et al, 2011.

Aplicando-se a equação de equilíbrio das forças na direção do eixo x , no trecho considerado do tubo, tem-se:

$$\Sigma F_x = 0 \Rightarrow \sigma_2 (2 \cdot \pi \cdot r \cdot t) - p(\pi \cdot r^2) = 0$$

fazendo-se o desenvolvimento da igualdade acima, chega-se para o valor da tensão longitudinal a seguinte equação:

$$\sigma_2 = \frac{p \cdot r}{2 \cdot t} \quad (6)$$

É facilmente verificável nas Equações (3) e (4) que a tensão na direção circunferencial σ_1 é o dobro da tensão na direção longitudinal σ_2 do tubo.

$$\sigma_1 = 2 \cdot \sigma_2 \quad (7)$$

A Figura 20 mostra um duto rompido onde pode-se perceber que a falha se propaga na direção longitudinal do duto evidenciando-se assim maior tensão na direção circunferencial que é representado pela Equação (7).

Figura 20 – Oleoduto rompido por corrosão



Fonte: CETESB, 2014.

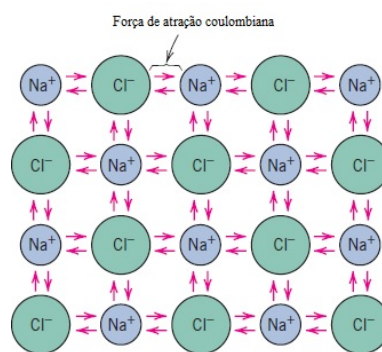
1.3 Interações intermoleculares

As interações entre átomos moléculas ou íons se manifestam com maior intensidade quando ocorre aproximação entre eles. Na aproximação, eles podem sofrer reação química ou podem interagir através de força mútua. Uma reação química por definição requer que ligações químicas sejam quebradas e/ou formadas. Usualmente as energias envolvidas neste processo variam entre 50 e 100 kcal.mol⁻¹ (210 e 420 kJ.mol⁻¹). Uma interação química significa que as moléculas se atraem ou se repelem entre si, sem que ocorra a quebra ou formação de novas ligações químicas. Estas interações são frequentemente chamadas de interações não covalentes ou interações intermoleculares. As energias envolvidas em tais tipos de interações são muito menores que aquelas envolvidas em processos reativos, variando usualmente entre 0,5 a 10 kcal.mol⁻¹ (2,1 a 42 kJ.mol⁻¹) (ROCHA, 2001).

1.3.1 Ligações primárias

- Iônica \Rightarrow neste tipo de ligação se manifesta a força de atração coulombiana pela formação de íons com cargas de sinais opostos.

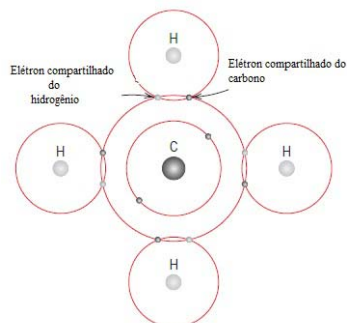
Figura 21–Representação da ligação iônica do cloreto de sódio (NaCl)



Fonte: CALLISTER, 2007.

- Covalente \Rightarrow não ocorre formação de íons, os elétrons ficam compartilhados entre os átomos.

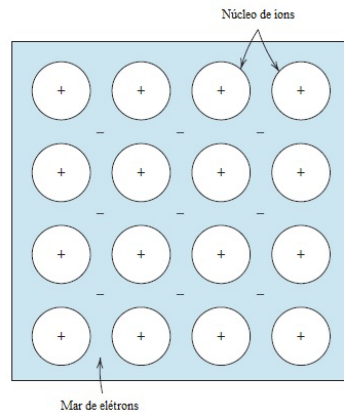
Figura 22 – Representação da ligação covalente da molécula de metano (CH₄)



Fonte: CALLISTER, 2007.

- Ligação metálica \Rightarrow este tipo de ligação ocorre entre os metais e suas ligas. Os elétrons de valência não estão ligados a qualquer átomo em particular, eles pertencem ao metal como um todo como se formassem um mar de elétrons.

Figura 23 – Representação de uma ligação metálica



Fonte: CALLISTER, 2007.

1.3.2 Ligações secundárias ou ligações de Van der Waals

- Íon – dipolo
- Dipolo permanente
- Íon – dipolo induzido
- Dipolo – dipolo induzido
- Ligação de hidrogênio
- Dispersão de London

1.4 Adesão e aderência

Entende-se por adesão o processo de união entre materiais diferentes ou não, onde essa união acontece por manifestação das forças intermoleculares ou através de

ligações químicas. Adesivos são substâncias capazes de fazer a união entre materiais através de suas superfícies na qual chamamos de aderentes ou substratos.

Aderência está associada a resistência mecânica proporcionada pela união de materiais.



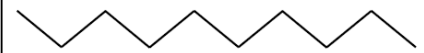



Será considerado a seguir alguns mecanismos que favorecem uma melhor resistência mecânica na união de materiais (KINLOCH, 1987).

1.4.1 Interligação mecânica

Interligação mecânica propõe a criação de rugosidades na superfície do substrato no qual o adesivo terá um ancoramento mecânico nas irregularidades causadas na superfície do aderente tendo esta como a principal fonte de aderência intrínseca.

ARROWSMITH apud KINLOCH (1987), estudou a adesão de cobre em folhas finas de níquel (espessura 35 μm) com tecido de vidro reforçado com resina epóxi, material utilizado em placas de circuito impresso. Neste estudo foi avaliado a resistência ao descascamento para vários tipos de topografias como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Energia ao descascamento de folhas de cobre em função da topografia superficial

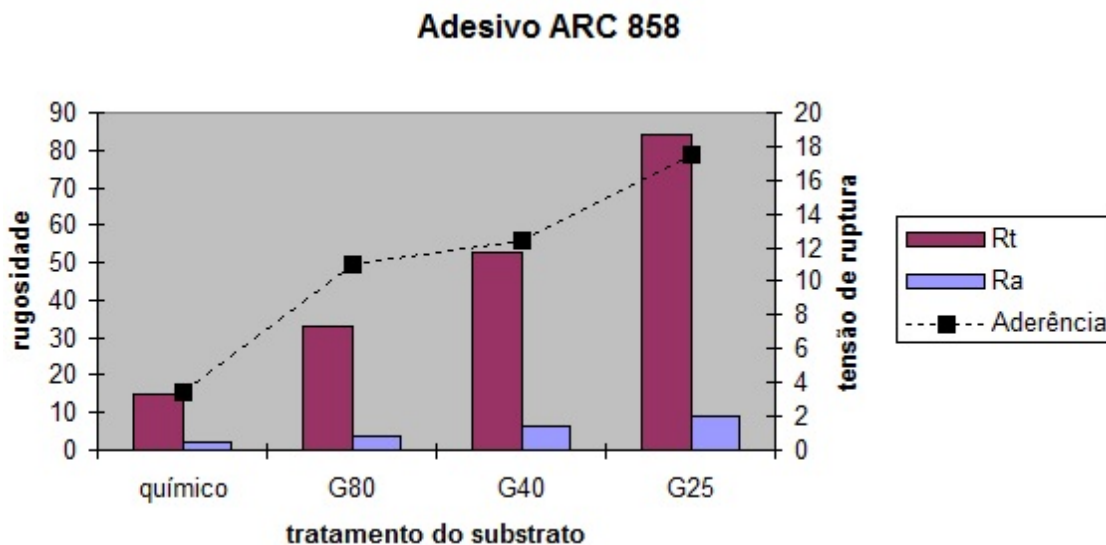
Topografias	Energia ao Descascamento (kJ/m^2)
	0,66
	0,77
	1,0
	1,5
	2,4
	2,3

Fonte: PERRUT, 2009.

As duas últimas representações das topografias da Tabela 3 apresentam uma superfície de contato maior e uma melhor geometria para o travamento mecânico do adesivo no substrato, necessitando assim uma maior energia para o descascamento das superfícies coladas.

Estudos realizados no LAA para medir a aderência em juntas coladas com resinas epoxídicas de alta viscosidade (tipo massa), apontam para um ganho na resistência ao cisalhamento quando se promove maior rugosidade no substrato. SAMPAIO et al, 2006, em seus estudos com diferentes tratamentos superficiais dos substratos em chapas de aço ASTM A36 (sem tratamento mecânico, jateamento com granalha de aço G80, G40 e G25) todas submetidas a tratamento químico, foram avaliadas as propriedades de aderência em juntas de cisalhamento coladas com dois tipos de adesivos epoxídicos. A Figura 24 mostra a tensão de cisalhamento das juntas coladas com o adesivo epoxídico de alta viscosidade, tipo massa, para cada tratamento superficial citado.

Figura 24 – Rugosidade (Ra e Rt em μm) versus Aderência (tensão de ruptura em MPa)



Fonte: SAMPAIO et al, 2006.

Para o adesivo epoxídico de alta viscosidade, os dados de rugosidade e aderência obtidos mostraram de forma clara que um aumento nos valores dos parâmetros de rugosidade R_a (rugosidade média) e R_t (distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação) é acompanhado de um aumento da resistência mecânica da junta na tensão de ruptura, de acordo a teoria de interligação mecânica por ancoramento (SAMPAIO et al, 2006).

1.4.2 Interação absorção

A resistência à coesão de qualquer sólido depende de várias forças de atração que existem na sua superfície. Essas forças são de vários tipos, dependendo da particularidade natural do sólido mas, em geral, serão incluídas as forças de origem química (ligações primárias) - covalente, iônica e metálica, ligação por hidrogênio (ligações secundárias) - e também as de origem físicas - van der Waals, incluindo as interações dipolo e forças de dispersão (SAMPAIO,1998).

Um fato importante e comum para todas essas forças é que elas são somente significativas para distâncias muito pequenas. A maioria é negligenciada além de poucos angstroms (KINLOCH,1987). Isso significa que é necessário um contato íntimo para que tenham qualquer efeito na adesão (SAMPAIO,1988).

As energias envolvidas nas ligações primárias são maiores do que as energias envolvidas nas ligações secundárias, a Figura 25 mostra os valores de cada tipo de ligação.

Figura 25 – Energia de ligação em função do tipo de ligação

	Tipo de Ligação	Energia de Ligação (kJ/mol)
Ligações Primárias	Iônica	600-1100
	Covalente	60-700
	Metálicas	110-350
Ligações Secundárias	Hidrogênio	Até 40
	van der Waals	4-20

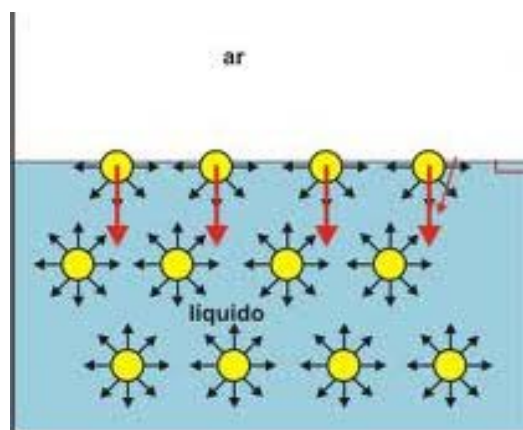
Fonte: PERRUT, 2009.

1.4.3 Tensão superficial

A tensão superficial está presente nas interfaces entre dois fluidos diferentes (líquido-gás ou líquido-líquido) ou entre um fluido e um sólido, porém é melhor percebida entre as interfaces de um líquido e um gás. Considerando-se a interface de um

líquido com seu próprio vapor ou com o ar, Figura 26, cada molécula no seio do líquido é atraída pelas demais moléculas igualmente, em todas as direções, enquanto as moléculas que estão na superfície são atraídas para o interior do líquido mais fortemente que em direção ao ar. No interior do líquido, as forças de coesão atuam no sentido de estabilizar o sistema, reduzindo a energia potencial de cada molécula. Como as moléculas da superfície não tem o mesmo número de moléculas vizinhas que as do seio do líquido, as moléculas que estão na superfície (interface líquido-ar) apresentam maior energia potencial que as do interior do líquido. Para que ocorra um aumento na superfície do líquido devem-se transferir moléculas de seu interior para a interface, isso necessita de certa energia.

Figura 26 – Interface líquido – ar



Fonte: ALFA CONNECTION, 2014.

Gotas de água sobre uma superfície hidrofóbica, como por exemplo uma folha, apresentam uma forma esférica, Figura 27. As forças moleculares de adesão entre a água e a superfície da folha são muito mais fracas que as forças de coesão entre as moléculas de água em seu interior, tomando-se a forma esférica na qual apresenta menor relação superfície/volume.

Figura 27 – Gotas de água sobre uma superfície hidrofóbica



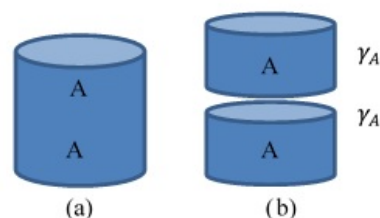
Fonte: BRASIL ESCOLA, 2014.

Se a área superficial de um corpo, sólido ou líquido, é aumentada, a energia da superfície também aumenta. Podemos então definir uma energia superficial γ como sendo a energia necessária para criar uma unidade de área superficial. É usual se falar que γ é a energia necessária para criar 1 m^2 de área superficial. A unidade de γ no S.I. é $\text{J} \times \text{m}^{-2}$ (ADAMIAN, 2002).

1.4.4 Trabalho de coesão e adesão

A Figura 28 (a) representa uma coluna de um sólido (ou líquido) com área de seção unitária, seccionando-se esta coluna cria-se duas novas interfaces de área unitária Figura 28 (b).

Figura 28 – Trabalho de coesão



Fonte: O autor, 2014.

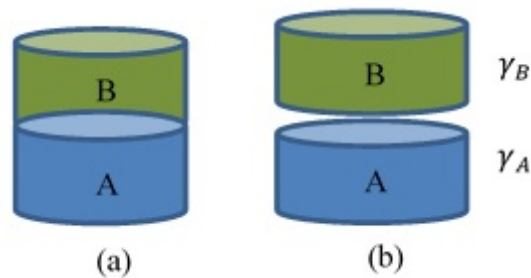
A energia necessária para se criar duas novas superfícies de um mesmo material é denominada de trabalho de coesão (W_c). Como ocorreu a criação de duas novas

superfícies, o trabalho de coesão será igual a duas vezes a energia superficial criada representada pela Equação 8.

$$W_c = 2\gamma_A \quad (8)$$

A Figura 29 (a) representa uma coluna composta por dois materiais diferentes, A e B (dois sólidos, dois líquidos imiscíveis ou um sólido e um líquido) com área de seção unitária, separando-se esta coluna pelas interfaces de A e B, cria-se duas novas interfaces de área unitária.

Figura 29 – Trabalho de adesão



Fonte: O autor, 2014.

O trabalho termodinâmico de adesão, W_A , requerido para separar uma área unitária na interface entre os dois materiais diferentes A e B, pode ser expresso pelas energias superficiais e livres através da equação de Dupré (KINLOCH, 1987). O trabalho reversível de adesão W_A será dado pela Equação (9).

$$W_A = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB} \quad (9)$$

Onde:

$\gamma_A \Rightarrow$ energia livre superficial da fase A;

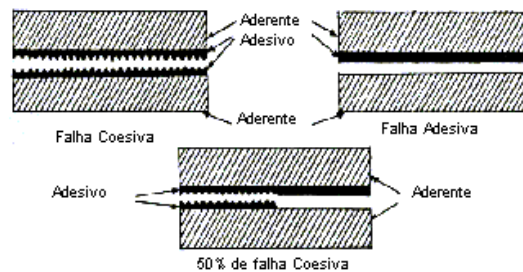
$\gamma_B \Rightarrow$ energia livre superficial da fase B;

$\gamma_{AB} \Rightarrow$ energia livre interfacial entre as fases A e B.

Quando se trabalha com juntas coladas com adesivos epoxídicos, as juntas podem falhar coesivamente ou adesivamente. A falha adesiva é a que ocorre na

interface entre o adesivo e o aderente; já a falha coesiva ocorre quando em ambas as superfícies do aderente fica uma camada de adesivo (SAMPAIO,1988), Figura 30.

Figura 30 – Tipos de falhas em juntas adesivas

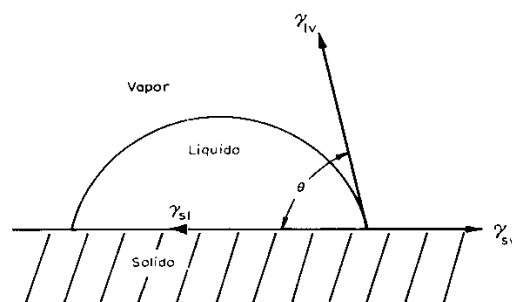


Fonte: SAMPAIO,1988.

1.4.5 Molhabilidade

Molhabilidade pode ser quantitativamente definida com referência a uma gota de líquido em repouso sobre uma superfície sólida (SAMPAIO,1988), Figura 31.

Figura 31 – Molhabilidade entre um líquido e um sólido.



Fonte: SAMPAIO,1988.

A equação de Young, que define o equilíbrio das tensões superficiais entre o sólido, o líquido e o vapor, é dada por:

$$\gamma_{sv} = \gamma_{st} + \gamma_{lv} \cos\theta \quad (10)$$

sendo que o termo γ_{sv} representa a energia livre superficial do substrato sólido devido à absorção de vapor. Essa absorção de vapor diminui a energia livre superficial do substrato, apesar de γ_{sv} ser considerada com valor baixo quando comparado com o valor da energia livre superficial do sólido no vácuo, γ_s .

Essa redução da energia superficial do sólido por uma camada de vapor tem sido definida pelo conceito de equilíbrio da pressão na difusão, Equação 11:

$$\Pi_s = \gamma_s - \gamma_{sv} = RT \int_{p_0}^p \Gamma d(\ln p) \quad (11)$$

sendo que em p é a pressão de vapor, p_0 é a pressão de equilíbrio de vapor, R , a constante dos gases, T , a temperatura absoluta e Γ é a concentração de vapor na superfície do substrato.

Assim, substituindo (11) em (10), a energia livre superficial do substrato sólido no vácuo será, então dada pela Equação 12 (KINLOCH,1987).

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos\theta + \Pi_s \quad (12)$$

A Equação 12 também é conhecida como a equação de Young-Dupré. Quando $\theta > 0$, o líquido não molha espontaneamente o sólido, mas quando $\theta = 0$, o líquido se espalha espontaneamente e molha completamente a superfície do sólido. Assim, para a molhagem espontânea do líquido ocorrer sobre uma superfície sólida tem-se as Equações 13 e 14 (KINLOCH,1987).

$$\gamma_{sv} \geq \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \quad (13)$$

$$\gamma_s \geq \gamma_{sl} + \gamma_{lv} + \Pi_s \quad (14)$$

O critério de molhabilidade espontânea também pode ser definido por um parâmetro S , chamado de coeficiente de equilíbrio de difusão, Equação 15,

$$S = \gamma_{sv} - \gamma_{sl} - \gamma_{lv} \quad (15)$$

ou alternativamente pela Equação 16.

$$S = \gamma_{sv} - \gamma_{sl} - \gamma_{lv} - \Pi_s \quad (16)$$

Assim, o líquido se espalha espontaneamente e molha completamente a superfície do sólido quando $S \geq 0$ (KINLOCH,1987).

2 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a investigação do fator de forma da chapa utilizada para reparo de contingência em tubos, será apresentada da seguinte forma: dimensões dos tubos utilizados para reparo; dimensões das chapas; confecção das chapas; jateamento das chapas e dos tubos; preparação e colagem dos tubos; teste hidrostático e análise estatística.

2.1 Dimensões dos tubos

O tubo de aço de baixo carbono utilizado foi o API 5L X56 Sch 40 de 6” de diâmetro. O tubo de 6,35 mm de espessura foi cortado com 600 mm de comprimento e soldado flanges em suas extremidades para efetuar ensaios hidrostáticos. Foi realizado um furo de diâmetro 10 mm em seu centro que será reparado, Figura 32.

Figura 32 – Tubo utilizado para reparo

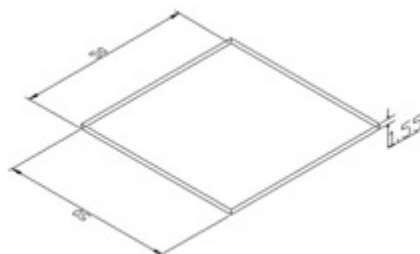


Fonte: O autor, 2013.

2.2 Dimensões das chapas

As chapas de aço de baixo carbono com espessura de 1,6 mm, segundo preconiza a norma ASTM D 1002 para juntas de cisalhamento, foram cortadas em guilhotina com dimensões de: 50 mm na direção longitudinal L e 50 mm na direção circunferencial C do tubo. Essa chapa foi utilizada como chapa de controle – grupo 3, Figura 33.

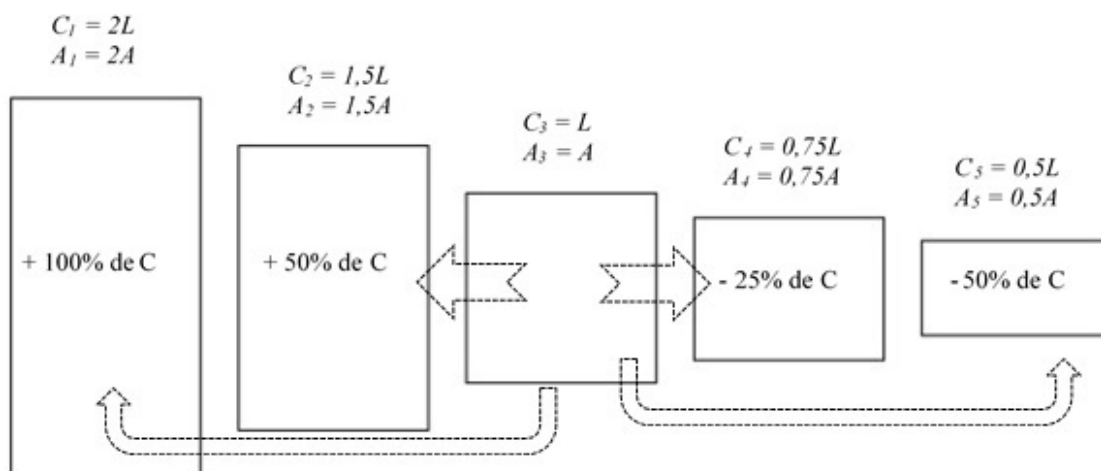
Figura 33 – Chapa de controle para os experimentos – Grupo 3



Fonte: O autor, 2013.

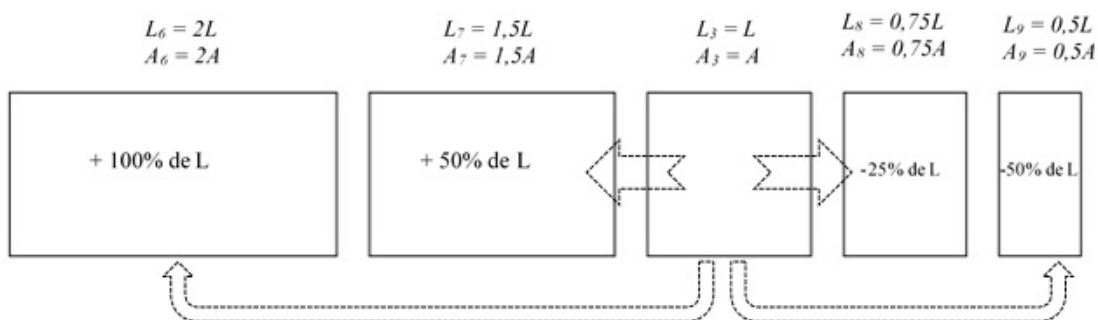
A partir das dimensões do corpo de prova de controle (identificada a partir de agora como Grupo 3), foram determinadas as variações das dimensões das chapas nas direções longitudinal L e circunferencial C do tubo e da área da chapa a ser colada, resultando em mais 8 grupos. Para cada grupo obtiveram-se 5 corpos de prova para análise estatística pelo fato da grande dificuldade de manusear um tubo de aço de 6" de diâmetro com 600 mm de comprimento. Em geral, o ideal do ponto de vista estatístico é de pelo menos 10 corpos de prova de forma a permitir uma melhor diferenciação entre os grupos. De acordo com os esquemas representados a seguir, Figura 34 e Figura 35, onde A representa a área da chapa utilizada como controle. Esses grupos serão utilizados nas análises estatísticas e serão abordados mais adiante.

Figura 34 – Dimensão L constante, variando-se apenas C para mais e para menos



Fonte: O autor, 2013.

Figura 35 – Dimensão C constante, variando-se apenas L para mais e para menos



Fonte: O autor, 2013.

Na metodologia utilizada, foi fixado o valor da dimensão na direção longitudinal L do tubo e variou-se o valor da dimensão circunferencial C do tubo para mais, ou seja, de 100% de C e 75% de C (grupos 1 e 2) e para menos, em 25% de C e de 50% de C (grupos 4 e 5) em seguida, fixou-se o valor de C e variou-se o valor de L para mais, ou seja, 100% de L e 75% de L (grupos 6 e 7) e para menos, em 25% de L e 50% de L (grupos 8 e 9). Foi feito também um grupo extra, proposto de forma complementar, para análise via planejamento fatorial de experimentos (grupo 10), com dimensões aumentadas em L e C.

A Tabela 4 mostra a combinação nas dimensões: longitudinal L e circunferencial C para cada grupo analisado.

Tabela 4 – Definição dos grupos utilizados neste trabalho

Grupo		L	C	Área colada
Análise da influência na variação da dimensão C da chapa colada.	1	L	2C	2A
	2	L	1,5C	1,5A
	3	L	C	A
	4	L	0,75C	0,75A
	5	L	0,5C	0,5A
Análise da influência na variação da dimensão L da chapa colada.	6	2L	C	2A
	7	1,5L	C	1,5A
	8	0,75L	C	0,75A
	9	0,5L	C	0,5A
Grupo extra.	10	2L	2C	4A

Fonte: O autor, 2013.

A Tabela 5 mostra a combinação nas dimensões longitudinal L e circunferencial C para cada grupo analisado de acordo com as relações adotadas para as chapas coladas. Definem-se, desta forma, as dimensões efetivas, bem como a área das chapas utilizadas para análise dos grupos.

Tabela 5 – Áreas efetivas em função das dimensões nas direções longitudinal e circunferencial

Grupo		L (mm)	C (mm)	Área da chapa (mm ²)
Análise da influência na variação da dimensão circunferencial C da chapa colada (a dimensão L fixa).	1	50	100	5000
	2	50	75	3750
	3	50	50	2500
	4	50	37,5	1875
	5	50	25	1250
Análise da influência na variação da dimensão longitudinal L da chapa colada (a dimensão C fixa).	6	100	50	5000
	7	75	50	3750
	8	37,5	50	1875
	9	25	50	1250
Grupo extra.	10	100	100	10000

Fonte: O autor, 2013.

2.3 Corte das chapas em guilhotina

As chapas a serem coladas foram cortadas na guilhotina, modelo GPN 1001 Newton, nas suas respectivas dimensões, conforme as medidas apresentadas na Tabela 5, tendo o formato originalmente plano. As Figuras 36 e 37 mostram o corte das chapas.

Figura 36 – Corte da chapa na guilhotina



Fonte: O autor, 2013.

Figura 37 – Tira da chapa cortada



Fonte: O autor, 2013.

2.3.1 Marcação do centro das chapas

Após o devido corte das chapas, as mesmas foram riscadas, utilizando-se um traçador de altura marca Mitutoyo, com o objetivo de identificar o centro das chapas, conforme mostra a Figura 38. Esta identificação do centro das chapas será utilizada para ajudar no alinhamento entre o centro da chapa e o centro do furo a ser colado. O processo de colagem da chapa no tubo será abordado nas seções subsequentes.

Figura 38 – Localização do centro da chapa utilizando o traçador de altura



Fonte: O autor, 2013.

2.3.2 Calandragem das chapas

Antes de serem coladas, as chapas tiveram que ser calandradas com o intuito de acompanhar a geometria curva dos tubos. No processo de calandragem foi utilizado uma prensa de capacidade 15 T. Utilizou-se um trecho retirado do próprio tubo para dar forma curva à chapa. Após a calandragem a chapa tende a flexionar um pouco para sua posição inicial, a calandragem é feita até que a chapa tome a curvatura externa do tubo.

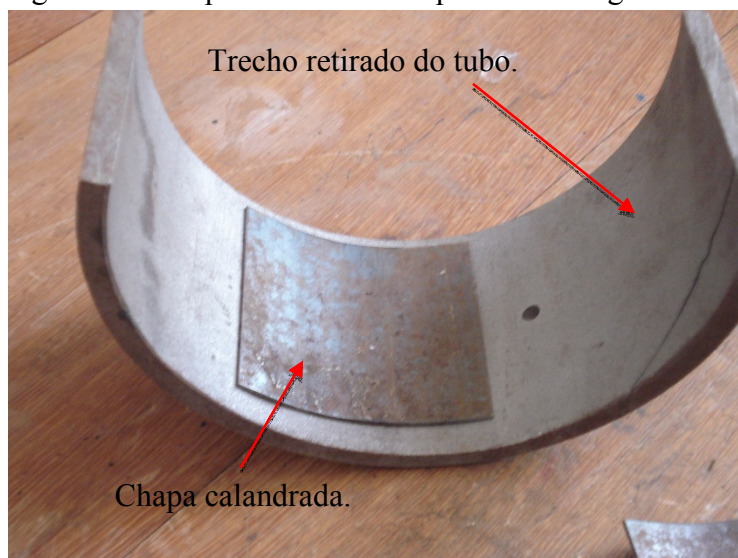
A verificação desta curvatura é feita visualmente utilizando-se um trecho do tubo. Os dispositivos que foram utilizados são mostrados nas Figuras 39 e 40.

Figura 39 – Prensa utilizada para calandrar as chapas



Fonte: O autor, 2013.

Figura 40 – Dispositivo utilizado para calandragem das chapas



Fonte: O autor, 2013.

As Figuras 41 e 42 mostram todos os grupos, dimensão longitudinal e circunferencial constante, com as chapas já calandradas. Os riscos nas chapas representam o seu centro para facilitar a centralização da chapa com o centro do furo no tubo a ser reparado no momento da colagem, conforme citado anteriormente. Para indicar o centro do furo no tubo foi feita marcações de guia no tubo.

Figura 41 – Chapas calandradas com dimensão constante na direção L do tubo



Nota: Variação da dimensão somente na direção circunferencial do tubo.

Fonte: O autor, 2013.

Figura 42 – Chapas calandradas com dimensão constante na direção C do tubo



Nota: Variação da dimensão somente na direção longitudinal do tubo.

fonte: O autor, 2013.

2.4 Jateamentos das chapas e dos tubos utilizando granalha G40

As chapas foram jateadas utilizando-se granalhas de aço G40. Trabalhos realizados no LAA (Laboratório de Adesão e Aderência) demonstram que o jateamento utilizando-se granalha G25 produzem maiores valores de rugosidade quando comparados ao jateamento utilizando granalha G40 (SAMPAIO et al, 2006). No entanto, pelo fato deste trabalho ser comparativo foi utilizado granalha G40 no

jateamento das chapas e dos tubos, o que não produziu juntas fracas ao ponto de não conseguir comparar os grupos avaliados. Utiliza-se o jateamento para promover rugosidade no substrato das chapas que serão coladas no tubo. A Figura 43 mostra o equipamento utilizado no jateamento das chapas.

Figura 43 – Equipamento de jateamento



(a)

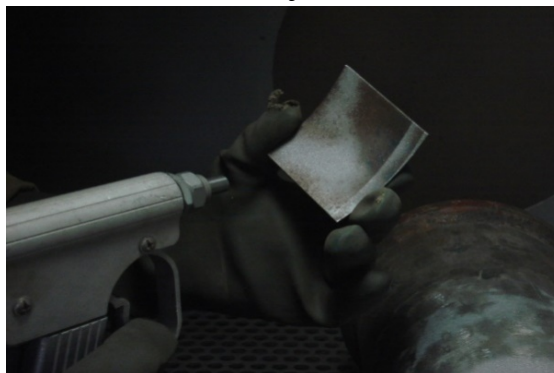


(b)

Legenda: (a) - câmara de jateamento; (b) - máquina de jateamento.
fonte: O autor, 2013.

O jateamento das chapas e dos tubos foram realizados dentro da câmara de jateamento com pistola apropriada conforme mostra a Figura 44.

Figura 44 – Jateamento das chapas dentro da câmara de jateamento



Fonte: O autor, 2013.

O jateamento de chapa fina, como a utilizada neste trabalho, causa deformações nas mesmas. Após o jateamento das chapas houve necessidade de nova calandragem para que as chapas retornassem a ter o mesmo raio de curvatura do tubo.

A rugosidade foi controlada segundo o procedimento do Laboratório de Adesão e Aderência, a partir da avaliação do parâmetro R_t (rugosidade total, distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação), segundo as

técnicas e considerações previstas na norma ISO 4288:1996 (E), utilizando-se o Rugosímetro Tridimensional de ponta indutiva TalyScan – Taylor Hobson - Figura 45.

Figura 45 – Rugosímetro Tridimensional



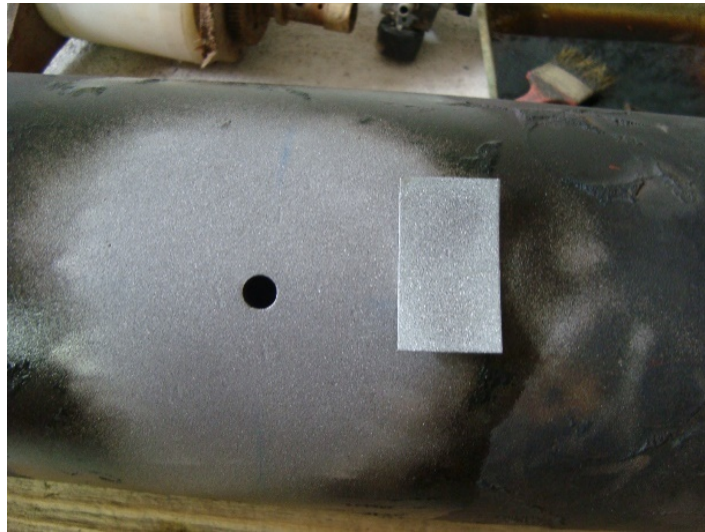
Fonte: O autor, 2013.

A rugosidade nas superfícies das chapas jateadas, obtiveram, em média, o valor $R_t = 56,62 \pm 1,77 \mu\text{m}$. Trabalhos realizados no Laboratório de Adesão e Aderência (LAA) demonstraram que na operação de jateamento utilizando-se granalha G40, a média do valor R_t supera o valor de $80 \mu\text{m}$ quando se utiliza compressor adequado (LIMAVERDE et al, 2006). Como neste trabalho objetiva-se o estudo e análise do fator de forma da área da chapa colada foi utilizado o compressor do laboratório apesar de o mesmo não apresentar capacidade de compressão para atingir rugosidades acima de $80 \mu\text{m}$.

2.4.1 Jateamento dos tubos

O jateamento dos tubos foi feito no mesmo equipamento utilizado para jateamento das chapas. A Figura 46 mostra o tubo e a chapa após o processo de jateamento.

Figura 46 – Tubo e chapa após o jateamento com granalha G40



Fonte: O autor, 2013.

As rugosidades dos tubos obtiveram, em média, o valor de $R_t = 68,09 \pm 12,34 \mu\text{m}$ medido com rugosímetro portátil marca mitutoyo, Figura 47. Como citado anteriormente, mesmo sem obter um fator R_t maior do que $80 \mu\text{m}$ foi dada continuidade ao trabalho.

Figura 47 – Rugosímetro portátil

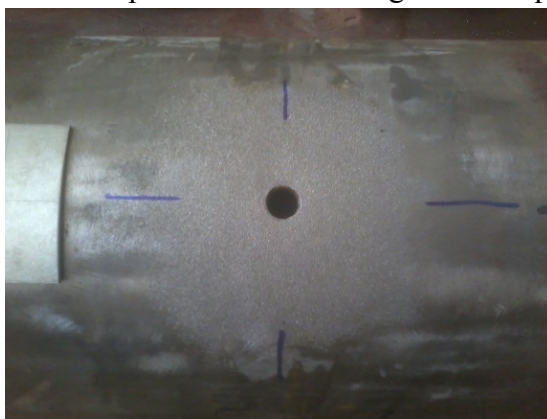


Fonte: O autor, 2013.

2.5 Preparação e colagem das chapas nos tubos

Após realizados os jateamentos das chapas e dos tubos, foi realizado no tubo uma marcação ortogonal do centro do furo, Figura 48. Após a marcação do centro do furo no tubo, foi efetuada a limpeza das áreas jateadas nas chapas e nos tubos para remoção de impurezas que possam prejudicar a colagem das chapas nos tubos. A limpeza foi feita utilizando-se spray contendo acetona. A Figura 49 mostra o processo de limpeza do tubo e da chapa.

Figura 48 – Marcação de guia do centro do furo para auxiliar na colagem da chapa



Fonte: O autor, 2013.

Figura 49 – Limpeza da área que serão coladas



(a)



(b)

Legenda: (a) – limpeza da chapa; (b) – limpeza do tubo.

Fonte: O autor, 2013.

Pesam-se em balança os dois componentes da resina estrutural à base de epóxi NVT (utilizado como prime adesivo estrutural no reparo Pipefix[®] de material

laminado). Em seguida, misturam-se bem os dois componentes até que o adesivo apresente coloração homogênea. Utilizando-se espátula aplica-se então, o adesivo na chapa e no entorno do furo no tubo. Após aplicado o adesivo, posiciona-se a chapa sobre o tubo, exercendo-se pressão para que seja retirado o excesso de resina da região entre os substratos, esse excesso de resina tem como finalidade minimizar a chance da falta de resina na região entre a chapa e o tubo. Neste momento, é de extrema importância que a marcação do centro da chapa coincida com a marcação do centro do furo no tubo, de forma a se obter o melhor alinhamento do centro da chapa com o centro do furo que está sendo reparado. O excesso de resina é retirado com espátula buscando-se deixar um ângulo de 45° como acabamento das bordas. As Figuras 50 (a) e (b) representam o que foi descrito.

Figura 50 – Processo de colagem da chapa no tubo



(a)

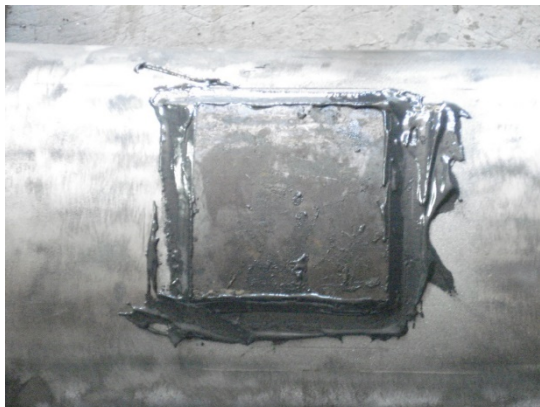


(b)

Fonte: O autor, 2013.

A Figura 51 mostra a chapa colada no tubo e a Figura 52 mostra o tubo com a chapa colada. O tempo de cura da resina, para se efetuarem os testes hidrostáticos, foi de 24 horas à temperatura ambiente por recomendação do fabricante.

Figura 51 – Chapa colada no tubo



Fonte: O autor, 2013.

Figura 52 – Tubo com reparo de chapa colada



Fonte: O autor, 2013.

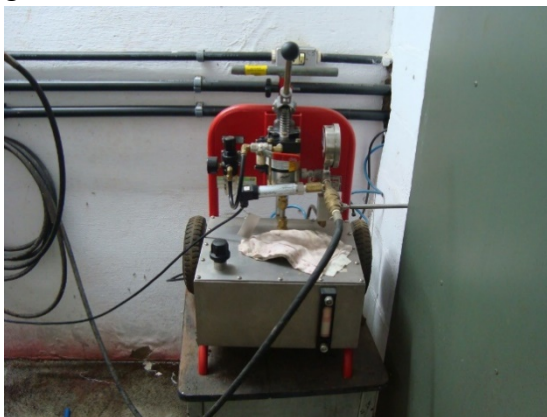
Foram feitas algumas colagens e testes hidrostáticos nos tubos com a finalidade de ter um domínio no processo de calandragem, jateamento e colagem das chapas metálicas. Após ter adquirido certo domínio no processo descrito, os dados obtidos nos ensaios seguintes foram utilizados no processamento estatístico.

2.6 Teste hidrostático

Os testes hidrostáticos foram realizados no laboratório de adesão e aderência (LAA) dentro dos padrões exigidos de segurança. Os testes hidrostáticos se basearam na Norma ASTM D 1599:05 que preconiza rampa de incremento de pressão de 1 bar por segundo. Os testes foram realizados até a ruptura dos reparos. As pressões de ruptura foram registradas pelo equipamento.

A Figura 53 mostra a bomba hidráulica, com acionamento pneumático, utilizada para a pressurização dos tubos. A bomba possui capacidade máxima de teste de 700 bar. O tubo encontra-se preparado para o início do ensaio hidrostático Figura 54.

Figura 53 – Bomba utilizada no teste hidrostático



Fonte: O autor, 2013.

Figura 54 – Tubos prontos para ensaio hidrostático



Fonte: O autor, 2013.

2.7 Análise estatística

Com o objetivo de determinar o efeito dos principais fatores que foram avaliados na resistência à força de ruptura dos reparos colados nos tubos bem como o de comparar os resultados obtidos entre os grupos, os dados obtidos através de ensaios hidrostáticos

na força de falhados reparos nos tubos foram processados por meio de metodologias estatísticas.

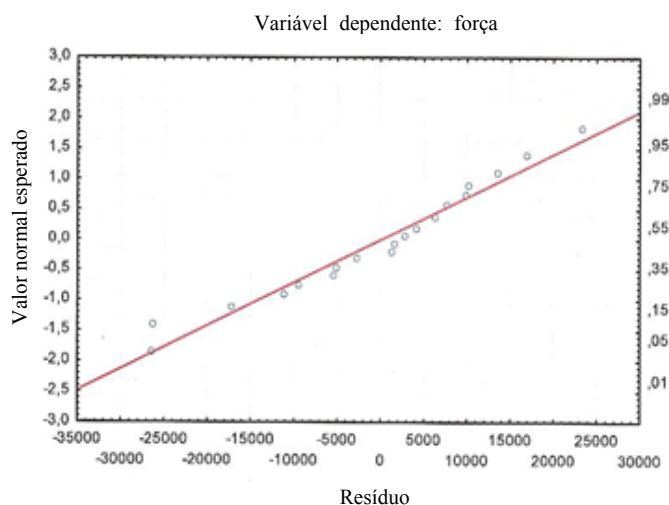
Serão feitas a seguira apresentação e a comparação das técnicas de processamento estatístico que norteou este trabalho.

2.7.1 Comparação entre os resultados obtidos na força de falha nos diversos grupos

Antes de fazer a análise de comparação múltipla dos valores da força de ruptura dos reparos entre os grupos propostos neste trabalho, serão verificados dois aspectos importantes do conjunto de dados para que possam ser devidamente representados por uma regressão linear estatística, são eles:

i) **Normalidade:** Será avaliada graficamente a distribuição dos resíduos em torno da curva representativa dos valores esperados para a normalidade dos dados. Vale ressaltar que quanto mais próximos estiverem os pontos da curva normal, maior será a probabilidade de que os resíduos, bem como a variável de resposta analisada, apresentem distribuição normal de probabilidade. O gráfico da distribuição dos resíduos da variável de resposta (força na falha) para verificação da normalidade dos resultados da amostra ensaiada é mostrado na Figura 55.

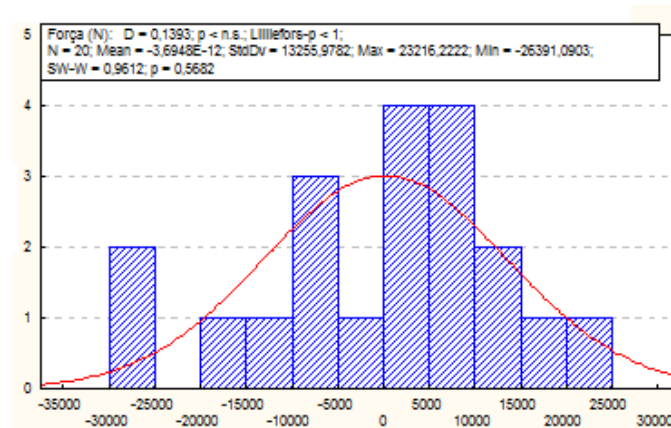
Figura 55 – Gráfico da normalidade dos resíduos



Fonte: O autor, 2013.

A Figura 56 mostra o histograma dos resíduos que apresenta a distribuição dos resíduos da variável de resposta e os resultados da estatística p dos testes da hipótese nula H_0 de normalidade dos resíduos segundo *Lilliefors* e *Shapiro-Wilks* para um valor de $\alpha = 0,05$.

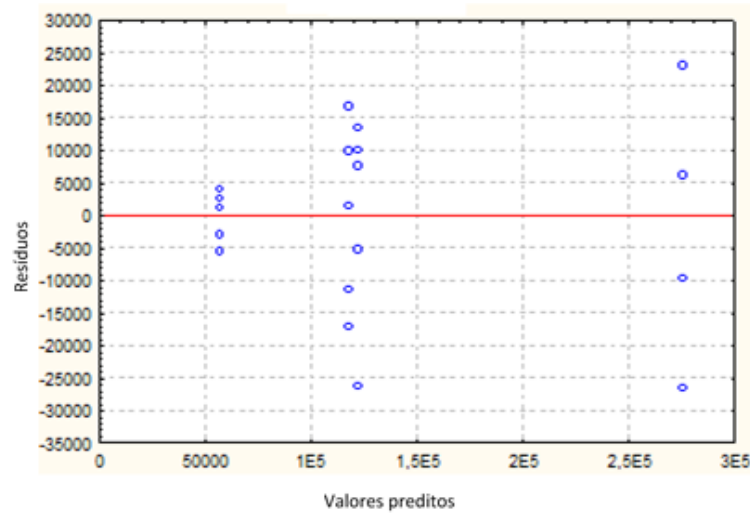
Figura 56 – Histograma – Resíduos



Fonte: O autor, 2013.

ii) **Homoscedasticidade (igualdade de variâncias):** Através do gráfico que apresenta a distribuição dos resíduos em torno dos valores da variável dependente com base nos valores preditos, será feita a avaliação da igualdade das variâncias. Para avaliação da hipótese nula de homoscedasticidade, espera-se que os resíduos apresentem-se dispersos de forma homogênea e sem tendências notáveis ao longo do eixo dos valores médios da variável dependente. Apresenta-se a seguir, na Figura 57, o gráfico que representa a distribuição dos resíduos em torno dos valores da variável dependente. Verifica-se que a dispersão dos resíduos, eixo y, em torno dos valores preditos para variável dependente, eixo x, não apresentam tendências notáveis, isto é, a amplitude ao redor do valor nulo apresenta forma semelhante.

Figura 57 – Gráfico de distribuição dos resíduos



Fonte: O autor, 2013.

Será feito o teste da hipótese nula H_0 de homoscedasticidade segundo o qual não há diferença estatística entre as variâncias analisadas. A hipótese nula não será rejeitada quando o valor de p for maior que 0,05. Existem diversos métodos estatísticos, não citados neste trabalho, que podem ser usados para o teste de comparação entre os diversos grupos. Será realizado o teste de *Cochran –Bartlett* e *Levene's*, para $\alpha = 0,05$ na avaliação da hipótese nula citada acima.

2.7.2 Análise por planejamento fatorial de experimentos

As influências das variáveis L, largura da chapa na direção longitudinal do tubo e C, comprimento da chapa na direção circunferencial do tubo, para variável de resposta força de falha do reparo foram determinadas através do planejamento fatorial de experimentos. O planejamento de fatorial experimentos permite o estudo estatístico e organizado do experimento visando minimizar a quantidade de experimentos e maximizar a qualidade das respostas obtidas. Dessa forma, citando *Montgomery*, “experimentos fatoriais são a única maneira de descobrir interações entre as variáveis” (MONTGOMERY, 2001).

Com o objetivo de analisar a influência nas variações da geometria da área colada da chapa metálica, bem como avaliar o comportamento de suas interações que contribuem para melhorar a resistência na força de ruptura do reparo, o planejamento de

experimentos será utilizado como uma ferramenta no tratamento dos dados que serão obtidos.

No caso do nosso trabalho, onde as informações relacionadas à força de ruptura do reparo são bem escassas, será utilizado um planejamento fatorial 2^2 para tratar parte dos dados. Nesse tipo de planejamento, será utilizado dois fatores: a largura da chapa na direção longitudinal do tubo (L) e o comprimento da chapa na direção circunferencial do tubo (C), ambos os fatores terão dois níveis, um inferior (-1) e o outro superior (+1). Os diferentes níveis das diferentes variáveis são cruzados em ensaios práticos e os resultados obtidos permitem direcionar qual é a combinação dos níveis das variáveis analisadas capaz de gerar resultados satisfatórios. O número de experimentos necessários para que todos os níveis de todas as variáveis analisadas se cruzem será o número de níveis adotado para cada variável elevado ao número de variáveis selecionadas para análise. Como neste exemplo analisamos duas variáveis a dois níveis cada, temos $2^2 = 4$ experimentos.

Quando se analisam fatores dentro de um planejamento experimental tem-se por objetivo verificar se os fatores selecionados influenciam as respostas esperadas e, em caso afirmativo, como isto se dá. O efeito isolado de uma variável sobre as respostas obtidas é chamado de **efeito principal da variável**. Entretanto, em alguns ensaios podemos perceber que a variação de um fator estará relacionada muitas vezes com a variação dos demais. Neste caso, as propriedades finais obtidas (respostas) decorrem da ação combinada dos fatores de entrada – 2, neste caso –, e não seriam obtidas a partir de uma ação isolada de cada um deles. Desta forma, os fatores devem ser analisados em conjunto e não isoladamente. Quando este fenômeno ocorre, verificamos a existência de um **efeito de interação** entre os diversos fatores analisados que determinarão as propriedades finais do produto.

Se observarmos a Tabela 6, podemos, a partir dos dados ali contidos, representativos da forma geral do projeto proposto, calcular o efeito principal do fator L, que é, por definição, a média do efeito, sobre a variável de resposta, da variação deste fator em cada um dos dois níveis do outro fator analisado (C), no caso de um planejamento 2×2 . O cálculo do efeito principal para o fator C é feito de forma análoga.

Tabela 6 – Representa os efeitos principais de cada variável e sua respectiva interação

Ensaio	Resultado do Ensaio	Fator L	Fator C	Interação LC
1	y_1	-1	-1	+1
2	y_2	+1	-1	-1
3	y_3	-1	+1	-1
4	y_4	+1	+1	+1

Fonte: O autor, 2013.

As colunas 1 e 2 codificam, respectivamente, o experimento realizado e seu respectivo resultado, correspondente à média dos corpos de prova ensaiados. Os valores y_i 's podem ser qualquer variável de saída sob análise, neste trabalho elas serão força na ruptura da chapa colada. As colunas 3 e 4 apresentam os níveis que foram utilizados em cada um dos ensaios. É possível perceber que, do ensaio 1 ao 4, todas as combinações possíveis de níveis dos fatores 1 e 2 são feitas.

Para uma análise onde são feitas n réplicas, definem-se os efeitos principais L e C dos fatores em análise (Fator L e Fator C) da seguinte forma:

$$L = \frac{1}{2n} [y_2 + y_4 - y_3 - y_1] \quad (17)$$

$$C = \frac{1}{2n} [y_3 + y_4 - y_2 - y_1] \quad (18)$$

O efeito de interação entre L e C pode ser definido como:

$$LC = \frac{1}{2n} [y_4 + y_1 - y_2 - y_3] \quad (19)$$

A título de complemento, vale ressaltar que os termos entre colchetes nas equações anteriores são denominados *contrastes*. A Soma dos Quadrados (SS) do fator L (SS_L), do Fator C (SS_C), da Interação LC (SS_{LC}), do Total (SS_T) e do Erro (SS_E) podem ser definidos pelas Equações 20 a 24, nesta ordem:

$$SS_L = \frac{1}{4n} [y_2 + y_4 - y_3 - y_1]^2 \quad (20)$$

$$SS_C = \frac{1}{4n} [y_3 + y_4 - y_2 - y_1]^2 \quad (21)$$

$$SS_{LC} = \frac{1}{4n} [y_4 + y_1 - y_2 - y_3]^2 \quad (22)$$

$$SS_T = \sum_1^4 \text{ensaios} (\sum_1^n \text{replicata}^2) - \frac{1}{4n} [\sum_1^4 \text{ensaios} (\sum_1^n \text{replicata})]^2 \quad (23)$$

$$SS_E = SS_T - SS_L - SS_C - SS_{LC} \quad (24)$$

O Quadrado Médio (MS) pode ser definido como a razão entre a Soma dos Quadrados (SS) e o grau de liberdade de cada um dos termos analisados. Os graus de liberdade bem como os demais elementos equacionados anteriormente são organizados na Tabela 7.

Tabela 7 – Análise de variância para planejamento fatorial 2 x 2

Análise	Soma dos Quadrados (SS)	Graus de Liberdade	Quadrados Médios (MS)
Fator L	SS_L	1	MS_L
Fator C	SS_C	1	MS_C
Interação LC	SS_{LC}	1	MS_{LC}
Erro*	SS_E	4(n-1)	MS_E
Total*	SS_T	4n-1	

Legenda: *n = número de replicatas em cada ensaio.

Fonte: O autor, 2013.

Planejamentos fatoriais de outras ordens irão apenas extrapolar os conceitos anteriores para mais fatores, mantendo-se a mesma metodologia descrita. O software utilizado na análise estatística é o Statistica versão 7.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A maior parte dos resultados obtidos referentes à força na ruptura do reparo apresentou desvios inferiores a 12% em relação às suas médias. Para cada grupo ensaiado manteve-se um número igual a 5 corpos de prova. Analisando-se cada grupo individualmente, verificou-se ainda que cada corpo de prova apresentou resultado para a força na ruptura do reparo dentro do intervalo previsto para uma confiabilidade de 95 %, ou seja, $\alpha = 0,05$.

3.1 Análisedos dados

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos referentes à força na ruptura dos reparos para os grupos analisados neste trabalho.

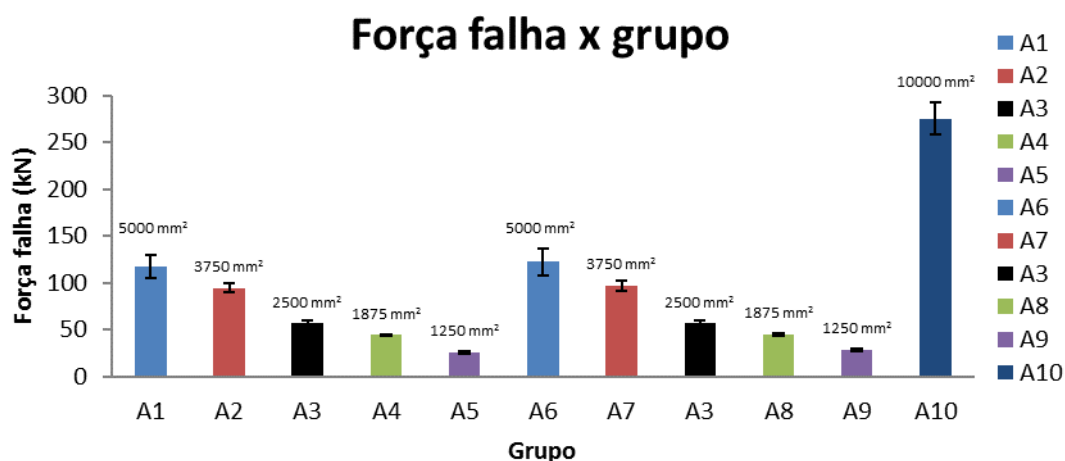
Tabela 8 – Resultado da força de ruptura para cada grupo ensaiado

Grupo		L (mm)	C (mm)	Área (mm ²)	Força na Ruptura (kN)
Análise da influência na variação da dimensão C da chapa colada.	1	50	100	5000	117,52±12,68(10,79%)
	2	50	75	3750	94,14±4,72(5,02%)
	3	50	50	2500	56,32±3,60(6,40%)
	4	50	37,5	1875	44,12±0,82(1,87%)
	5	50	25	1250	25,40±1,25(4,93%)
Análise da influência na variação da dimensão L da chapa colada.	6	100	50	5000	122,25±14,58(11,93%)
	7	75	50	3750	96,56±5,63(5,83%)
	8	37,5	50	1875	45,23±1,35(2,98%)
	9	25	50	1250	28,40±1,62(5,71%)
Grupo extra.	10	100	100	10000	275,42±16,77(6,09%)

Fonte: O autor, 2013.

As Figura 58 e 59 ilustram os resultados da Tabela acima, permitindo a comparação entre os grupos analisados. A Figura 58 mostra que, quanto menor a área colada, menor é a força na ruptura do reparo, tanto para variações na direção longitudinal do tubo quanto para variações na direção circunferencial do tubo.

Figura 58 – Força de ruptura do reparo de cada grupo

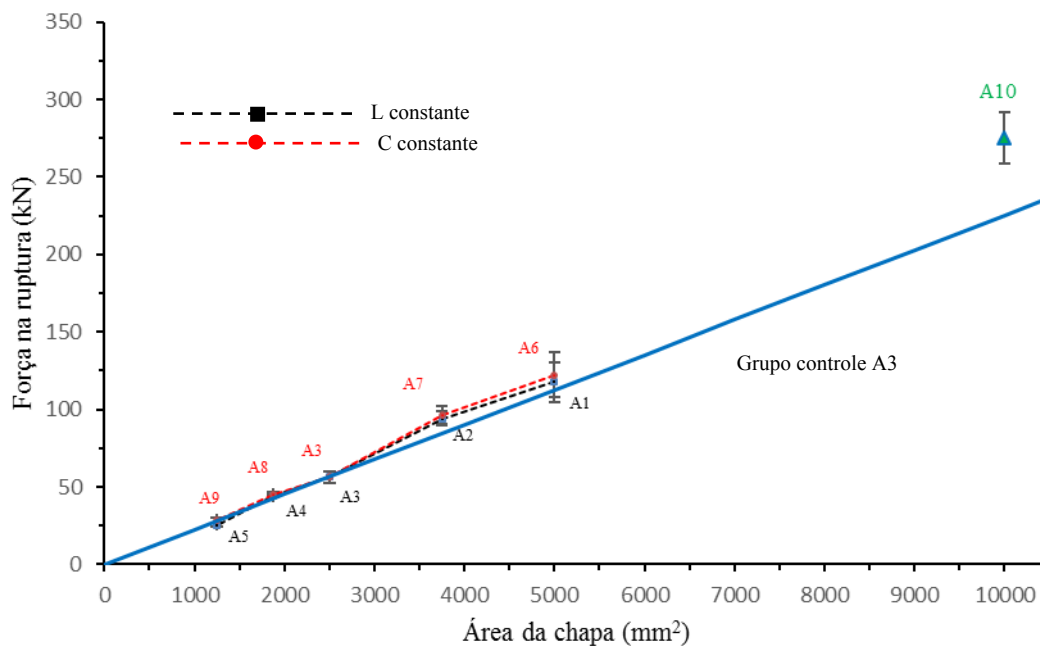


Fonte: O autor, 2013.

Como previsto pela literatura (BEER et al, 2011), os resultados que apresentaram maior força na ruptura do reparo foram aqueles de maior área colada, seja a partir do aumento na dimensão da chapa na direção circunferencial C quanto no aumento da dimensão da chapa na direção longitudinal L do tubo.

A Figura 59 mostra o comportamento em um gráfico típico força versus área de como a dimensão L ou a dimensão C da área da chapa colada afeta a força na falha do reparo. O grupo extra (10) na Tabela 8 acima será abordado à diante. Vale ressaltar nesse momento que foram analisadas tanto áreas superiores do valor fixado para o corpo de prova de controle (grupo 3 – área de 2500 mm², com L = C = 50 mm) quanto para áreas inferiores a este valor. O valor da força de falha do reparo obtido para a chapa confeccionada a partir da área do corpo de prova de controle foi aquele tomado como base para o traçado da reta que representa a relação proporcional entre força e área a partir dos resultados do corpo de prova de controle, grupo 3 citado anteriormente.

Figura 59 – Força x área para variações nas direções longitudinal L e circunferencial C da área da chapa colada



Fonte: O autor, 2013.

Fazendo-se uma análise da Tabela 8 bem como a Figura 59 verifica-se que a geometria da chapa colada exerce pouca influência na força de ruptura do reparo. Essa influência será discutida estatisticamente mais adiante.

3.2 Análise das falhas

Após uma análise detalhada das falhas, foi possível constatar que as mesmas ocorreram entre o substrato da chapa e o adesivo. A Figura 60 mostra o reparo rompido após o ensaio hidrostático de alguns tubos. Percebe-se claramente o caminho percorrido pela água na falha do reparo. Não foi percebido deformação da chapa e na maioria dos ensaios a chapa não saiu completamente do reparo.

Figura 60 – Ruptura do reparo após ensaio hidrostático



Fonte: O autor, 2013.

A Figura 60 indica que, após a ruptura do reparo, o adesivo ficou aderido no tubo e houve uma falha adesiva da chapa. O ideal é a ocorrência de falha coesiva. A falha adesiva da chapa pode ser explicada pelos mecanismos da adesão, ou seja, no tubo foi conseguido maior valor de rugosidade do que a chapa conforme descrito anteriormente. Verifica-se que houve uma boa aderência do adesivo no tubo.

3.3 Comparação estatística da força de ruptura para os grupos de mesma área

Os grupos de mesma área que tiveram suas dimensões variando na direção longitudinal L do tubo e as que tiveram suas dimensões variando na direção circunferencial C do tubo foram analisadas através da comparação par a par. Foi testada a significância das diferenças entre as médias amostrais de cada grupo de mesma área, variando sua dimensão na direção L ou na direção C em relação a chapa de referência.

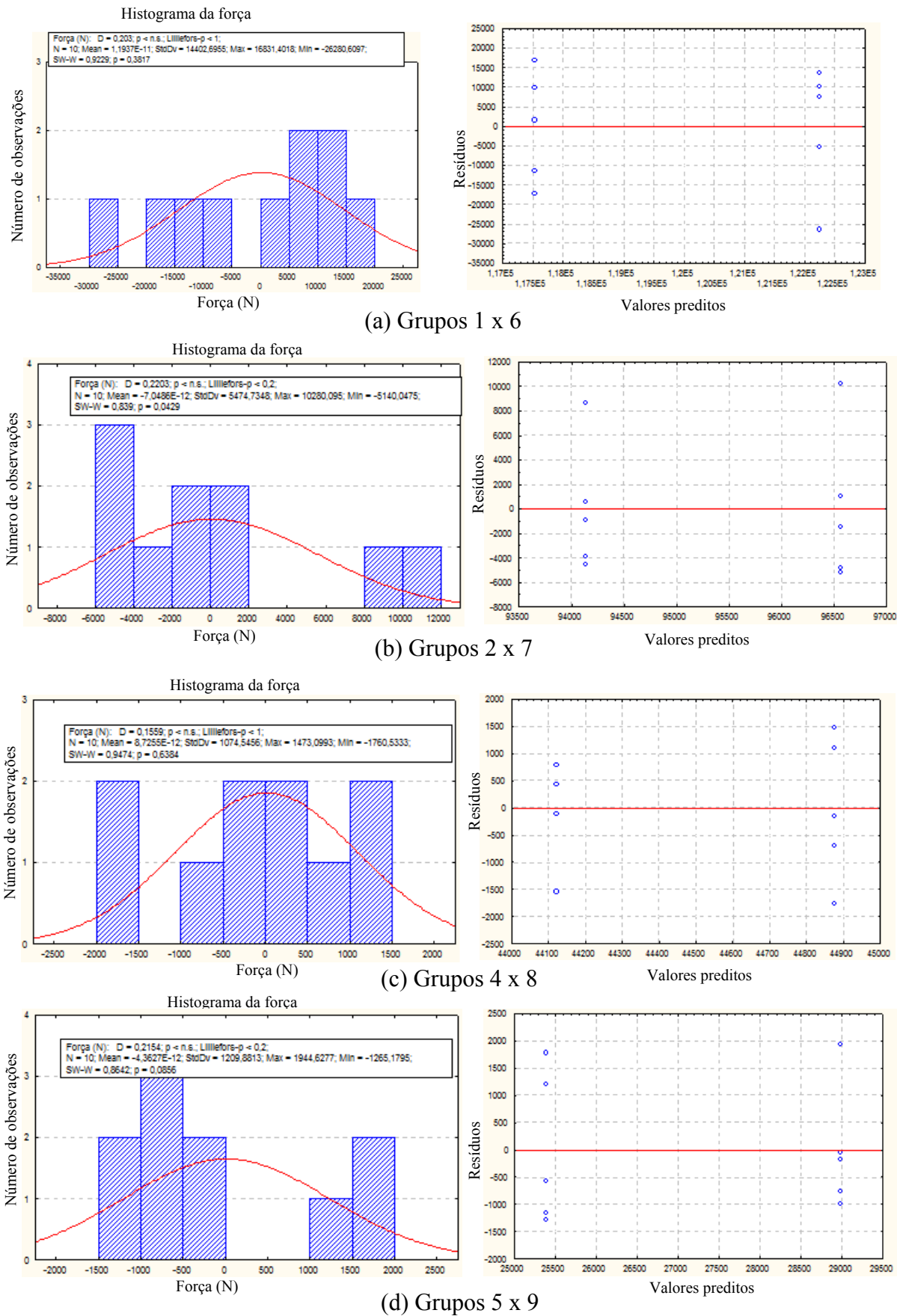
Será utilizada a análise de variância ANOVA para verificar se existe alguma diferença significativa na força de ruptura do reparo quando comparamos os grupos com áreas iguais. Para verificar estatisticamente se os grupos apresentam força de ruptura diferentes, formula-se a hipótese nula (H_0) de que não existe diferença estatística entre as médias na força de ruptura do reparo nos dois grupos de mesma área analisados, com o único objetivo de rejeitá-la ou não rejeitá-la.

Será verificado o valor da estatística p , calculada pelo programa Statística 7.0, para rejeitar ou não a hipótese nula H_0 com nível de significância de $\alpha = 0,05$. Para valores de $p > 0,05$ não rejeitaremos a hipótese nula.

3.3.1 Análise de normalidade e homoscedasticidade para cada par de grupos de mesma área

A Figura 61 apresenta o histograma dos resíduos e a distribuição dos resíduos de todos os grupos de pares com a mesma área analisados neste trabalho.

Figura 61 – Análise de normalidade e homoscedasticidade - Comparação por pares



Fonte: O autor, 2013.

Muitos dos testes estatísticos baseiam-se na não-rejeição da hipótese (nula) de que os resíduos de uma amostra sob análise não apresentam distribuição estatística que possa ser considerada diferente da distribuição de uma população com distribuição estatística normal. Para esta verificação, foram realizados os testes de *Shapiro-Wilks* e *Lilliefors* para o nível de significância $\alpha = 0,05$. Para o teste da hipótese nula H_0 de homoscedasticidade, segundo o qual não há diferença estatística entre as variâncias analisadas para $\alpha = 0,05$, foram realizados o teste de *Cochran - Bartlett* e *Levene's* na avaliação da hipótese nula citada acima. Em todos os testes citados analisaremos os valores de p calculado por programa estatístico. Para valores de $p > 0,05$ não rejeitaremos a hipótese nula.

Como o nosso interesse, nesse momento, é determinar estatisticamente se os grupos com a mesma área apresentam valores diferentes na força de ruptura do reparo quando variamos a dimensão da chapa na direção L ou C, a hipótese nula H_0 que será formulada será: **não existe diferença estatística entre as médias na força de ruptura nos grupos de mesma área colada**. Será adotado o nível de significância $\alpha = 0,05$, para verificação do valor de p segundo o teste de *Fischer LSD*. Para valores de $p > 0,05$ não rejeitaremos a hipótese nula de que não existe diferença estatística entre as médias na força de ruptura entre os grupos avaliados.

Como citado anteriormente, serão avaliados os valores de p para os testes de *Shapiro-Wilks* e *Lilliefors* de normalidade dos resíduos, Tabela 9, e de *Cocran Hartley* e *Levene's* para o teste de homoscedasticidade, Tabela 10.

Tabela 9 – Análise da normalidade – comparação de pares

Grupos de mesma área	Valor de p para normalidade dos resíduos. H_0 : Não pode-se diferenciar a distribuição de resíduos de uma distribuição normal.	
	Shapiro-Wilks	Lilliefors
1 x 6	0,38	1
2 x 7	0,04	0,2
4 x 8	0,64	1
5 x 9	0,08	0,2

Fonte: O autor, 2013.

Tabela 10 – Análise da homoscedasticidade – comparação por pares

Grupos de mesma área	Valor de p para homoscedasticidade. H ₀ : Não há diferença estatística entre as variâncias analisadas.	
	Cochran-Bartlett	Levene's
1 x 6	0,80	0,80
2 x 7	0,74	0,71
4 x 8	0,50	0,35
5 x 9	0,72	0,32

Fonte: O autor, 2013.

Os valores de p , tanto para normalidade quanto para homoscedasticidade, apresentaram-se para todos os pares um valor de $p > 0,05$. Esses resultados demonstram que as hipóteses nulas de normalidade dos resíduos e homoscedasticidade não podem ser rejeitadas a um nível de significância de $\alpha = 0,05$.

Para o teste de comparação estatística entre as médias na força de ruptura do reparo dos grupos de mesma área foi realizado o teste de Fischer *LSD* com $\alpha = 0,05$. A Tabela 11 mostra o valor de p para o teste citado para os pares de grupos de mesma área.

Tabela 11 – Teste Fisher – comparação por pares

Grupos de mesma área	Valor de p para o teste de Fischer <i>LSD</i> . H ₀ : Não existe diferença estatística na força de ruptura dos grupos analisados.
	Fischer <i>LSD</i>
1 x 6	0,64
2 x 7	0,53
4 x 8	0,33
5 x 9	0,002

Fonte: O autor, 2013.

Como pode ser visto na Tabela 11, o valor de p obteve valor menor que 0,05 apenas para o par de mesma área dos grupos 5 e 9, rejeitando-se assim a hipótese nula, ou seja, os grupos 5 e 9 apresentam valores médios na força de ruptura da chapa estatisticamente diferentes. O grupo 9 que possui maior dimensão na direção circunferencial do tubo apresentou um valor superior em 12% na força de ruptura da chapa apresentada pelo grupo 5. É importante de ressaltar que os grupos 5 e 9 são representados pela menor área de chapa colada de todos os grupos avaliados neste trabalho.

Os outros grupos apresentaram valores de p maiores que 0,05, não rejeitando-se, assim, a hipótese nula de que não existe diferença estatística na força de ruptura dos pares de grupos avaliados. Cada grupo de mesma área apresenta para média na força de ruptura da chapa valores estatisticamente iguais. Estes resultados demonstram que a força de ruptura da chapa não depende se a maior dimensão da chapa se encontra colada na direção longitudinal ou circunferencial do tubo.

Os resultados apresentados anteriormente, demonstram que a força na ruptura da chapa colada não é impactada pela relação L/C , ela se apresenta como uma função da área da chapa colada independente se a área aumenta na direção longitudinal (L) ou circunferencial (C). Os grupos 5 e 9 não foram considerados na análise acima pelo fato de apresentar menor área da chapa colada o que mecanicamente não é interessante.

3.4 Comparação dos grupos principais utilizados no planejamento fatorial de experimentos

De forma a avaliarmos estatisticamente qual das dimensões, longitudinal ou circunferencial, tem maior influência na força de ruptura nos reparos, foi efetuada a análise via planejamento fatorial de experimentos. Os grupos utilizados no planejamento fatorial de experimentos foram: grupos 1, 3 e 6 e um grupo particular, grupo 10, em que tanto o valor da dimensão na direção longitudinal quanto na direção circunferencial da área colada da chapa foram duplicados em relação às dimensões do grupo de controle (grupo 3). A Tabela 12 reúne os grupos utilizados na análise deste planejamento fatorial de experimentos bem como os valores das médias na força de ruptura do reparo obtidas nos ensaios hidrostáticos, incluindo-se o grupo 10.

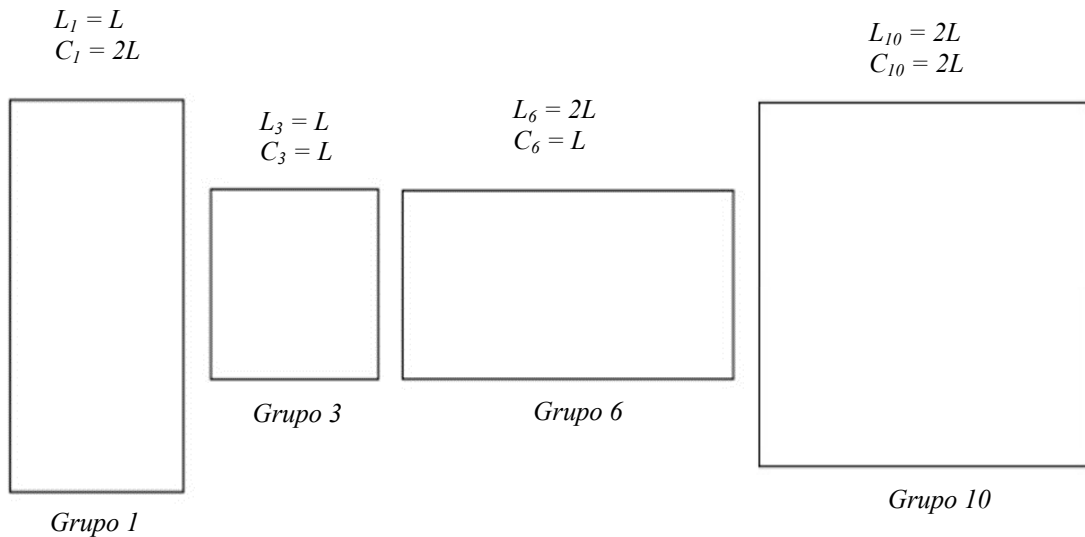
Tabela 12 – Grupos utilizados no planejamento fatorial de experimentos

Grupo	Longitudinal – L (mm)	Circunferencial – C (mm)	Área (mm ²)	Força na ruptura (kN)
1	50	100	5000	117,52±12,68 (10,79%)
3	50	50	2500	56,32±3,60 (6,40%)
6	100	50	5000	122,25±14,58 (11,93%)
10	100	100	10000	275,42±16,77 (6,09%)

Fonte: O autor, 2013.

A Figura 62 mostra os desenhos das chapas dos grupos utilizados no planejamento fatorial de experimentos.

Figura 62 – Grupos utilizados no planejamento fatorial de experimentos

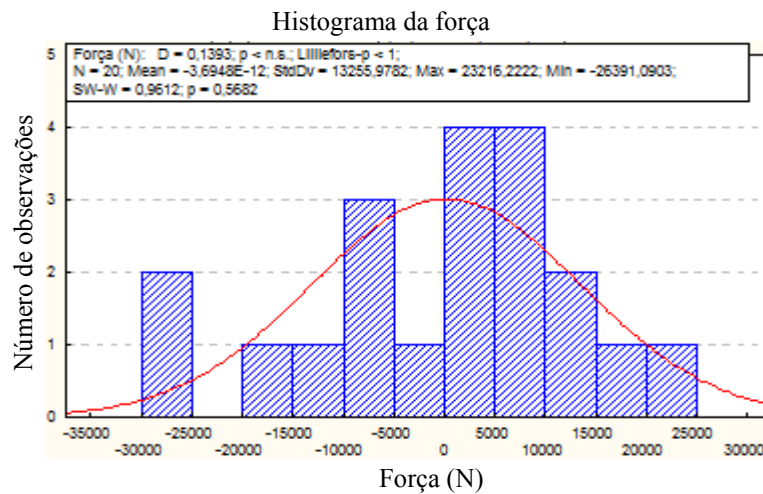


Fonte: O autor, 2013

Dando-se continuidade a metodologia utilizada neste trabalho, foram realizados os testes de normalidade e homoscedasticidade para os grupos utilizados no planejamento fatorial de experimentos.

A Figura 63 mostra o histograma dos resíduos que apresenta a distribuição dos resíduos da variável de resposta e os resultados dos testes de normalidade segundo *Lilliefors* e *Shapiro-Wilks* para os grupos utilizados no planejamento fatorial de experimentos. Formula-se como hipótese nula H_0 que não pode-se diferenciar a distribuição dos resíduos da variável de resposta força de ruptura do reparo de uma distribuição normal.

Figura 63 – Histograma dos resíduos da variável de resposta para os grupos utilizados no planejamento fatorial de experimento

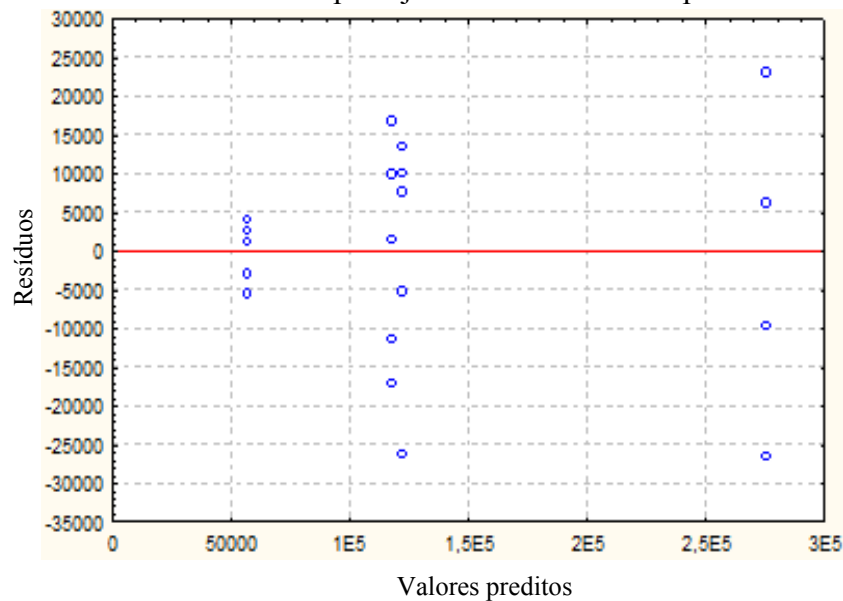


Fonte: O autor, 2013.

Em ambos os testes, citados anteriormente, foi observado um valor de $p > 0,05$, o que conduz à não-rejeição da hipótese nula H_0 de normalidade dos resíduos. Dessa forma consideramos a normalidade dos resíduos, para $\alpha = 0,05$, para os grupos utilizados no planejamento fatorial de experimento.

Para avaliação da hipótese nula de homoscedasticidade será avaliado o valor de p obtido segundo os testes de *Cochran – Bartlett* e *Levene's* para $\alpha = 0,05$. Formula-se a hipótese nula H_0 de que não há diferença estatística entre as variâncias analisadas. A Figura 64 mostra o gráfico da distribuição dos resíduos para o teste da homoscedasticidade dos grupos utilizados no planejamento fatorial de experimentos.

Figura 64 – Gráfico de distribuição dos resíduos para os grupos utilizados no planejamento fatorial de experimento



Fonte: O autor, 2013.

O valor de p para o teste de *Cochran – Bartlett* foi de $p = 0,08$ e o teste de *Levene's* apresentou $p = 0,11$. Em ambos os testes foi observado um valor de $p > 0,05$, o que nos conduz à não-rejeição da hipótese nula H_0 de homoscedasticidade. Dessa forma, considera-se que os grupos utilizados no planejamento fatorial de experimentos são homoscedásticos para $\alpha = 0,05$.

Será apresentado a seguir, na Tabela 13, o resultado da análise de variância dos dados a partir da tabela ANOVA, considerando-se a análise segundo DOE – *Design of Experiments* – para obtenção da equação de regressão. É importante destacar que as análises de erro foram feitas em relação ao erro puro (*PURE ERROR*) de forma a considerar a variabilidade das replicatas existentes, sem atribuir todo erro ao modelo adotado (SS residual). A análise de significância será feita verificando-se o valor da distribuição p . Será formulada como hipótese nula H_0 que os fatores de entrada não influenciam as variáveis de resposta que é a força de ruptura da chapa colada.

Tabela 13 – Tabela ANOVA para o grupo utilizado no planejamento fatorial de experimentos

Fator	ANOVA – $R^2 = 0,975$ / $R^2\text{-adj} = 0,970$				
	<i>SS</i>	<i>GL</i>	<i>MS</i>	<i>Fischer</i>	<i>p</i>
(1) L (mm)	6,26199E+10	1	6,26199E+10	300,093	0,000000
(2) C (mm)	5,74442E+10	1	5,74442E+10	275,289	0,000000
L x C	1,05730E+10	1	1,05730E+10	50,669	0,000002
Erro puro	3,33870E+10	16	2,08669E+10		
<i>SS total</i>	1,33976E+10	19			

Fonte: O autor, 2013.

Na tabela acima verifica-se que os fatores avaliados neste trabalho apresentaram valores de $p \ll 0,05$. Dessa forma, pode-se rejeitar a hipótese nula de que os fatores de entrada (dimensão longitudinal L e dimensão circunferencial C) não influenciam a variável de resposta força na ruptura da chapa. Neste caso, todos os efeitos principais, tanto para dimensão longitudinal L quanto para dimensão circunferencial C das chapas coladas foram consideradas significativa. Verifica-se também a significância dos efeitos da interação entre os fatores dimensão longitudinal L e dimensão circunferencial C. Esta interação, significativa, nos mostra que esses fatores não devem ser analisados separadamente, ou seja, em análises individuais, pois o valor do nível em que se encontra um dos fatores irá impactar diretamente na influência que o outro fator tem na força de ruptura da chapa colada.

A Tabela 14 mostra os valores dos efeitos para os fatores dimensão longitudinal L e circunferencial C analisados e suas respectivas interações.

Tabela 14 – Valores dos efeitos para os fatores avaliados

Fator	Análise de efeitos – $R^2 = 0,975$ / $R^2\text{-adj} = 0,970$		
	Efeito	Erro padrão (erro puro)	<i>p</i>
Média	142879,2	3230,1	0,000000
(1) L (mm)	111910,6	6460,2	0,000000
(2) C (mm)	107186,0	6460,2	0,000000
L x C	45984,7	6460,2	0,000002

Fonte: O autor, 2013.

Fazendo-se a análise dos resultados dos valores obtidos para os efeitos dos fatores avaliados, percebe-se:

- ✓ Dobrando-se a dimensão da chapa na direção longitudinal do tubo em relação à dimensão utilizada para controle dos experimentos, obteve-se um aumento da força de ruptura do reparo de, em média, 111,9 kN, que é o valor do efeito principal para o referido fator;
- ✓ Dobrando-se a dimensão da chapa na direção circunferencial do tubo em relação à dimensão utilizada para controle dos experimentos, obteve-se novamente um aumento da força de ruptura do reparo de, em média, 107,2 kN, que é o valor do efeito principal para o referido fator.

A análise feita anteriormente mostra que são obtidos valores maiores na força de ruptura do reparo quando a dimensão da chapa é aumentada tanto na direção longitudinal quanto da circunferencial comparada com a dimensão da chapa de controle.

Para todos os casos dos fatores analisados, os erros associados ao efeito apresentam-se com, pelo menos, uma ordem de grandeza inferior. Isso demonstra que os resultados experimentais obtidos apresentam qualidade.

O efeito de interação entre as dimensões na direção longitudinal e circunferencial do tubo possuem valor não nulo, porém inferior aos efeitos principais quando a área da chapa colada é aumentada isoladamente nas direções longitudinal e circunferencial do tubo. Como existe efeito de interação entre os fatores avaliados, mesmo com uma importância menor em relação ao efeito dos fatores isolados, não devemos negligenciar essa interação.

À frente serão utilizados coeficientes mais adequados, sem escalonamento, aos quais podem ser aplicados os valores reais dos níveis dos fatores avaliados.

O valor de R^2 -ajustado, neste caso, é 0,975, indicando que o modelo, cuja equação de regressão será apresentada à frente, representa de forma bastante satisfatória a dispersão experimental dos dados obtidos.

A Tabela 15 traz os coeficientes para confecção das equações com as variáveis em seus domínios originais.

Tabela 15 – Tabela dos coeficientes da regressão não escalonados para força de ruptura do reparo

Fator	Análise de efeitos – $R^2 = 0,975$ / $R^2\text{-adj} = 0,970$	
	<i>Coeficiente de regressão</i>	<i>Erro padrão (erro puro)</i>
Média	21165,36	32300,82
(1) L (mm)	-520,87	408,58
(2) C (mm)	-615,36	408,58
L x C	36,79	5,17

Fonte: O autor, 2013.

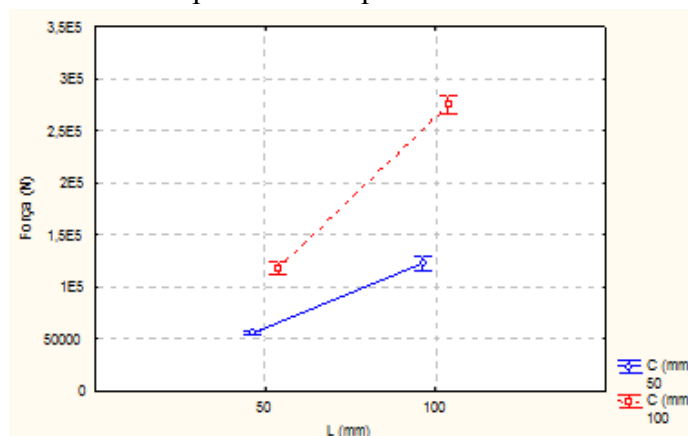
Considerando-se as dimensões (L e C) das chapas utilizadas neste trabalho, o tratamento superficial das chapas e dos tubos, o adesivo utilizado, o tempo de cura do adesivo, o diâmetro do tubo bem como o diâmetro do furo, propõe-se o modelo a seguir para força de resistência do reparo:

$$F(N) = f[L(mm), C(mm)] = 21165,36 - 520,87L - 615,36C + 36,79LC \quad (25)$$

É importante ressaltar que esta tabela não deve ser usada para análise de significância dos fatores, tendo em vista que estes já não estão escalonados e, portanto, com pesos diferentes na análise, pois considera-se a ordem de grandeza física de cada variável.

Os gráficos 2D a seguir, Figuras 65 e 66, mostram o comportamento dos fatores das dimensões longitudinal e circunferencial avaliados, para ratificação das discussões apresentadas anteriormente.

Figura 65 – Efeito da dimensão longitudinal L na força de ruptura das chapas coladas

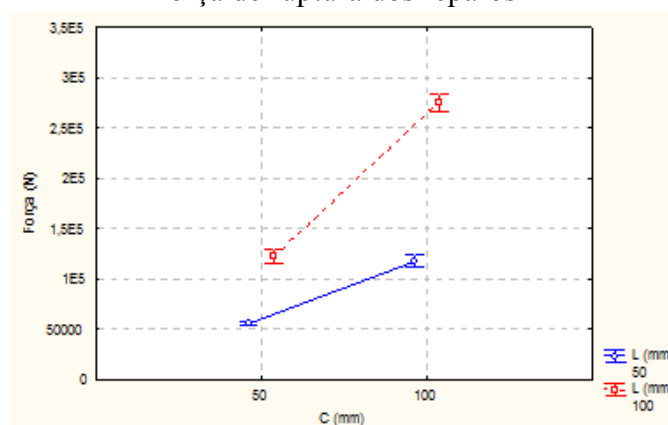


Fonte: O autor, 2013.

O gráfico acima mostra os valores da força de ruptura do reparo em função da dimensão longitudinal do tubo para as diferentes dimensões na direção circunferencial do tubo que foram adotadas neste planejamento fatorial de experimentos. Através do gráfico verifica-se que o aumento na dimensão longitudinal da área da chapa colada promove um aumento da força de ruptura do reparo e este aumento tem maior incremento aparente quando maiores dimensões na direção circunferencial são utilizadas. Verifica-se também que os grupos de mesma área, $L \times C$, 50 mm x 100 mm (grupo 1) e 100 mm x 50 mm (grupo 6) apresentam o mesmo resultado.

Mostram-se no gráfico da Figura 66 os valores da força de ruptura do reparo em função da dimensão circunferencial do tubo para as diferentes dimensões na direção longitudinal do tubo.

Figura 66 – Efeito da dimensão circunferencial C na força de ruptura dos reparos

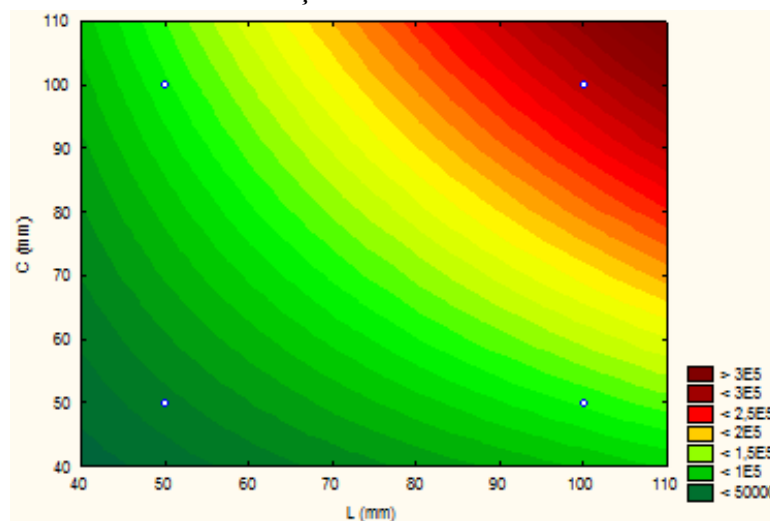


Fonte: O autor, 2013.

De forma análoga na análise feita anteriormente para dimensão longitudinal, observa-se que o aumento na dimensão circunferencial da área da chapa colada promove um aumento da força de ruptura do reparo e este aumento tem maior incremento quando maiores dimensões na direção longitudinal são utilizadas. As análises feitas anteriormente para os efeitos, considerando-se o aumento das dimensões, estão coerentes com a literatura (BEER et al, 2011), pois quanto maior a área colada maior será a força de ruptura da chapa colada.

Apresenta-se na Figura 67 a superfície de resposta da força de ruptura da chapa colada para os valores das dimensões variando nas direções longitudinal e circunferencial do tubo utilizados neste trabalho. Foram incluídos todos os grupos, inclusive aqueles não utilizados no processamento via planejamento fatorial de experimentos.

Figura 67 – Curvas de nível para força de ruptura da chapa em função de L e C



Fonte: O autor, 2013.

A Figura 67 mostrada anteriormente, demonstra a ocorrência de interação entre as duas dimensões longitudinal L e circunferencial C, como dito anteriormente, e os efeitos produzidos pelas duas dimensões possuem praticamente a mesma ordem de grandeza.

CONCLUSÕES

Para as condições utilizadas neste trabalho, as maiores forças de ruptura foram aquelas de maior área da chapa colada, o que condiz com a relação linear entre força e área. Embora a tensão circunferencial seja o dobro da tensão longitudinal no tubo sob pressão interna, neste trabalho concluímos que não existe diferença estatística na força de ruptura da chapa colada quando comparamos a mesma área colada seja quando varia-se a dimensão da chapa na direção longitudinal ou circunferencial do tubo. A menor pressão de falha dos grupos utilizados neste trabalho foi de 216 bar, valor muito superior que as pressões de trabalho (em torno de 70 bar) normal de uma tubulação similar as utilizadas nos testes, fazendo com que a metodologia utilizada seja muito promissora como um reparo de contingência.

Todos os reparos dos grupos analisados neste trabalho tiveram falha entre o substrato da chapa e o adesivo o que caracteriza falha adesiva. O adesivo ficou aderido no substrato do tubo. A falha aconteceu com o surgimento de trinca entre a chapa e o adesivo, por onde o fluido escoou. Teve uma exceção que foi o grupo 5 (de menor área analisada), o reparo falhou com saída da chapa como um projétil.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo da influência da espessura da chapa na eficiência do reparo;
- Fazer estudo da pressão de falha utilizando temperatura;
- Estudo do comportamento do reparo em fluência;
- Estudo do comportamento do reparo com diferentes tratamentos superficiais;

REFERÊNCIAS

ADAMIAN, R.; ALMENDRA, E. R. *Físico-Química: Uma aplicação aos materiais*. COPPE/UFRJ, 2002.

ALFA CONNECTION. Disponível em:
<http://alfaconnection.net/pag_avsf/fqm0101.htm>. Acesso em: 22 out.2014.

BEER, F.P.; JOHNSTON Jr, E. R.; DeWOLF, J.T.; MAZUREK, D.F. *Mecânica dos Materiais*. 5.ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

BRASIL ESCOLA. Disponível em: :
<http://www.brasilecola.com/upload/conteudo/images/formato-esferico-da-agua.jpg>.
Acesso em: 22/10/2014.

CALLISTER JR., W. D. *Materials science and engineering: an introduction*. 7th. ed. New York: Wiley, 2007.

CETESB. *Emergências químicas*. Disponível em:
<<http://www.cetesb.sp.gov.br/gerenciamento-de-riscos/emergencias-quimicas/146-causas-acidentes-em-sao-paulo>>. Acesso em: set. 2014.

DELOLLIS, N.J. *Adhesives for metals: Theory and tecnologia*. New York: Industrial Press, 1970.

FERRANTE, M. *Seleção de Materiais: Engenharia de Materiais*. EdUFSCar, 2002.

HIBBELER, R. C. *Resistência dos Materiais*. 5.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, [s.d.]

HOUWINK, R.; SALOMON, G. *Adhesion and adhesives*. New York: Elsevier, 1965.

IPB. *Teoria do estado de tensão*. Disponível em:
<<http://www.ipb.pt/~mnvalente/MA2/MA2-TeoriaDoEstadodeTensao>>. Acesso em: set. 2014.

KINLOCH, A.J. *Adhesion and adhesives science and technology*. New York: Chapman and Hall, c1987.

MONTGOMY, D.C.; RUNGER, G.C.; HUBELE, N.F. *Estatística aplicada à engenharia*, 2. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

NETO, B. B. et al. *Como fazer experimentos*. 3. Ed. Editora da Unicamp, 2007.

PERRUT, V. A. *Análise de reparo de tubos com defeito transpassante por meio de materiais compósitos*. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

PERRUT, V. A.; MENICONI, L. C. DE M. *Qualificação de adesivos para reparo estrutural*. CENPES, 2008. 18p.(RT TMEC; n. 003/08).

PETROBRAS. *N 2737-05: Manutenção de oleoduto e gasoduto terrestre*. 2005.

PETROQUÍMICA E BIOCMBUSTÍVEIS, nº 67, 2009. Disponível em: <www.tnppetroleo.com.br>.

POCIUS, A.V. *Adhesion and adhesives technology: an introduction*. New York: Hanser, 1997.

REVISTA BRASILEIRA DE TECNOLOGIA E NEGÓCIOS DE PETRÓLEO, GÁS.

ROCHA, W. R. Interações Intermoleculares. *Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola*, n. 4, p. 31, maio 2001.

ROHEM, N. R. F. *Desenvolvimento de sistema de reparo para dutos em Tubulações industriais utilizando materiais compósitos de matriz polimérica*, 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, 2010.

SAMPAIO, E. M. *Um modelo de danos para juntas coladas*. 1998. Tese (Doutorado) COPPEUFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

SAMPAIO, E.M. et al. *Aderência de juntas metálicas de cisalhamento coladas com adesivos epoxídicos de baixa e alta viscosidade*. CBCIMAT, 2006.

SILVA, A. H. M. F. T. *Proposta de um critério de resistência para juntas metálicas coladas*. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2007.

SPIEGEL, M.R. *Estatística*. 3. Ed. Rio de Janeiro: Makron Books, 1993. (Coleção Schaum)

TELLES, P. C. S. *Tubulações industriais: materiais, projeto e montagem*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

APÊNDICE A – Estatística

- Amostra \Rightarrow parte da população que é selecionada ao acaso com o objetivo de se fazerem alguma inferência sobre a população.
- População \Rightarrow conjunto de todos os valores ou indivíduos, finito ou infinito.
- Média amostral \Rightarrow a média amostral é definida pela Equação 26:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (26)$$

Onde:

$x_i \Rightarrow$ i-ésimo termo

$N \Rightarrow$ número total de valores da amostra ou grau de liberdade da amostra

- Variância amostral \Rightarrow a variância amostral é dada pelo somatório dos quadrados de todos os desvios e dividido por $N-1$, de acordo com a Equação 27:

$$V_x = s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (27)$$

Onde:

$x_i \Rightarrow$ i-ésimo termo

$N \Rightarrow$ número total de valores da amostra ou grau de liberdade da amostra

$\bar{x} \Rightarrow$ média amostral

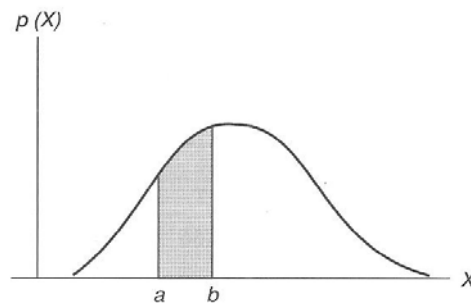
- Desvio padrão \Rightarrow indica o valor da incerteza dos dados, mostra o quanto um conjunto de dados se aproxima da média. Um desvio padrão igual a zero indica que todos os dados são iguais a média. Um valor alto para o desvio padrão indica que os valores da amostra são distantes da média. O desvio padrão é dado pela Equação 28.

$$s = \sqrt{V_x} = \sqrt{s^2} \quad (28)$$

Distribuição de probabilidade contínua

A frequência relativa de uma amostra torna-se, no caso teórico ou limite de uma população, uma curva contínua cuja função é $Y = p(x)$. A área total limitada por essa curva e pelo eixo dos X é igual a 1, e a área compreendida entre as verticais $X = a$ e $X = b$ (sombreada na Figura 68) nos mostra a probabilidade de X cair entre a e b , a qual pode ser representada por $\Pr \{a < X < b\}$ (SPIEGEL, 1993).

Figura 68 – Curva contínua distribuição de probabilidade



Fonte: SPIEGEL, 1993.

Distribuição normal

Um dos modelos estatísticos mais importante de uma distribuição contínua de probabilidade é a distribuição normal ou distribuição de Gauss. Por definição, na distribuição normal os parâmetros são apenas dois: a média e a variância populacional, Equação 29.

$$f(x)dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (29)$$

Onde:

$f(x) \Rightarrow$ densidade de probabilidade da variável aleatória x ;

$\mu \Rightarrow$ média populacional;

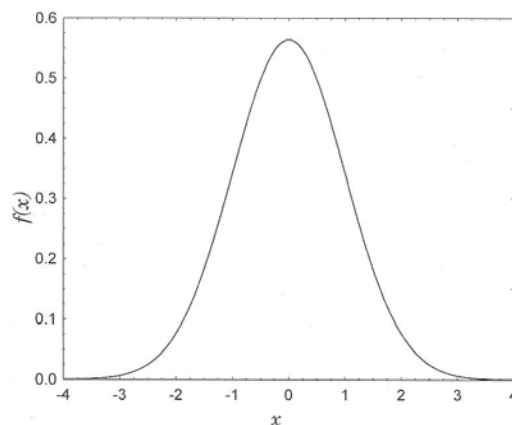
$\sigma^2 \Rightarrow$ variância populacional.

Diz-se que uma distribuição normal é padronizada quando sua média populacional é igual a zero, $\mu = 0$, e sua variância populacional igual a 1, $\sigma^2 = 1$. Para esse tipo de distribuição a Equação 30 toma a seguinte forma:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (30)$$

A Figura 69 mostra a curva em forma de sino de uma distribuição normal padrão. A curva é simétrica em torno do ponto central que representa a média onde ocorre o valor máximo da densidade de probabilidade, na medida que nos afastamos da média, em ambos os lados, esse valor diminui rapidamente. A três desvios padrão, a direita ou a esquerda da média, o valor da densidade de probabilidade se reduz a praticamente zero.

Figura 69 – Curva de uma distribuição normal padrão



Fonte: BARROS NETO et al, 2007.

Variável normal padronizada

Padronizar uma variável aleatória x de média μ e variância σ^2 é construir a partir dela uma nova variável aleatória z , cujos valores são obtidos subtraindo-se de cada valor

de x a média populacional e dividindo-se o resultado pelo desvio padrão (BARROS NETO et al, 2007). A padronização é dada pela Equação 31.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (31)$$

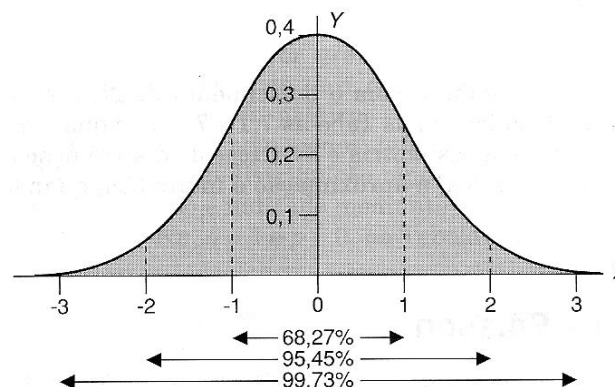
Onde:

$x \Rightarrow$ variável aleatória com distribuição $N(\mu, \sigma^2)$

$z \Rightarrow$ variável aleatória com distribuição $N(0,1)$

Existem tabelas que mostram quantos por cento de uma população se encontram dentro de uma faixa de valores de z , esses valores se encontram entre 0 e 3,99. A Figura 70 mostra algumas faixas de valores de z e suas respectivas probabilidades.

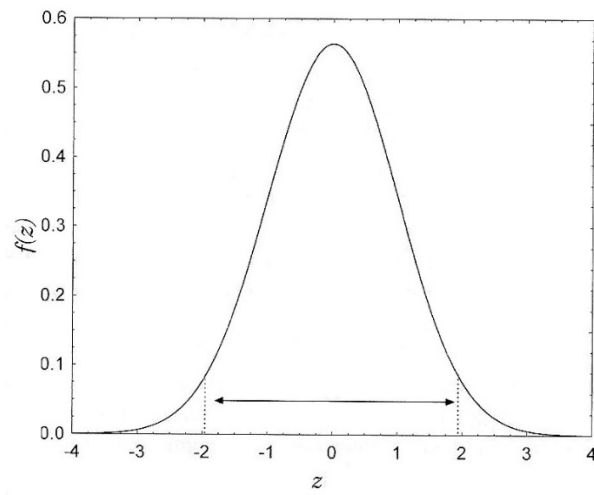
Figura 70 – Gráfico da probabilidade entre valores de z



Fonte: SPIEGEL, 1993, p. 187.

Para um valor igual a 0,025, ou seja, 2,5 % da área total sob a curva, esta área fica localizada à direita de $z = 1,96$. Como a curva é simétrica em torno da média, uma área idêntica está à esquerda de $z = -1,96$, ou seja, para uma probabilidade de ocorrência de 95 %, o valor de z deverá estar compreendida entre $z = -1,96$ e $z = 1,96$.

Figura 71 – Valores de z que corresponde a 95 % da área de uma distribuição normal padrão.



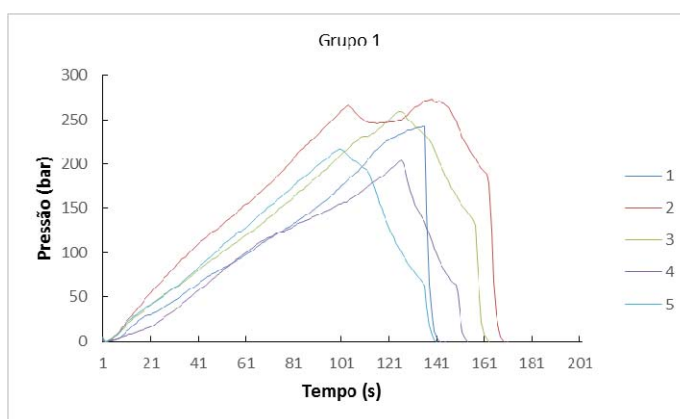
Fonte: BARROS NETO et al, 2007, p. 52.

APÊNDICE B – Tabelas e gráficos com os resultados obtidos nos experimentos

Cada grupo utilizado na realização deste trabalho foi composto de 5 replicatas. A seguir será mostrado os resultados obtidos na pressão de falha de cada uma das replicatas bem como o gráfico pressão *versus* tempo obtido no teste hidrostático.

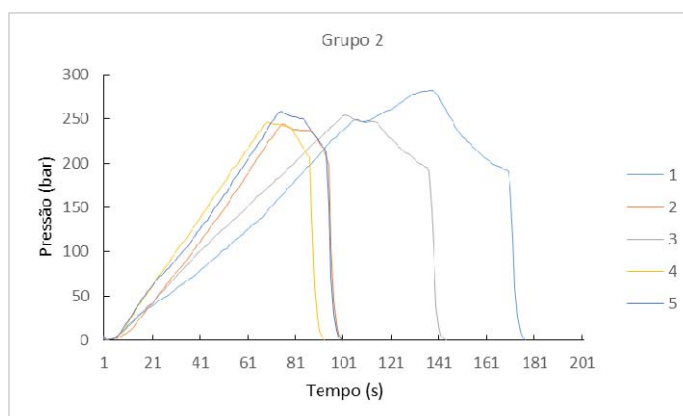
Grupo 1:

Grupo 1	Pressão de Falha (bar)
1	242
2	273
3	259
4	204
5	216
Média (μ)	238,8
DP (s)	25,76



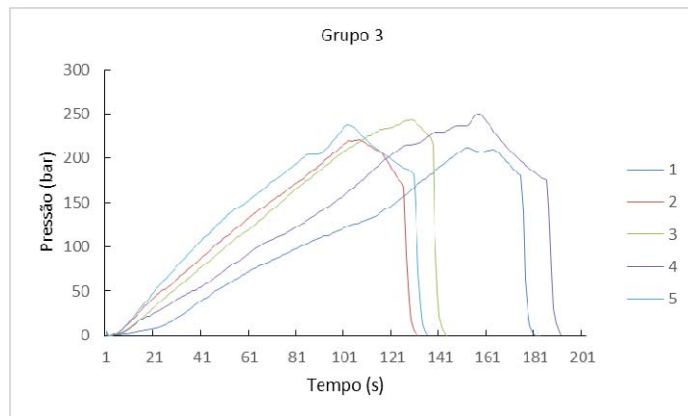
Grupo 2:

Grupo 2	Pressão de Falha (bar)
1	280
2	244
3	254
4	246
5	258
Média (μ)	256,4
DP (s)	12,86



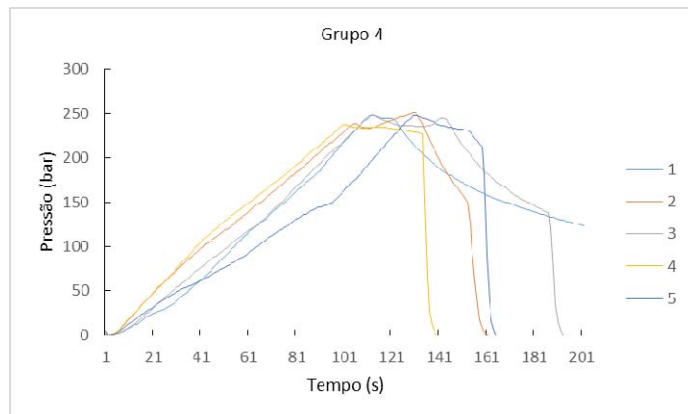
Grupo 3:

Grupo 3	Pressão de Falha (bar)
1	210
2	221
3	244
4	250
5	238
Média (μ)	232,6
DP (s)	14,88



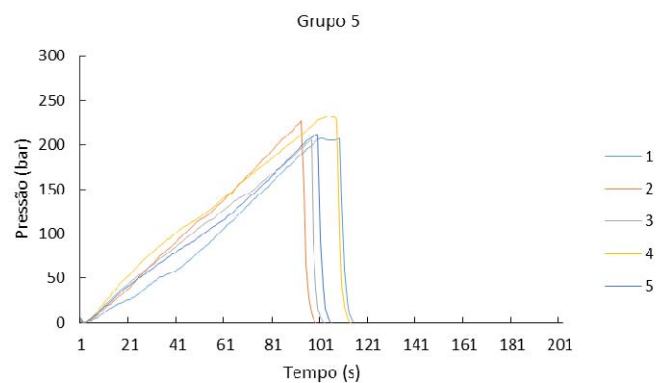
Grupo A4:

Grupo A4	Pressão de Falha (bar)
1	248
2	250
3	245
4	237
5	248
Média (μ)	245,6
DP (s)	4,59



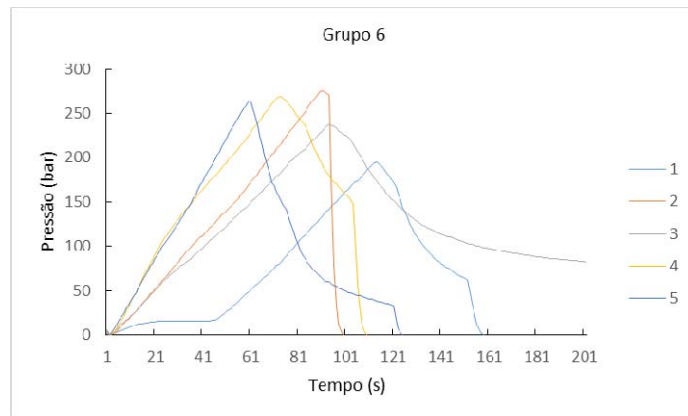
Grupo 5:

Grupo 5	Pressão de Falha (bar)
1	207
2	227
3	206
4	232
5	212
Média (μ)	216,8
DP (s)	10,68



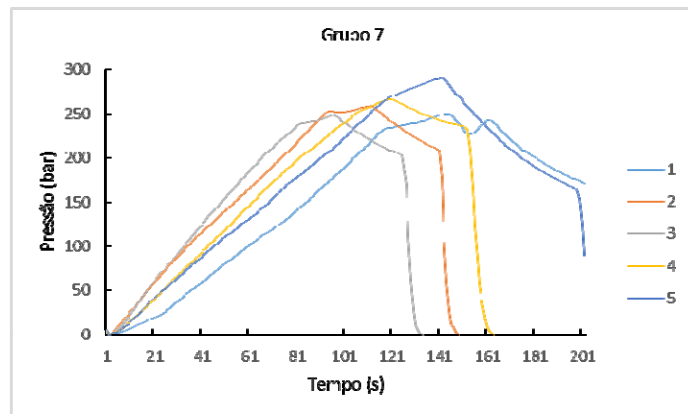
Grupo 6:

Grupo 6	Pressão de Falha (bar)
1	195
2	276
3	238
4	269
5	264
Média (μ)	248,4
DP (s)	29,63



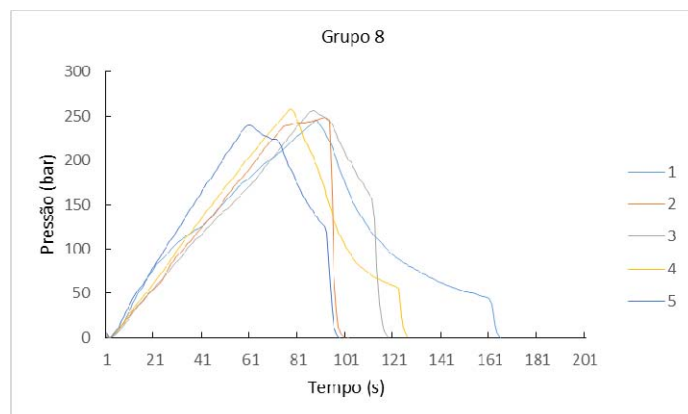
Grupo 7:

Grupo 7	Pressão de Falha (bar)
1	250
2	259
3	249
4	266
5	291
Média (μ)	263
DP (s)	15,32



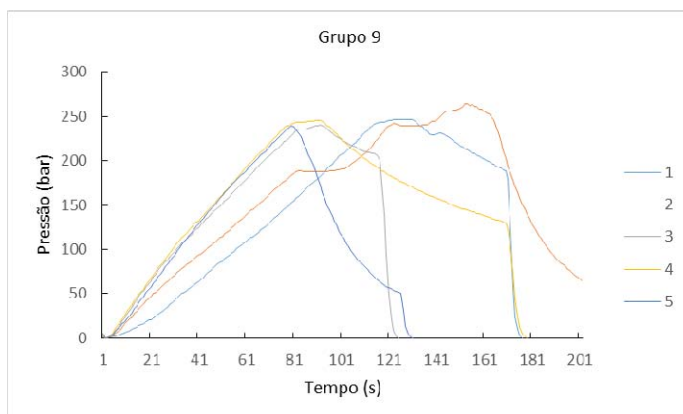
Grupo 8:

Grupo 8	Pressão de Falha (bar)
1	246
2	259
3	256
4	258
5	240
Média (μ)	251,8
DP (s)	7,49



Grupo 9:

Grupo 9	Pressão de Falha (bar)
1	247
2	264
3	241
4	221
5	239
Média (μ)	242,4
DP (s)	13,85



Grupo 10:

Grupo 10	Pressão de Falha (bar)
1	284
2	251
3	284
4	301
5	268
Média (μ)	277,6
DP (s)	16,91

