



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Instituto Politécnico

José Gilberto de Oliveira Júnior

**Estudo do comportamento mecânico do reparo com chapa colada em
tubulações com dano para diferentes tratamentos superficiais**

Nova Friburgo

2017

José Gilberto de Oliveira Júnior

Estudo do comportamento mecânico do reparo com chapa colada em tubulações com dano para diferentes tratamentos superficiais

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

Orientador: Eduardo Martins Sampaio

Nova Friburgo

2017

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

O48 Oliveira Júnior, José Gilberto de.
Estudo do comportamento mecânico do reparo com
chapa colada em tubulações com dano para diferentes
tratamentos superficiais / José Gilberto de Oliveira Júnior. -
2017.
96 f.: il.

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

1. Tubulações – Manutenção e reparos – Teses. 2.
Adesivos - Teses. 3. Colagem - Teses. I. Sampaio, Eduardo
Martins. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
Instituto Politécnico. III. Título.

CDU 621.643

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

Assinatura

Data

José Gilberto de Oliveira Júnior

Estudo do comportamento mecânico do reparo com chapa colada em tubulações com dano para diferentes tratamentos superficiais

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

Aprovada em 13 de março de 2017.

Banca examinadora:

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

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

Prof. Dr. Silvio Romero de Barros
Centro Federal de Educação Tecnológica - CEFET-RJ

Nova Friburgo

2017

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Raquel Brasil Magalhães de Oliveira que sempre esteve ao meu lado, me manteve concentrado, foi a base e o equilíbrio familiar para concluirmos juntos esse grande projeto.

Aos meus pais José Gilberto de Oliveira e Gracy Maria Andrade de Oliveira que foram minhas referências nos princípios básicos da coragem, determinação, garra, amor ao próximo e superação, além de proporcionarem a educação escolar básica com muito sacrifício.

Ao grande doutor, mestre e orientador Eduardo Martins Sampaio que é um grande parceiro e sempre me contagiou com seu bom humor e sempre me motivou nos momentos em que pensei em desistir pelo excesso de trabalho.

À equipe do Laboratório de Adesão e Aderência formada por Jane Luci M.

Amaral, Marcelo Correa Amaral, Guilherme Queiroz, Anselmo Duarte, Ney Rohem, Lis Ferreira, Ramon Macário, Ricardo Hudson que dedicaram tempo e suor a este projeto, são verdadeiros amigos que me deram suporte em todas as atividades e experimentos, que nunca desistiram nem desanimaram mesmo em meio às dificuldades enfrentadas pela UERJ.

Aos professores e servidores da UERJ que formam e capacitam os melhores profissionais.

RESUMO

OLIVEIRA JÚNIOR, José Gilberto, Estudo do comportamento mecânico do reparo com chapa colada em tubulações com dano para diferentes tratamentos superficiais, 2017. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia dos Materiais) - Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2017.

Neste trabalho foram desenvolvidas novas metodologias de reparo de tubulações de aço que podem ser utilizados em situações de emergência para estancar vazamentos com potencial para causar acidentes, parada operacional e até impactos ambientais. Os novos reparos consistem na colagem de chapas de aço engenheiradas e tratadas superficialmente e com promotor de adesão sobre furos transpassantes em tubulações de aço utilizando um adesivo epóxi, sendo todo o processo e produtos desenvolvidos no Laboratório de Adesão e Aderência (LAA) / UERJ. As tubulações sofreram 3 tipos de tratamentos superficiais: Jateamento, Lixamento e com ferramenta MBX (*Bristle-Blaster*). Foram avaliadas a rugosidade dos tratamentos superficiais e o desempenho dos reparos. O jateamento gerou o maior perfil de rugosidade, seguido pelo tratamento com ferramenta MBX (*Bristle-Blaster*), e por último o lixamento. O desempenho foi avaliado por dois tipos de testes hidrostáticos, o teste de ruptura e o teste de fluência. Os testes de ruptura consistiram em pressurizar as tubulações reparadas com água a 23,5°C até a falha por vazamento no reparo que ocorreram em pressões superiores a 144bar. Os testes de fluência consistiram em pressurizar as tubulações reparadas com pressão média de 40bar com água a 60°C e manter esta condição até que falhassem por vazamentos nos reparos. Os reparos resistiram a estas condições de fluência por pelo menos 52 horas e chegando a 1073 horas sem fratura catastrófica, demonstrando potencial na utilização em campo.

Palavra-chave: Reparo de tubulações. Colagem. Epóxi. Tratamento superficial. Fluência.

ABSTRACT

OLIVEIRA JÚNIOR, José Gilberto, Study of mechanical behavior of bonded plate repair on piping with damage and different surface treatments, 2017. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia dos Materiais) - Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2017.

This work developed new methodologies of repair of steel pipes that can be used in emergency situations to stop leaks with potential to cause accidents, operating and even stop environmental impacts. This new repair consist of bonding engineering steel plates with surface treated and adhesion promoter applied over holes defects in steel pipes using an epoxy adhesive, that the process and adhesive were developed by Laboratório de Adesão e Aderência (LAA) / UERJ. The pipes have received 3 kinds of surface treatments: Blasting, sanding and MBX tool (Bristle-Blaster). The roughness of the surface treatments and repairs performance were evaluated. The blasting has generated the greatest roughness profile, and the treatment with MBX tool (Bristle-Blaster) has generated greater roughness profile than sanding. The performance was evaluated by two types of hydrostatic tests, the rupture tests and creeping tests. The Rupture tests occurred by pressurizing the pipes repaired with 23,5°C with water until the repairs leaks, the repairs withstood pressures greater than 144bar. The creeping tests occurred by pressurizing the pipes repaired with 40bar average pressure with water at 60°C and keep this condition until the repairs leaks, the repairs withstood these terms of creeping by at least 52 hours and until 1073 hours.

Keywords: Piping repair. Bonded. Epoxy. Surface treatment. Creeping.

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	8
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
1.1	Colagem	10
1.2	Adesão e aderência	12
1.2.1	<u>Forças intermoleculares</u>	12
1.2.2	<u>Porosidade e rugosidade do substrato</u>	14
1.2.3	<u>Molhabilidade</u>	18
1.2.4	<u>Teoria da adsorção</u>	22
1.2.5	<u>Teoria da interconexão mecânica</u>	24
1.3	Comportamento mecânico da junta	25
1.4	Fluência	27
1.5	Adesivos	28
1.5.1	<u>Adesivo epóxi</u>	33
1.5.2	<u>Adesivo NVT</u>	34
1.6	Tratamentos superficiais	36
1.6.1	<u>Limpeza da superfície</u>	36
1.6.2	<u>Lixamento</u>	37
1.6.3	<u>Jateamento</u>	38
1.6.4	<u>Ferramenta MBX (Bristle Blasting)</u>	40
1.6.5	<u>Silano</u>	41
1.7	Reparo de tubulações	43
1.7.1	<u>Reparo com chapa colada</u>	46
2	MATERIAIS E MÉTODOS	48
2.1	Equipamentos e materiais	48
2.2	Chapas da junta	49
2.3	Tubos	52
2.4	Colagem/Reparo	56
2.5	Ensaio hidrostáticos	59
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
3.1	Tratamentos superficiais na chapa	62

3.2	Tratamentos superficiais no tubo	63
3.3	Ensaio hidrostático de ruptura	68
3.3.1	<u>Tubos lixados</u>	68
3.3.2	<u>Tubos tratados com a ferramenta MBX</u>	71
3.4	Ensaio hidrostático de fluência	75
3.4.1	<u>Tubos lixados</u>	75
3.4.2	<u>Tubos tratados com a ferramenta MBX</u>	77
3.4.3	<u>Tubos tratados com jateamento</u>	80
	CONCLUSÃO	83
	TRABALHOS PROPOSTOS	85
	APÊNDICE A	96

INTRODUÇÃO

Antes dos anos 40, já se utilizavam substâncias adesivas para realizar a colagem entre materiais, sendo a maior parte deles de madeira, papel, tecido e artesanato. Nos anos 40, surgiram os adesivos sintéticos, a “Araldite” (Ciba), o “Epon” (Shell), etc. que passaram a ser utilizados em aplicações de engenharia como na construção civil (QUINI, 1998). O avanço tecnológico conduziu os adesivos para estruturas, sendo utilizados nas indústrias de petróleo, aeroespacial, automobilística e construção civil, para substituição de elementos fixadores como parafusos, rebites e soldas, colagem de carenagem de avião, puxadores e maçanetas, para brisas de automóveis, reparos gerais de tubulações industriais e vasos de pressão.

Os métodos convencionais de reparo tubulações que apresentam furos vazados são por corte e substituição, soldagem de luvas, etc., que apresentam grande dificuldade na aplicação por envolver maquinário grande e pesado, tempo elevado de aplicação, custo, limitação de espaço, etc, que torna o reparo por colagem mais atrativo por ser fácil e simples de aplicar, aplicável onde não se pode soldar, é leve e compacto, não necessita de ferramenta específica para aplicar, preserva as características dos substratos, baixo custo, resiste a pressões razoáveis, retarda a propagação de trincas, é resistente à corrosão, etc. Desta forma, os reparos desenvolvidos neste trabalho são de colagem de chapas sobre furos adotando alguns tratamentos superficiais diferentes para eliminar os vazamentos provisoriamente (por alguns dias), permitindo o retorno da operação e ganhando tempo para programar um reparo permanente que sobreponha o provisório. (KINLOCH, 1987).

A ciência envolvida na colagem se divide em alguns temas principais como adesão e aderência, molhabilidade, comportamento mecânico da junta, falha por fluência, e rugosidade. A adesão está relacionada ao mecanismo de união entre o adesivo e a superfície, já a aderência representa a energia necessária para separação de duas superfícies coladas. A molhabilidade é uma propriedade que representa o comportamento do adesivo sobre a superfície, e a rugosidade (R_a , R_z , R_t e R_y) é um efeito do tratamento superficial adotado, a molhabilidade influencia diretamente na adesão e aderência, já a rugosidade tanto influencia na molhabilidade como diretamente na adesão e aderência. Para alterar a rugosidade de uma superfície, adota-se um tratamento superficial, onde os principais e mais simples são o lixamento, jateamento e MBX (ferramenta semelhante a uma escova rotativa que causa abrasão nas superfícies).

O adesivo epóxi chamado NVT, que foi desenvolvido pelo Laboratório de Adesão e Aderência do IPRJ/UERJ, foi identificado como adequado para ser utilizado em reparos de

furos com chapas coladas, suas características foram experimentadas através de ensaios no Laboratório de Adesão e Aderência (ROHEM, 2010) (SILVA, 2016) (PERRUT, 2009).

Silva (2016) utilizou o NVT como adesivo de reparos com chapas coladas de Aço Baixo Carbono de 76,0 x 76,0 x 6,35mm de espessura (1/4 polegadas), em tubos de aço API 5L X56 com superfície jateada e furo de 10mm de diâmetro. Seus resultados mostraram que as colagens suportaram pressões hidrostáticas de ruptura acima de 315bar.

Os reparos desenvolvidos neste trabalho foram compostos de colagem de chapas sobre furos em tubulações utilizando o adesivo NVT, as tubulações eram de aço e possuíam diferentes rugosidades geradas intencionalmente por tratamentos superficiais diferentes, o diâmetro nominal do tubo era 152,4mm (6 polegadas) e os defeitos/furos tinham 10mm de diâmetro.

Os resultados encontrados sobre rugosidade mostraram que diferentes tratamentos superficiais causam grandes diferenças no perfil de rugosidade da superfície, sendo o jateamento o tratamento que produz maior perfil de rugosidade, seguido pelo tratamento com ferramenta MBX (*Bristle-Blaster*), e por último o lixamento.

A resistência do reparo foi avaliada através de testes hidrostáticos ruptura e fluência. Os testes de ruptura consistiram em pressurizar as tubulações reparadas com água a 23,5°C (+/- 0,5°C) até a falha por vazamento no reparo, que ocorreram em pressões superiores a 144bar. Já o teste de fluência consistiram em pressurizar as tubulações reparadas até aproximadamente 40bar com água a 60°C e manter esta condição até a falha por vazamentos nos reparos. Os reparos registrados resistiram a estas condições de fluência por pelo menos 52 horas e chegando a 1073 horas.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Colagem

A colagem é o procedimento de união permanente entre duas superfícies que utiliza um adesivo como promotor da união, e que tem como principais vantagens e desvantagens as informações apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos adesivos.

Vantagens	Desvantagens
Distribui as tensões uniformemente pela área minimizando os concentradores de tensão	A superfície necessita de tratamento superficial para obter o melhor desempenho
Resistência à fadiga pela distribuição da tensão pela área da união minimizando os concentradores de tensão	Necessita de tempo para adquirir as propriedades mecânicas finais (cura)
Amortece vibração e absorve impacto	A Temperatura de trabalho é baixa
Impede a corrosão galvânica por evitar o contato metal x metal dissimilares	Calor e pressão podem ser necessários para a cura e obter melhor desempenho
Une chapas finas ou grossas	Inspeção difícil
Garante vedação na união	A vida útil dependente do ambiente, pode sofrer degradação por ataques químicos, umidade e temperaturas elevadas (fluência)
Une materiais similares ou não	Necessita de pessoal treinado para aplicação colagem adequada
Baixo custo	
Excelente relação Resistência x Peso	
Não necessita aporte de elevadas temperaturas e ignição	
Não necessita de furações que são concentradoras de tensão	

Fonte: PETRIE, 2007.

A junta colada é o produto final da colagem, constituída por um corpo único heterogêneo, que é dividida em camadas: substratos (aderente), adesivo, interfase e interface (Figura 1). A simples constituição da junta não garante a resistência mecânica desejada, a resistência só é adquirida após a cura do adesivo.

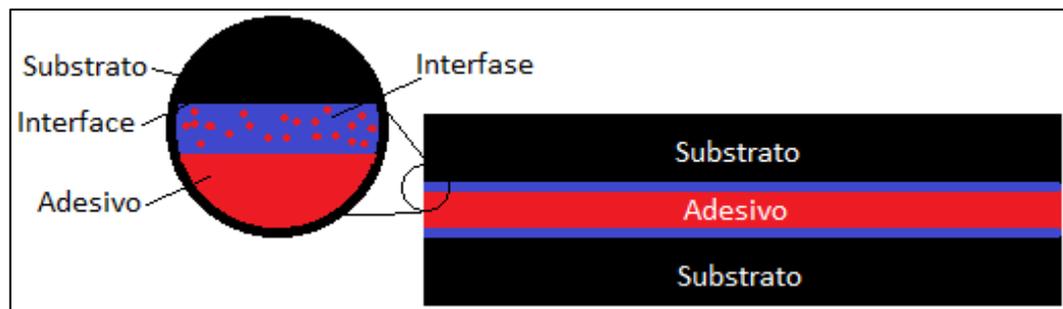
O substrato, também conhecido como aderente, é o material sólido base onde será aplicado o adesivo para que seja colado a outro substrato.

O adesivo é o material ou mistura de materiais com a função de unir os substratos. Para que o adesivo adquira as propriedades desejadas e mantenha a união da junta, ele passa pelo processo de cura.

A cura é o processo de mudança de fase ou polimerização que transforma o adesivo em um sólido resistente. A propriedade de escoamento que permite o adesivo ter um contato íntimo com o substrato para o surgimento das forças de união, também impede a resistência a qualquer tipo de esforço. Esta contradição desaparece quando há a cura do adesivo, que se solidifica adquirindo as propriedades adequadas ao seu uso. A cura é fundamental para a utilização prática de adesivos (SILVA 2007).

A interfase é a região próxima ao contato entre adesivo e substrato que possui propriedades físico-químicas diferentes do adesivo e substrato. Esta região é crítica para garantir a qualidade da colagem. Interface é uma região dentro da interfase que representa a fronteira entre substrato e adesivo, onde há as interações intermoleculares, presença de rugosidade e molhabilidade (PETRIE, 2007).

Figura 1 - Junta Colada: Substrato, adesivo, interfase e interface.



Fonte: O autor, 2017.

Para entender o desempenho da junta, é necessário esclarecer os fatores que mais influenciam na colagem: adesão e aderência, comportamento mecânico da junta, fluência, os adesivos e os tratamentos superficiais dos substratos que serão detalhados nos próximos capítulos.

1.2 Adesão e aderência

Os fenômenos químicos, físicos e mecânicos da colagem apresentam-se no nível micro e macroscópico como forças intermoleculares, molhabilidade, porosidade, rugosidade, que juntos estruturam as principais teorias sobre a colagem: a adsorção e interconexão mecânica, que apesar de aceitas no campo da colagem, ainda não são suficientes para explicar completamente a colagem. Além dessas duas teorias, existem outras teorias como a teoria da difusão e da eletrostática, que não são relevantes na área de reparo com chapa colada (SILVA 2007).

A adesão é o conjunto de forças responsáveis pela atração e união entre diferentes superfícies que ocorre antes, durante e depois da cura (ex.: substrato e adesivo). Essas forças são influenciadas por fenômenos químicos, físicos e mecânicos que se sobrepõem e se influenciam tornando o fenômeno complexo (PETRIE, 2007).

A aderência já é o efeito macroscópico de separação entre as partes de uma junta colada, que pode ser entendida como a energia requerida para o descolamento da junta.

1.2.1 Forças intermoleculares

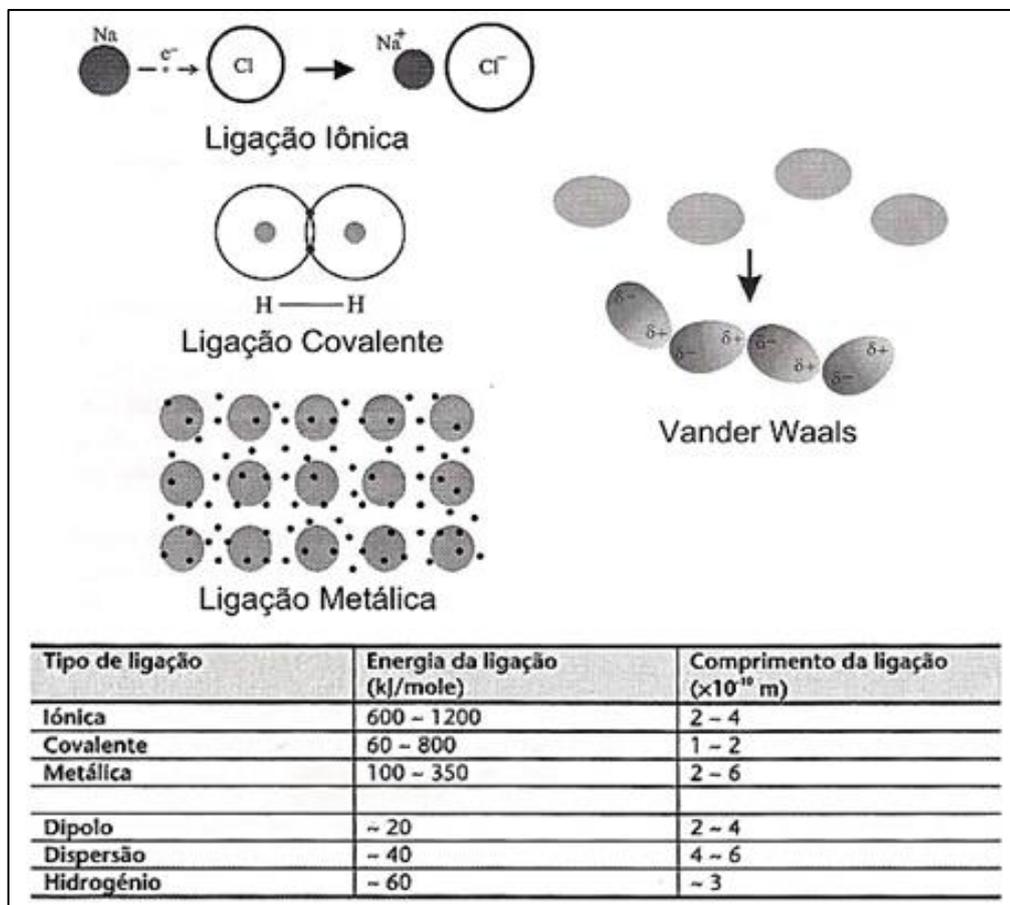
A adesão e muitas propriedades físicas de materiais podem ser entendidas através das forças interatômicas e intermoleculares que ligam átomos e moléculas entre si. Em grandes distâncias as interações são desprezíveis, mas a medida que os átomos e/ou moléculas se aproximam, eles exercem forças entre si que podem ser atrativa ou repulsiva, e a magnitude de cada é uma função da distância interatômica de separação. Essas forças ou ligações interatômicas são divididas em primárias e secundárias, e são responsáveis pela unidade de um material (CALLISTER, 2007).

A coesão é entendida como o conjunto de forças intermoleculares responsáveis pela união entre as partes de um mesmo material, essas forças também são originadas por ligações primárias ou secundárias (ex.: moléculas adjacentes do adesivo) (PETRIE, 2007).

As ligações primárias ou químicas são encontradas em sólidos e são dos tipos iônica, covalente e metálica. Para cada tipo, a ligação necessariamente envolve os elétrons de valência que é responsável pela atração entre os átomos (Figura 2) (CALLISTER, 2007).

As ligações secundárias de van der Waals ou físicas também são encontradas em sólidos, mas principalmente em líquidos e gases. São originadas por um desbalanceamento de cargas em porções positiva e negativa que se atraem ou se repelem (dipolo), elas são mais fracas do que as primárias, mas também influenciam nas propriedades físicas de alguns materiais (Figura 2) (CALLISTER, 2007).

Figura 2 - Tipos de ligações primárias (esquerda) e secundárias (direita).

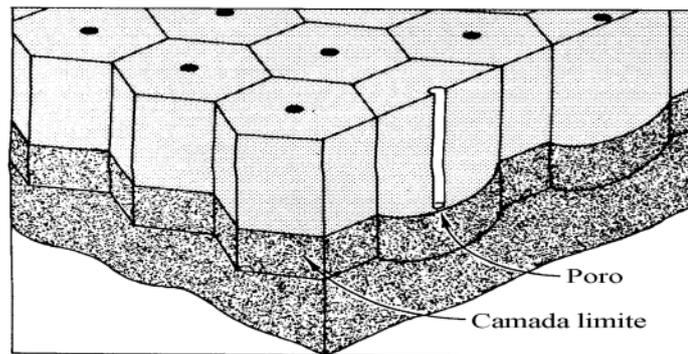


Fonte: SILVA, 2007.

1.2.2 Porosidade e rugosidade do substrato

A Porosidade é representada por microcavidades que vão até a superfície dos materiais que têm um papel importante na adesão. Sampaio (1998) afirma que o desempenho de uma junta depende da porosidade do substrato e da capacidade do adesivo penetrar nos poros do substrato. Ele esclarece que a porosidade pode ser criada ou ampliada com ataques químicos, e a penetração do adesivo é influenciada pela molhabilidade, viscosidade e condições de temperatura, umidade e tempo de colagem.

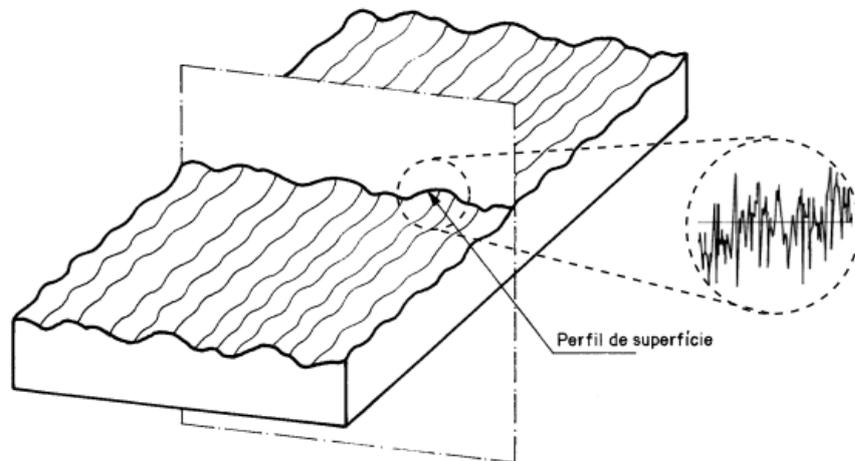
Figura 3 - Porosidade.



Fonte: SAMPAIO, 1998.

A rugosidade é o conjunto das irregularidades de uma superfície (Figura 4). Os parâmetros mais utilizados caracterizar a rugosidade superficial são a linha média (L_m), rugosidade aritmética (R_a), altura máxima do perfil (R_z), altura total do perfil (R_t) e o desvio quadrático (R_q).

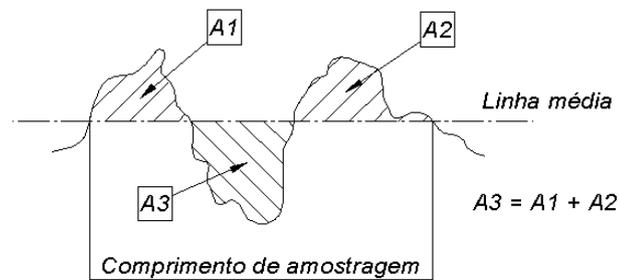
Figura 4 - Rugosidade.



Fonte: ABNT, 2002.

A Linha média (L_m) é a linha que divide igualmente as áreas constituídas de vales e picos do perfil de rugosidade. A linha média é a base para todos os outros parâmetros de rugosidade (Figura 5) (UNICAMP, 2017).

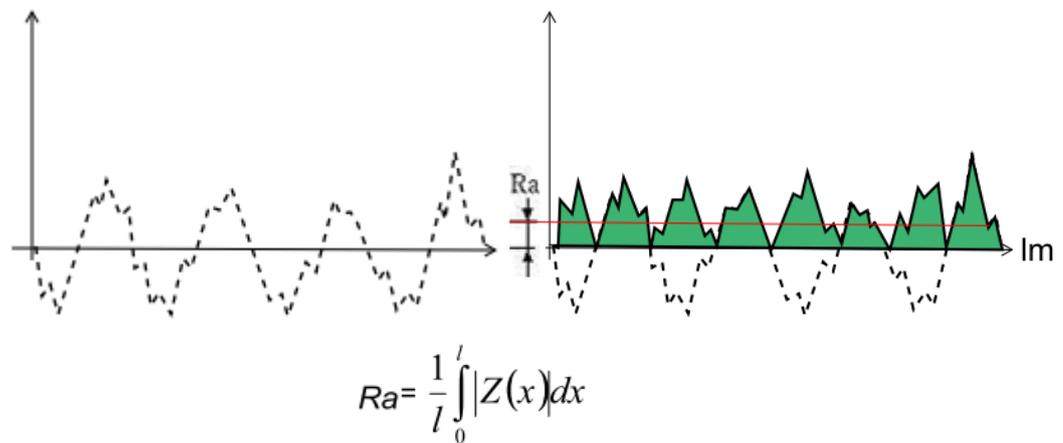
Figura 5 - Linha média (L_m).



Fonte: O autor, 2017.

Rugosidade aritmética (R_a) é a média aritmética dos valores absolutos dos afastamentos dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do percurso de avaliação (Figura 6) (UNICAMP, 2017). É o mais utilizado para caracterizar a rugosidade dos materiais, porém não define a forma das irregularidades do perfil e não faz nenhuma distinção entre picos e vales.

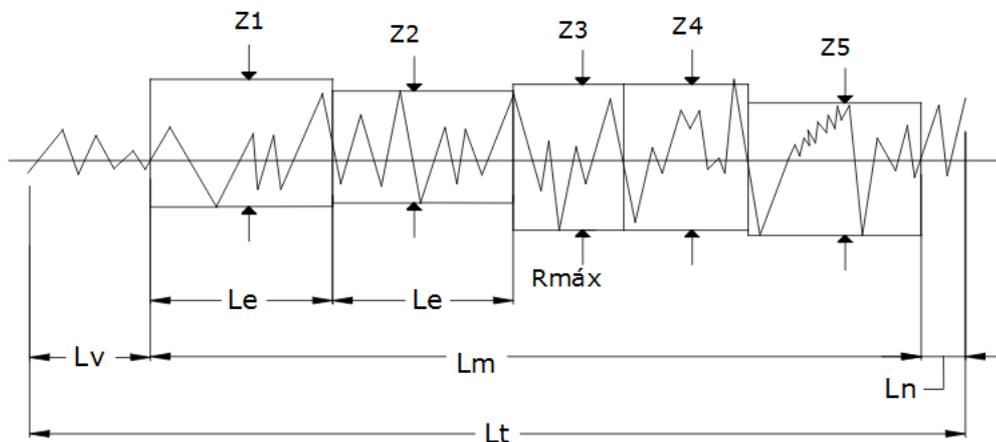
Figura 6 - Rugosidade aritmética (Ra).



Fonte: O autor, 2017.

Rugosidade média (Rz) é a média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial Z1 a Z5 no comprimento de amostragem (cut off) (Figura 7) (DIN 4768:1999).

Figura 7 - Rugosidade média (Rz).

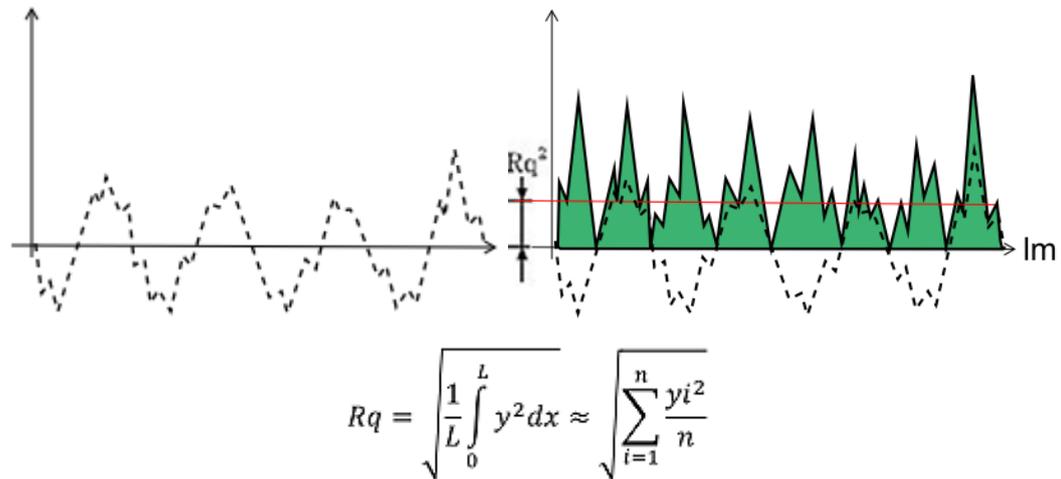


$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5}$$

Fonte: ALVES, 2011.

Desvio quadrático (Rq) é a raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem. Está correlacionado com a rugosidade aritmética (Ra) e aumenta o efeito das irregularidades que se afastam da média (Figura 8) (NBR ISO 4287:2002 - ABNT).

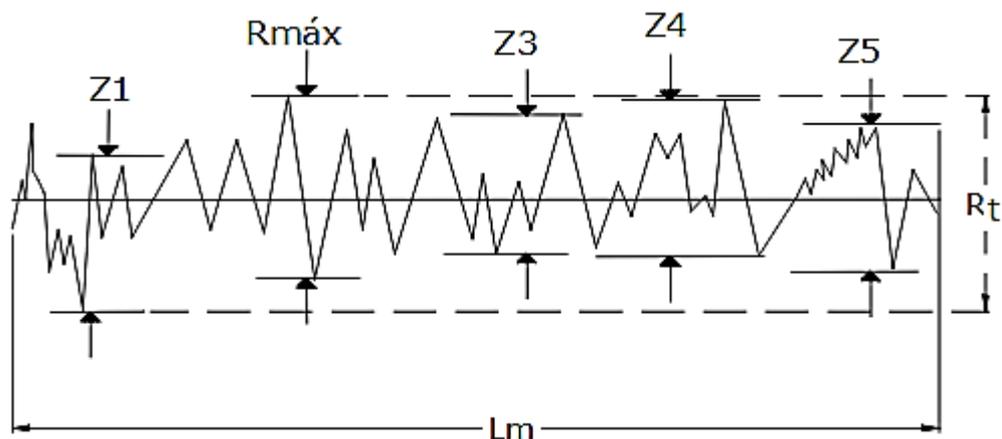
Figura 8 - Desvio quadrático (Rq).



Fonte: O autor, 2017.

Altura total do perfil (R_t) é o maior valor das rugosidades parciais (Z_t) que se apresenta no comprimento de amostragem (Figura 9). Este parâmetro informa a máxima deterioração da superfície vertical da peça e complementa a rugosidade aritmética (R_a) (NBR ISO 4287:2002 - ABNT).

Figura 9 - Altura total do perfil (R_t).



Fonte: O autor, 2017.

Conhecendo os parâmetros de medição da rugosidade, é possível identificar seus efeitos na adesão da junta colada conforme relatado pelos autores abaixo.

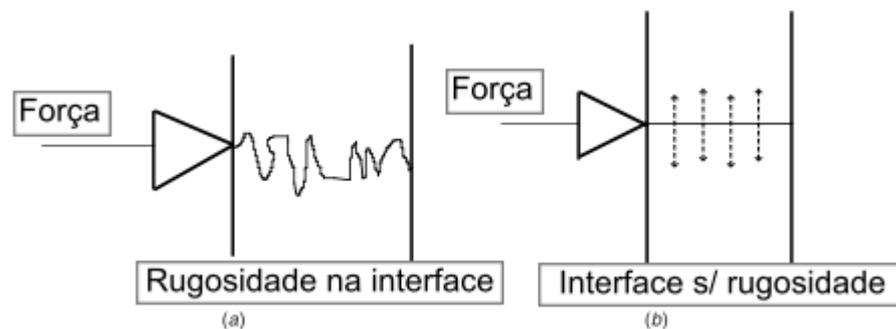
Silva, (2007) esclarece que devido a presença da rugosidade e porosidade, os adesivos precisam estar no estado líquido ou pastoso para fluir pelas irregularidades da superfície e se aproximar intimamente do substrato preenchendo a maior área possível, desta forma a junta vai

manifestar um desempenho melhor. Outro ponto divulgado por ele, é que a rugosidade evita a propagação de trincas pelo seu perfil irregular, obrigando a trinca a contornar o perfil de rugosidade dificultando sua propagação (Figura 10).

Sampaio (2006) demonstrou que a rugosidade influencia na resistência da junta composta. O aumento da rugosidade aritmética (R_a) e da altura total do perfil (R_t) aumentam a resistência mecânica da junta. Em seu trabalho foram utilizados substratos metálicos e adesivos com alta viscosidade, como o utilizado neste trabalho.

Islama (2014) concluiu que o aumento da altura máxima de perfil (R_z) entre 0 e $24\mu\text{m}$ aumenta a resistência mecânica da junta colada, entretanto para (R_z) acima de $24\mu\text{m}$, há uma tendência de queda da resistência mecânica da junta colada.

Figura 10 - Rugosidade atuando evitando a propagação da trinca.



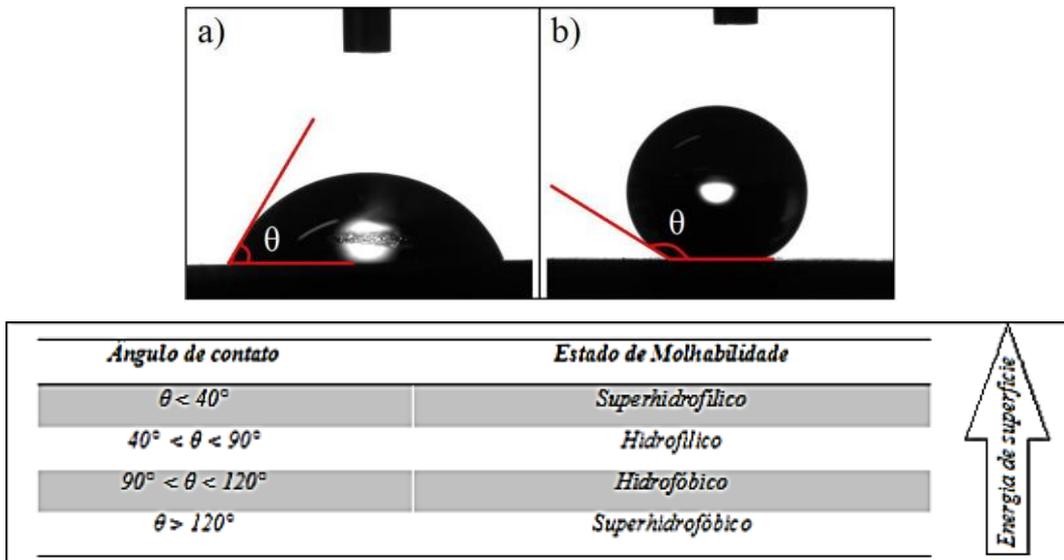
Fonte: SILVA, 2007.

1.2.3 Molhabilidade

A molhabilidade é uma característica fundamental para a adesão, ela representa a capacidade de um líquido espalhar-se ou ficar retido sobre uma superfície, influenciando na penetração do líquido nas microcavidades da rugosidade e porosidade (PETRIE, 2007). Ela pode ser observada na formação do ângulo de contato entre um líquido e uma superfície sólida (Figura 11).

A boa molhabilidade ocorre quando o ângulo é menor que 90° , e quanto menor o ângulo, melhor será a molhabilidade. Quando isto ocorre, a superfície é chamada de hidrofílica. A baixa molhabilidade ocorre quando o ângulo é maior que 90° , e quanto maior o ângulo, pior será a molhabilidade. Quando isto ocorre, a superfície é chamada de hidrofóbica (Figura 11).

Figura 11 - Molhabilidade.

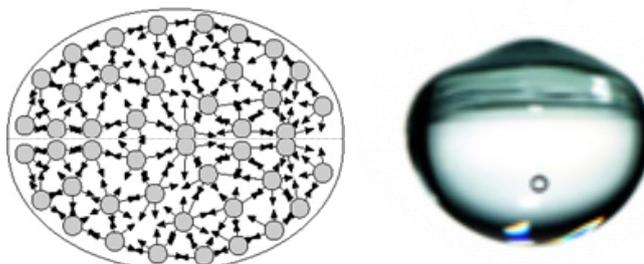


Fonte: RECABARREN, 2014.

A formação do ângulo de molhabilidade é proveniente das tensões superficiais do líquido, sólido e vapor, como é detalhado pelo modelo de Young (SAMPAIO, 1998).

A tensão superficial é um efeito físico que cria uma interface entre líquido e sólido, líquido e vapor ou líquido e líquido, fazendo a camada superficial de um líquido se comportar como uma membrana elástica. Esta propriedade é causada pelas forças de coesão, cuja resultante vetorial é diferente na interface. Enquanto as moléculas situadas no interior de um líquido são atraídas em todas as direções pelas moléculas vizinhas, as moléculas da superfície do líquido sofrem apenas atrações laterais e internas. Este desbalanceamento de forças de atração que faz o líquido se comporte como uma película elástica (Figura 12) (SILVA, 2007).

Figura 12 - Tensão Superficial de uma gota d'água.

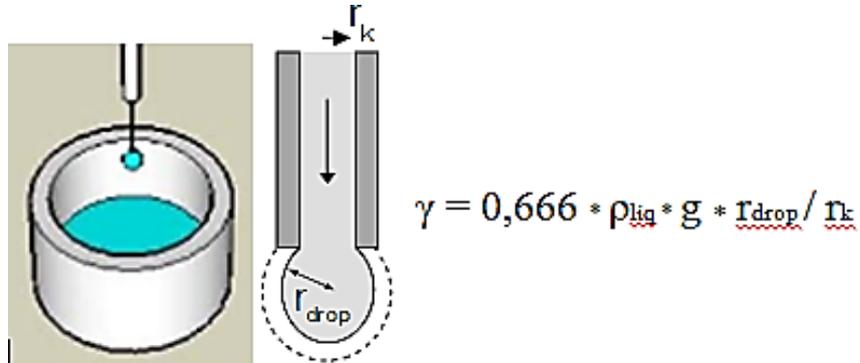


Fonte: O autor, 2017.

A tensão superficial de um líquido (γ_{LV}) pode ser medida por ensaios simples como o da gota pendente (Figura 13), e ela é dimensionalmente expressa por energia sobre área (J/m²),

o que é equivalente à força por deslocamento (N/m), sendo o termo tensão interfacial (γ) mais usado.

Figura 13 - Ensaio da gota pendente.



$$\gamma = 0,666 * \rho_{\text{liq}} * g * \frac{r_{\text{drop}}}{r_k}$$

γ – Tensão superficial do líquido;

ρ_{liq} – Densidade do líquido;

g – Gravidade;

r_{drop} – Raio da gota;

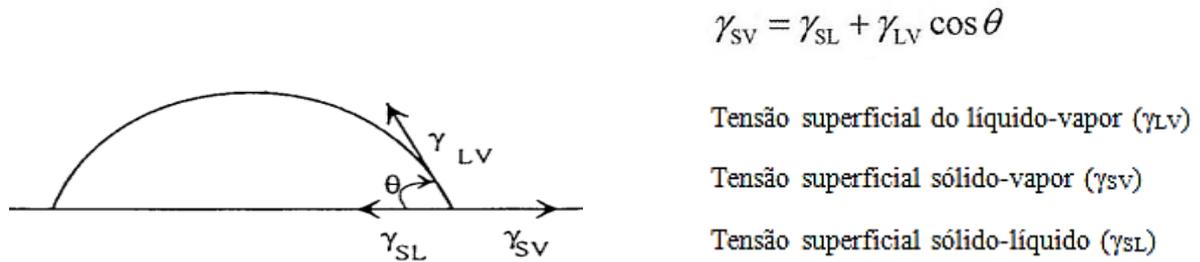
r_k – Raio da pipeta.

Fonte: O autor, 2017.

Em sólidos, os átomos do interior estão ligados a mais átomos do que os átomos superficiais. Essa condição proporciona na região superficial um excesso de energia e a soma das mesmas torna-se uma propriedade termodinâmica conhecida como energia livre superficial. Essa energia em excesso precisa ser minimizada, portanto a energia livre superficial torna-se força motriz para a realização de fenômenos de superfície como molhabilidade e adesão.

O modelo de Young descreve de maneira simples o surgimento da molhabilidade, e revela sua relação com as tensões superficiais do líquido, sólido e vapor através do balanço de tensões superficiais (Figura 14). O modelo permite concluir que para aumentar a molhabilidade (diminuir o ângulo de contato Θ) é necessário diminuir a tensão superficial do líquido-vapor (γ_{LV}) e aumentar a tensão superficial sólido-vapor (γ_{SV}).

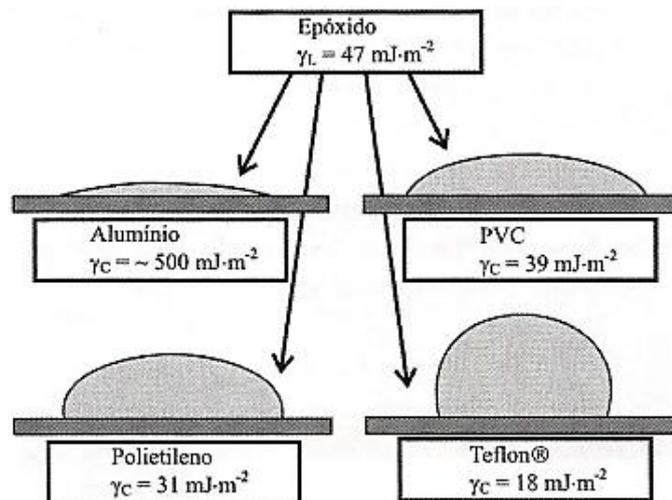
Figura 14 - Modelo de Young: relação entre as tensões superficiais entre líquido, sólido e vapor.



Fonte: O autor, 2017.

Fox e Zisman (1950) estudaram as tensões superficiais de diversos materiais sólidos e estabeleceram uma relação linear entre o ângulo de contato Θ e a tensão superficial dos líquidos (γ_{LV}), desta relação surgiu a tensão superficial crítica (γ_c), que foi definida e tabelada para diversos materiais sólidos. Eles estabeleceram que se a tensão superficial do líquido (γ_{LV}) for menor ou muito próxima à tensão superficial crítica (γ_c), o ângulo de contato tenderá a zero, por outro lado, se a tensão superficial do líquido (γ_{LV}) for maior que a tensão superficial crítica (γ_c) e essa diferença aumentar, o ângulo de contato tenderá a aumentar (Figura 15).

Figura 15 - Tensão superficial crítica.



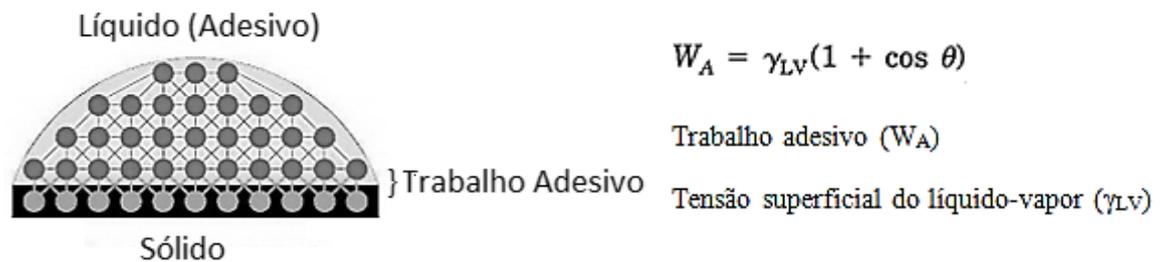
Fonte: SILVA, 2007.

Sampaio (1998) demonstrou também que molhabilidade de um substrato metálico pode ser melhorada pelo aumento da macro e micro-rugosidades. No seu trabalho foi realizado um

lixamento para produzir macro-rugosidades e um ataque químico para micro-rugosidades em um substrato de alumínio e o líquido medido era uma resina epóxi.

Uma vez conhecido o comportamento entre as tensões superficiais de sólido, líquido e vapor, e suas relações, é possível definir a energia necessária para separação entre um sólido e um líquido (substrato e adesivo não curado) através do trabalho adesivo (W_A), que apresenta valores maiores, com o aumento da tensão superficial do líquido (adesivo), ou seja, mais forte será a união entre líquido e sólido (SAMPAIO, 1998).

Figura 16 - Trabalho adesivo.



Fonte: SILVA, 2007.

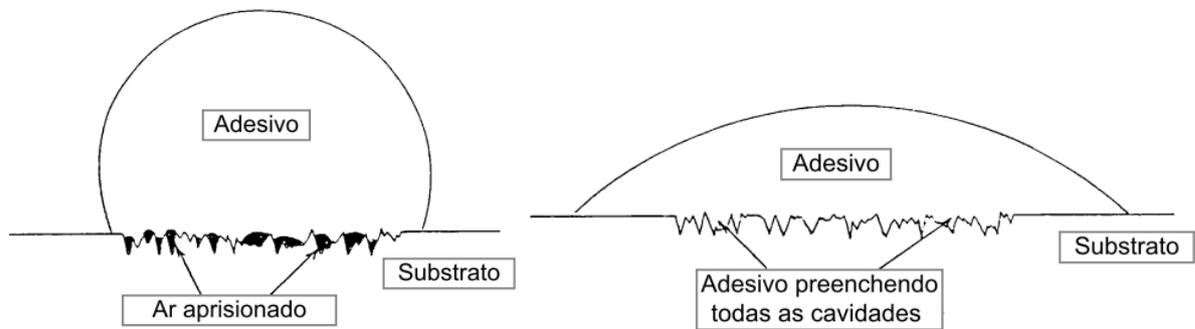
Conhecidos os fundamentos químicos, mecânicos e físicos da adesão, é possível compreender as teorias da adsorção e da interconexão mecânicas que descrevem a colagem de uma junta colada.

1.2.4 Teoria da adsorção

A teoria da adsorção é a mais relevante sobre a união de materiais por colagem. Ela preconiza que o contato íntimo entre adesivo e substrato, em distâncias na ordem molecular de 5 angstroms, leva ao surgimento de forças de atração superficiais intermoleculares que são responsáveis pela união entre adesivo e substrato (PETRIE, 2007).

O contato íntimo entre adesivo e substrato sofre grande influência da molhabilidade, o aumento da molhabilidade amplifica a penetração do adesivo nas micro-cavidades, melhora o contato íntimo, diminui o ar aprisionado entre adesivo-substrato e aumenta a superfície de contato (Figura 17) (PETRIE, 2007).

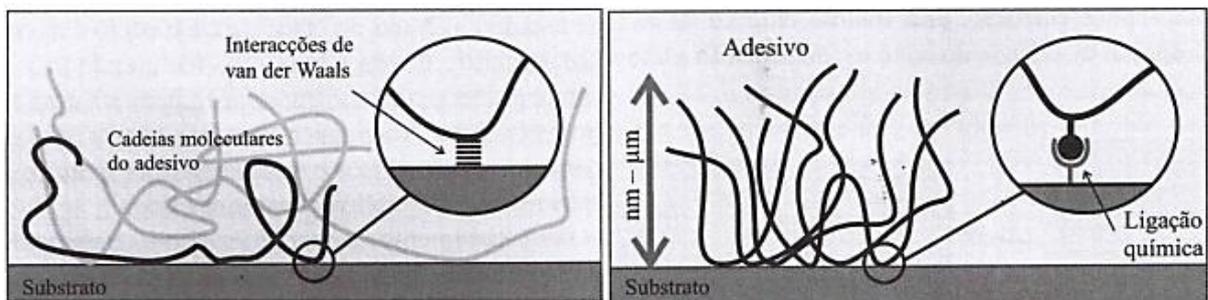
Figura 17 - Molhabilidade e penetração do adesivo.



Fonte: PETRIE, 2007.

As forças de atração existentes na adesão por adsorção se dividem em força de adsorção química e adsorção física. Na adsorção química, também chamada quimissorção, as moléculas (ou átomos) unem-se à superfície do adsorvente através da formação de ligações químicas primárias (covalente, iônica, metálica) que são extremamente fortes. Na adsorção física, também chamada fisissorção, as moléculas (ou átomos) unem-se à superfície do adsorvente através de interações de van der Waals e pontes de hidrogênio (Figura 18). A teoria da adsorção atribui maior presença das interações de van der Waals e conseqüentemente as considera como as principais forças responsáveis pela adesão. E o nível de grandeza das forças de atração depende da natureza química dos materiais e do quão íntimo é o contato entre as interfaces dos materiais (SILVA, 2007).

Figura 18 - Adesão por adsorção: Fisissorção (esquerda) e Quimissorção (direita)



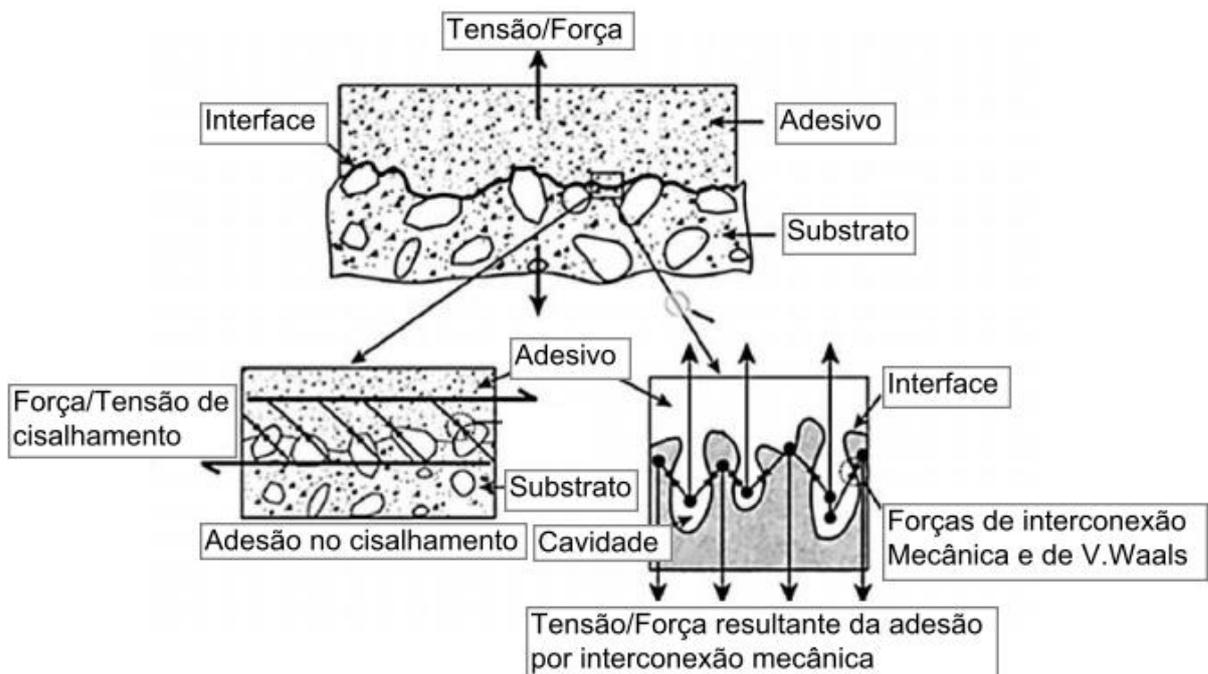
Fonte: SILVA, 2007.

1.2.5 Teoria da interconexão mecânica

A teoria da interconexão mecânica é a mais antiga sobre adesão, ela afirma que a boa adesão ocorre quando o adesivo penetra nos poros, cavidades, fendas e outras irregularidades da superfície do substrato e se solidifica, ficando “encravado” mecanicamente (Figura 19). O melhor desempenho é conseguido quando o adesivo possui o máximo de molhabilidade e tem propriedades reológicas (viscosidade) adequadas para penetrar nos poros e micro-cavidades da rugosidade num tempo razoável (SILVA, 2007).

Conforme esclarecido no capítulo sobre rugosidade, vários Autores concluem que o aumento da rugosidade superficial e porosidade do substrato aumentam principalmente o encravamento mecânico do adesivo melhorando o desempenho da junta.

Figura 19 - Adesão por interconexão mecânica.



Fonte: O autor, 2017.

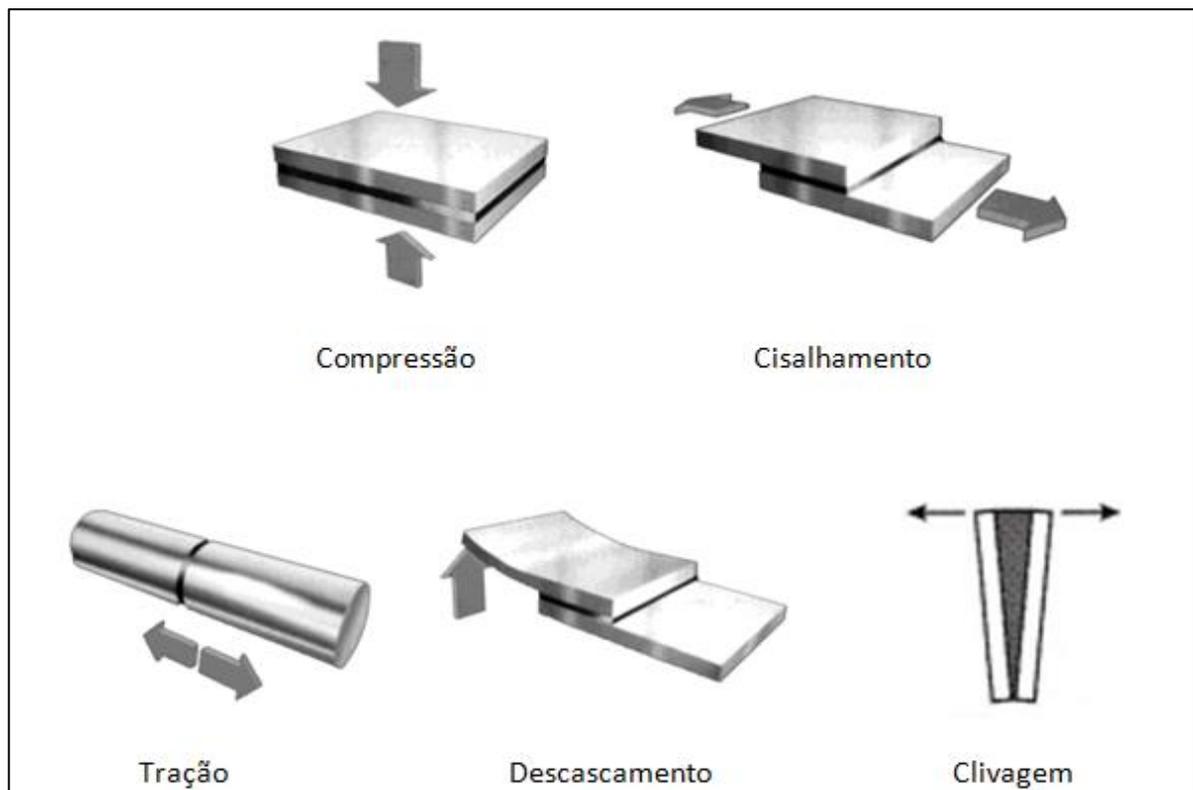
Apesar de todos os conceitos descritos neste trabalho e do avanço no desenvolvimento dos adesivos, ainda não há um modelo matemático capaz de prever o desempenho das juntas coladas por causa da complexidade de variáveis envolvidas como molhabilidade, tensão superficial, rugosidade, energia livre superficial, compatibilidade química e suas ligações, temperatura, umidade, espessura da camada de adesivo, etc. Assim, a forma mais confiável de

prever o desempenho da junta é por ensaios que busquem simular as condições reais de operação.

1.3 Comportamento mecânico da junta

Uma junta colada quando solicitada mecanicamente, pode apresentar um ou uma combinação dos 5 tipos de carregamentos mais comuns: compressão, cisalhamento (corte), tração, descascamento (arrancamento) e clivagem (Figura 20). Na maioria dos casos práticos, são encontradas combinações destes carregamentos. É comum utilizar o termo junta para expressar o carregamento em juntas coladas, por exemplo, uma junta de tração é uma junta que está sofrendo tração.

Figura 20 - Tipos de carregamentos em juntas coladas.



Fonte: SAMPAIO, 1998.

A junta de compressão ocorre quando há forças perpendiculares ao plano da junta no sentido de esmagar o adesivo, elas são pouco utilizadas na prática (SAMPAIO, 1998).

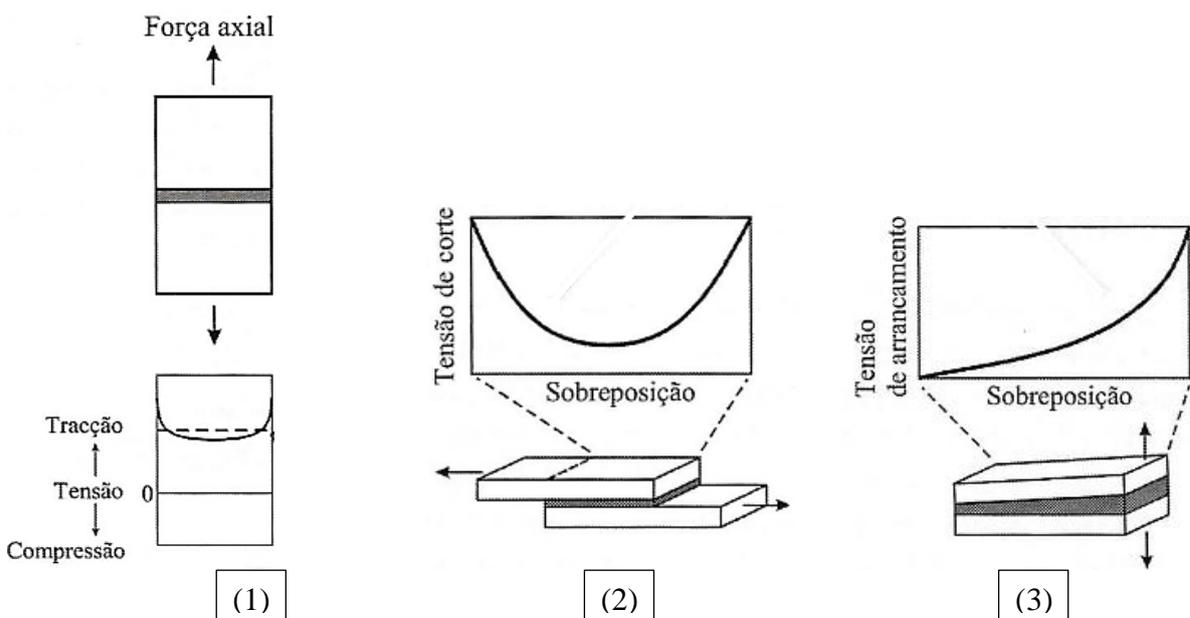
A junta de tração ocorre quando há forças perpendiculares ao plano da junta no sentido de tracionar o adesivo, normalmente há desvios no ângulo de atuação da força que geram componentes de descascamento ou clivagem (SAMPAIO, 1998).

A junta de cisalhamento ocorre quando há forças paralelas ao plano da junta. Esta junta geralmente é a mais resistente porque distribui bem a tensão pela área e é fácil de manter os substratos alinhados evitando o surgimento de outros tipos de carregamentos (SILVA, 2007).

As juntas de clivagem e descascamento ocorrem quando há forças na fronteira da junta, a diferença entre elas é a rigidez do substrato, para clivagem os substratos são flexíveis, para o descascamento os substratos são rígidos. A junta apresenta resistência muito baixa para estas solicitações, muito inferior aos outros tipos de carregamentos por que a tensão aplicada se distribui em uma área menor (SILVA, 2007).

A distribuição de tensão de cada tipo de junta pode ser vista na Figura 21, onde se percebe que as juntas de descascamento e clivagem concentram tensões em áreas menores, e por isso são menos resistentes.

Figura 21 - Distribuição de tensão em juntas coladas: (1) Tração, (2) cisalhamento e (3) descascamento e clivagem.



Fonte: SILVA, 2007.

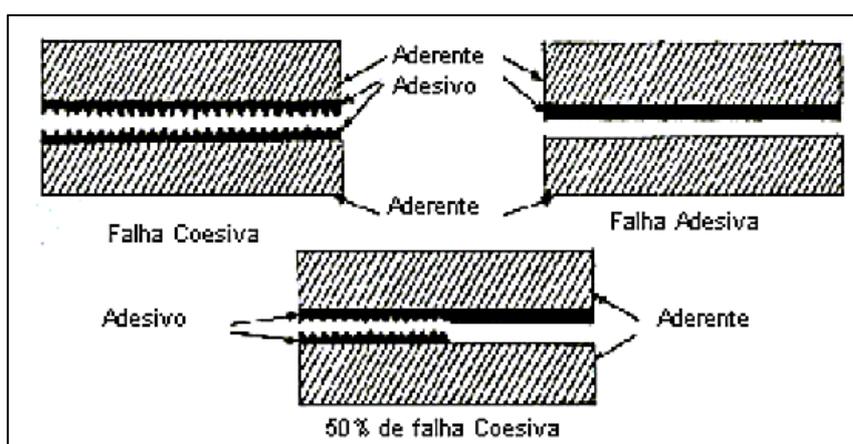
Para concluir o comportamento mecânico da junta, é importante entender quais são os tipos de falha quando o limite de resistência da junta é superado. As falhas podem ser do tipo coesiva, adesiva ou adesiva-coesiva.

A falha coesiva ocorre quando há rompimento apenas do adesivo ou apenas do substrato. A falha coesiva no substrato significa que a colagem atingiu o desempenho ideal (Figura 22).

A falha adesiva ocorre na interface adesivo-substrato, é a falha mais comum e sofre influência de vários fatores como molhabilidade, rugosidade, presença de contaminante na superfície, etc. (Figura 22).

A falha adesiva-coesiva ocorre quando há rompimento no adesivo e na interface entre adesivo e substrato, ou quando há rompimento no substrato e entre adesivo e substrato (Figura 22).

Figura 22 - Tipos de falhas em juntas coladas.



Fonte: SAMPAIO, 1998.

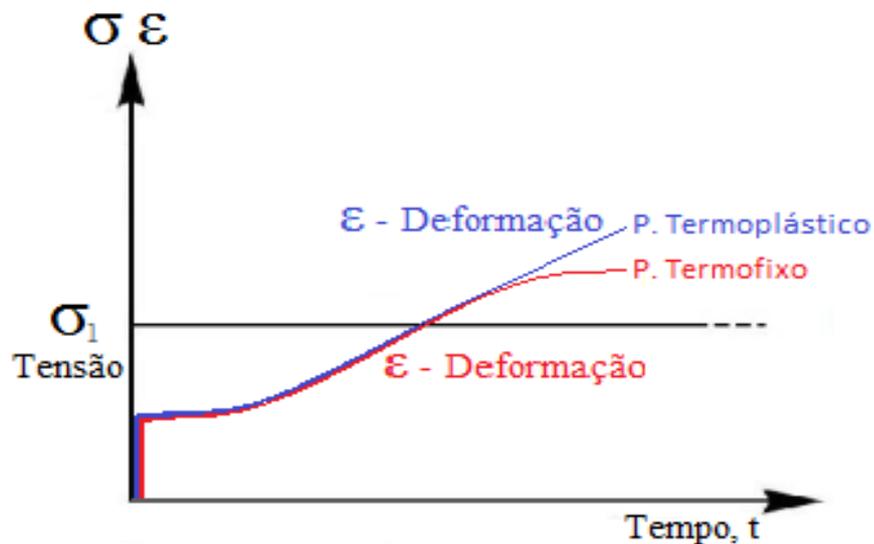
1.4 Fluência

A fluência é um comportamento apresentado por materiais viscoelásticos, que quando submetidos a tensões constantes, apresentam inicialmente uma deformação elástica e/ou plástica que permanece ampliando ao longo do tempo de forma lenta e contínua (Figura 22). Ela ocorre em todos os materiais, mas é mais significativa em materiais poliméricos. O nível de tensão, o tempo e a temperatura tem forte influencia neste comportamento (CALLISTER,

2007). A norma ASTM-D2294 estabelece a metodologia de ensaio sobre fluência de adesivos colados em substratos metálicos.

Queiroz (2013) estudou sobre a fluência de juntas de cisalhamento constituídas de adesivo epóxi em substrato metálico submetidas ao carregamento constante de 60% do limite de ruptura ao cisalhamento na temperatura de 20°C, e concluiu que as juntas resistiram a um período superior a 2 anos. Com base neste resultado e de maneira bem simplificada, os ensaios de fluência deste trabalho não poderiam ultrapassar 60% da pressão encontrada nos ensaios de ruptura.

Figura 23 - Fluência: tensão constante, tempo e aumento da deformação.



Fonte: O autor, 2017.

1.5 Adesivos

Os adesivos são polímeros utilizados para unir “permanentemente” pelo menos duas superfícies e oferecem resistência à separação. Eles podem ser classificados de várias maneiras, mas a maneira geral é quanto a sua origem, natureza química e tipo químico (Tabela 2). Na indústria, a classificação é mais prática e leva em consideração principalmente a forma física, função, e aplicação. A função está relacionada à resistência do adesivo, que pode ser estrutural ou não estrutural, o adesivo possui uma resistência ao cisalhamento superior a 10 MPa, os adesivos não estruturais estão abaixo deste valor. A forma física está relacionada

principalmente à consistência de aplicação e às condições de cura (Tabela 3). Os tipos de adesivos estruturais estão na Tabela 3. A aplicação está relacionada ao material do substrato que o adesivo é compatível (Tabela 4) (SILVA, 2007).

Tabela 2 - Classificação dos adesivos quanto à origem, natureza química e tipo químico.

Origem	Natureza Química	Tipo Químico	Adesivo
Natural	Animal	Albumina	cola animal, caseína, goma-laca, cera de abelha
	Vegetal	Resinas naturais	(goma arábica, colofonia, etc.); óleos e graxas (cera de carnaúba, óleo de linhaça); Proteínas (soja); carboidratos (amido, dextrinas)
	Mineral	Materiais inorgânicos	(silicatos, magnésia, fosfatos, enxofre); graxas minerais (parafina), resinas minerais (copal, âmbar); betumem
Sintético	Elastômeros	Borracha natural	(e derivados, borracha clorada, borracha ciclizada, borracha hidro clorada)
	Termoplásticos	Borracha sintética e derivados	butil, poliisobutileno, misturas de polibutadieno (estireno e acrilonitrila), polisoprenos, policloroprenos, silicone, poliuretanos, polisulfetos, poliolefinas (cloro vinil etileno, etileno propileno)
		Derivados da celulose	(acetato, acetato-butirato, caprato, nitrato, metil celulose, etil hidroxi celulose, carboxi metil celulose)
		Polímeros vinil e copolímeros	polivinil-acetato, álcool, acetal, cloroato, cloroato polivinilideno, éteres alquil polivinil)
		Poliésteres (saturados) Poliacrílatos	(poliestireno, poliamidas (nylons e modificações), (metilacrilatos e polímeros acrilatos, ciano-acrilatos, acrilamida)
		Poliéteres	(éter e polihidroxi, éteres polifenólicos)
	Termorigidos	Amino plásticos	(uréia e formaldeídos melamina e modificações)
		Epóxidos e modificações Resinas fenólicas e modificações	(epóxi poliamida, epóxi betume, epóxi polisulfeto, epóxi nylon) (fenol e resorcinol formaldeído, fenólico-nitrila, fenólico-neopreno, fenólico-epóxi)
		Poliésteres insaturados Poliaromáticos	poliimida, polibenzimidazole, polibenzotiazole, polifenileno)
		Furanos	(fenol furfural)

Fonte: Adaptada de PEREIRA, 2007.

Tabela 3 - Classificação dos adesivos quanto à forma física (consistência e condições de cura).

Tipo de adesivo	Formas mais comuns					Método de cura		Condições de processamento			
	Sólido	Filme	Pasta	Líquido	Solução de solvente, emulsão	Libertação de solvente	Reacção química	Temperatura ambiente	Temperatura elevada	Pressão necessária	Pressão não necessária
Epóxido (+ poliamina)			x	x			x	x	x		x
Epóxido (+ polianhídrido)	x	x	x	x			x		x		x
Epóxido (+ poliamida)			x	x			x	x	x		x
Epóxido-fenólico		x	x				x		x	x	
Epóxido-nylon		x			x		x		x	x	
Epóxido-polisulfito		x	x				x	x			x
Nitrilo-fenólico		x			x		x		x	x	
Vinilo-fenólico		x					x		x	x	
Neopreno-fenólico		x			x		x		x	x	
Formaldeído de resorcinol				x			x	x	x	x	
Formaldeído de fenol				x			x	x	x	x	
Melamina-formaldeído	x						x		x	x	
Ureia-formaldeído	x			x			x	x	x	x	
Poliimida		x			x		x		x	x	
Bismaleimida		x	x				x		x	x	
Polibenzimidazol		x					x		x	x	
Poliéster + isocianato		x			x	x	x	x	x	x	
Poliéster + monómero			x	x			x	x	x		x
Poliuretano			x	x	x	x	x	x			x
Cianoacrilato				x			x	x		x	
Acrílico			x	x			x	x			x

Fonte: PETRIE, 2007.

Tabela 4 - Classificação dos adesivos quanto aplicação (material do substrato).

	Epóxico	Nitrilo-fenólico	Vinilo-fenólico	Neopreno-fenólico	Formaldeído de resorcinol	Formaldeído de fenol	Melamina-formaldeído	Ureia-formaldeído	Poliaromáticos	Poliéster	Poliuretano	Anaeróibico	Cianoacrilato	Acrílico modificado
Metais	x	x	x	x					x		x	x	x	x
Cerâmicos	x										x	x	x	x
Madeira	x	x			x	x	x	x			x			x
Papel				x										
Couro		x												
Têxteis														
Elastômeros														
Neopreno														
Silicone														
Poliuretano											x			
Termoplásticos														
PVC (flexível)											x			
PVC (rígido)	x										x			x
Acetato de celulose					x	x					x		x	
PE (filme)														
PE (rígido)	x	x												
PP (filme)														
PP (rígido)	x	x												
PC	x										x			x
Teflon®	x					x								
PS	x										x		x	
PA	x	x			x	x								
Termoendurecíveis														
Epóxico	x				x	x					x	x	x	x
Fenólico	x	x		x				x			x	x	x	x
Poliéster	x									x				
Politereftalato de etileno										x				
Poliaromáticos	x								x					

Fonte: SHIELDS, 1984.

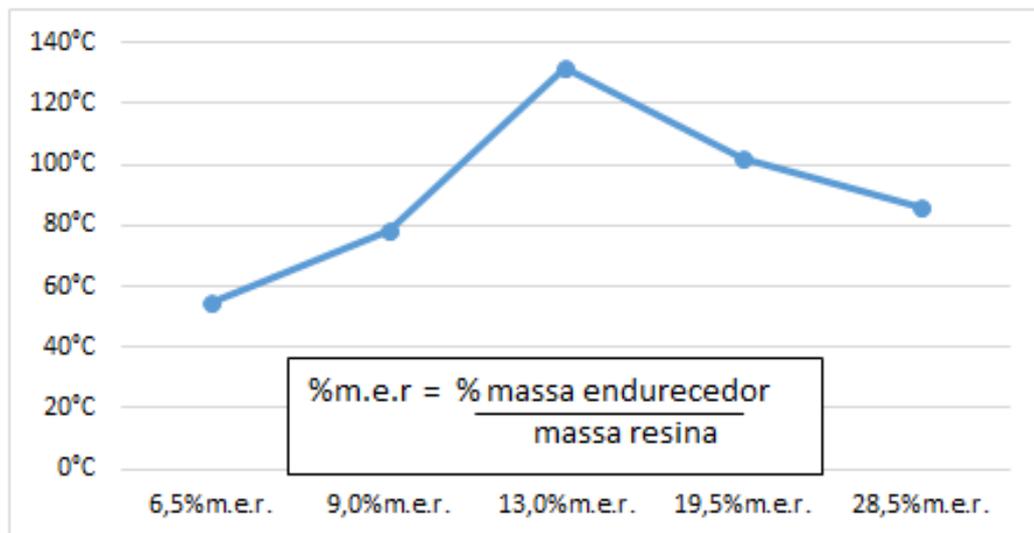
Os adesivos, por serem polímeros, também são caracterizados pela temperatura de transição vítrea (Tg) e pela temperatura de deflexão ao Calor (HDT).

A Tg é a temperatura que marca uma mudança de consistência do adesivo, passa de um comportamento rígido para um comportamento caracterizado pelo amolecimento. Acima da temperatura de transição vítrea, o material é dúctil e a rigidez diminui bruscamente.

Continuando a aumentar a temperatura atinge-se o estado de líquido viscoso na temperatura de fusão (T_m). Os polímeros termorrígidos não apresentam fusão, eles degradam em temperaturas elevadas e sua temperatura de transição vítrea é controlada pelo grau de reticulação da estrutura. A medição da temperatura de transição vítrea em polímeros é realizada recorrendo a métodos como o DSC (*Differential Scanning Calorimetry*), TMA (*Thermo Mechanical Analysis*) ou DMA (*Dynamic Mechanical Analysis*). (SILVA, 2007).

Ferreira (2009) mostrou que a proporção endurecedor poliamina/resina epóxi influencia diretamente na T_g do adesivo produzido, conforme a Figura 24.

Figura 24 - Variação da T_g com a concentração do endurecedor do adesivo (Resina DGEBA) x (Endurecedor TETA).



Fonte: FERREIRA, 2009.

A HDT é a temperatura onde há um decréscimo significativo das propriedades mecânicas estruturais do polímero. O ensaio para sua determinação consiste em aquecer um corpo de prova submetido a um carregamento de flexão constante, a temperatura em que o corpo prova não consegue mais resistir ao carregamento é a HDT. A metodologia deste ensaios é estabelecida pela norma ASTM D 648-06.

Os adesivos que apresentam T_g e HDT elevadas possuem resistência térmica elevada.

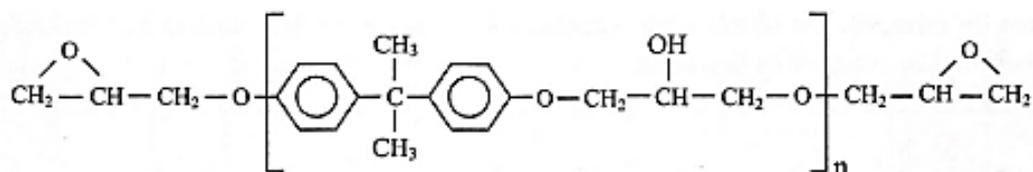
1.5.1 Adesivo epóxi

Diante do objetivo deste trabalho em desenvolver um reparo com chapa colada em tubulações de aço, as características do adesivo adequado são: função estrutural, forma física pastosa, cura na temperatura ambiente sem necessitar de pressão, e compatibilidade com substrato metálico. O cruzamento da Tabela 3 e Tabela 4 aponta que os adesivos Epóxi (+ poliamina), Epóxi (+ poliamida), Epóxi-polisulfito, Poliuretano e Acrílico seriam os mais adequados para este trabalho.

O adesivo optado foi o Epóxi (+ poliamina) porque além de corroborar com os critérios acima, ele já vem sendo utilizado nos trabalhos realizados pelo Laboratório de Adesão e Aderência na área de reparos com chapa colada em tubulações de aço com defeito transpassante. De maneira geral, este tipo de adesivo é composto por uma resina epóxi (a base) e um endurecedor de poliamina (agente de cura), e como produto acabado possui excelente resistência à tração e ao cisalhamento, mas a resistência ao descascamento não é tão boa (SILVA, 2007).

A resina Epóxi é a principal componente do adesivo Epóxi, ela é responsável pelas principais características do adesivo como a molhabilidade, dinâmica da cura, resistência mecânica, resistência ao meio ambiente, Tg, HDT, etc. A resina epóxi mais utilizada é a DGEBA (Diglicidil Eter Bisfenol A) (Figura 25) e suas características são: baixa viscosidade, alta velocidade de cura, baixa contração durante a cura, alto poder adesivo, boas propriedades mecânicas e elétricas, ótimos isolantes, boa resistência a agentes químicos, à corrosão e temperatura, e compatibilidade com vários materiais (aço, madeira, cerâmica, rochas, plásticos, etc). A cura necessita da ação de um endurecedor para formar o reticulado e o polímero final, quando curada, ela dá origem a um polímero termorrígido, duro, insolúvel e infusível que é muito utilizado como adesivo estrutural nas indústrias de petróleo, aeroespacial, automobilística (SILVA, 2007).

Figura 25 - DGEBA (Diglicidil Eter Bisfenol A)



Fonte: SILVA, 2007.

O endurecedor é responsável por promover e participar das reações químicas com a resina dando início e acelerando a polimerização (cura) do adesivo, ele influencia nas propriedades finais do adesivo (SILVA, 2007). As resinas epóxi podem ser curadas com vários agentes de cura, inclusive com ácidos de Lewis, conforme as necessidades de cura e produto final. Os principais endurecedores usados pela indústria são as aminas (poliamina), amidas (poliamidas) e anidros (SILAEX).

Outros componentes podem ser adicionados à mistura resina-endurecedor para melhorar alguma propriedade do adesivo, são eles, os aceleradores que retardam ou aceleram a velocidade de cura, os solventes que alteram a consistência do adesivo e facilitam sua mistura com outros componentes, as cargas que alteram as propriedades mecânicas, elétricas, térmicas, etc, os reforços que alteram a resistência mecânica, os plastificantes que melhoram a flexibilidade, etc. (SILVA, 2007).

A cura é o processo de formação de ligações cruzadas que transforma a resina epóxi no sólido termorrígido (polímero) que ocorre quando a resina é misturada com agentes de cura. Ela apresenta dois fenômenos macroscópicos principais: a geleificação e a vitrificação. A geleificação está relacionada com a brusca variação da viscosidade, caracterizada por uma transformação de líquido para gel, e o tempo em que ocorre esse fenômeno é conhecido como ponto gel. A vitrificação pode ou não ocorrer após a geleificação e é o processo de transformação de gel para vítreo. É nesta etapa que ocorre a densificação macromolecular pelo aumento do número de ligações cruzadas, o que leva à formação de um material insolúvel e infusível (PHAM, 2011). Ao final da cura o adesivo manifesta as propriedades mecânicas finais desejadas.

1.5.2 Adesivo NVT

O adesivo utilizado neste trabalho foi o NVT. Ele foi desenvolvido pelo LAA em parceria com a empresa POLINOVA. É um adesivo estrutural composto por uma resina epóxi e um endurecedor de base poliamina pré-carregados com aditivos e cargas minerais. Ele já possui utilização no sistema de reparo com compósitos laminados e chapa colada desenvolvido e aplicado pelo LAA. A tabela 5 apresenta as características básicas do NVT.

Tabela 5 - Características básicas do NVT.

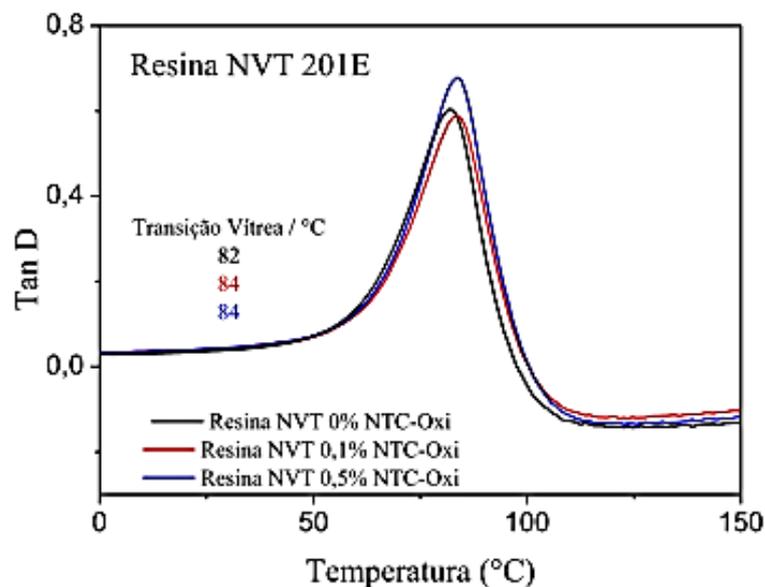
Fabricante	MACSEAL
Composição	Resina (Epóxi, aditivos e cargas minerais) + Endurecedor (Poliamina, aditivos e cargas minerais)
Proporção (fabricante)	2A:1B (2 volumes da resina e 1 volume de endurecedor)
Tempo entre mistura e aplicação	40min a 25°C
Tempo de cura	6 horas em condições ambiente
Tg	82°C.

Fonte: O autor, 2017.

O NVT possui baixa molhabilidade, que trás efeitos antagônicos: dificulta a penetração do adesivo nas reentrâncias do substrato e limita a aproximação molecular sólido-líquido, que acaba diminuindo a resistência da colagem, entretanto impede que o adesivo escorra em certas aplicações de campo, favorecendo a aplicação do adesivo em locais adversos.

Ferreira (2016) realizou um estudo sobre o NVT e concluiu que sua Tg é de 82°C. Seu estudo considerou a fração volumétrica de 2:1 de resina/endurecedor, cura na temperatura ambiente por 24h e utilizou a DMA com rampa de aquecimento de 3°C/min (Figura 26).

Figura 26 - DMA: Tg do NVT.



Fonte: FERREIRA, 2016.

Silva (2016) utilizou o NVT como adesivo de reparos com chapas coladas de Aço Baixo Carbono de 76,0 x 76,0 x 6,35mm, em tubos de aço API 5L X56 com superfície jateada e furo

de 10mm de diâmetro. Seus resultados mostraram que a colagem suportou pressões hidrostáticas de ruptura acima de 315bar.

1.6 Tratamentos superficiais

Os tratamentos superficiais são procedimentos que utilizam reações químicas e ações mecânicas para modificar as características superficiais dos materiais (ex.: ataque ácido, limpeza, lixamento, jateamento, etc.).

Os objetivos da preparação da superfície são remover impurezas/contaminantes da superfície que impedem o contato adesivo-substrato (partículas sólidas, umidade, óleo, graxa, carepa, oxidação/ferrugem, etc), criar um perfil de rugosidade e porosidade que favoreçam a ancoragem mecânica entre adesivo-substrato, melhorar a molhabilidade, aumentar a energia livre superficial e aumentar a área real de contato (PETRIE, 2007).

Os tratamentos superficiais aplicados neste trabalho para melhorar o desempenho da junta foram a limpeza de superfície, lixamento, jateamento, uso da ferramenta MBX e Silano, e são tratados nos tópicos a seguir.

1.6.1 Limpeza da superfície

A limpeza da superfície é essencial antes de qualquer tratamento abrasivo da superfície (lixamento, esmerilhamento, jateamento, limpeza química, etc.). A limpeza química normalmente é feita com solventes, soluções apropriadas de produtos alcalinos, emulsificantes, desengraxantes e até apenas vapor d'água, ela consiste em remover todo contaminante, gordura, partículas sólidas, umidade, óleo, graxa, carepa, oxidação/ferrugem, etc. Os principais fatores que influenciam na escolha do produto para limpeza da superfície são o tipo de contaminante presente na superfície do material, a agressividade química contra o substrato, e o ambiente onde será aplicado. O método mais usual é por remoção com solventes utilizando panos brandos e limpos, embebidos em solvente como por exemplo o xilol, efetuando a troca frequente destes para assim obter uma efetiva remoção dos contaminantes (SSPC-SP1:2004).

As normas SSPC-SP (Steel Structures Painting Council - Surface Preparation Specifications), ISO 8501, 8502, 8503 e 8504 (International Standard Organization) e NACE 1 a 8 detalham os principais tipos de limpeza industriais existentes.

1.6.2 Lixamento

O processo de lixamento é um processo de desgaste abrasivo definido como de geometria não definida. É utilizado para modificar a rugosidade superficial dos materiais, porém o lixamento não possui um controle dimensional, geométrico e superficial eficiente como em outros métodos de tratamento superficiais.

É recomendado o lixamento da superfície de um substrato antes da aplicação da resina nos processos de colagem, já que uma superfície lixada poderá eliminar impurezas mais profundas da superfície e proporcionar um aumento da rugosidade Ra (Rugosidade Aritmética) e RMS (Desvio Quadrático da Rugosidade) e maior aderência da resina. O lixamento é muito utilizado na indústria, na preparação de superfícies metálicas a serem pintadas ou coladas.

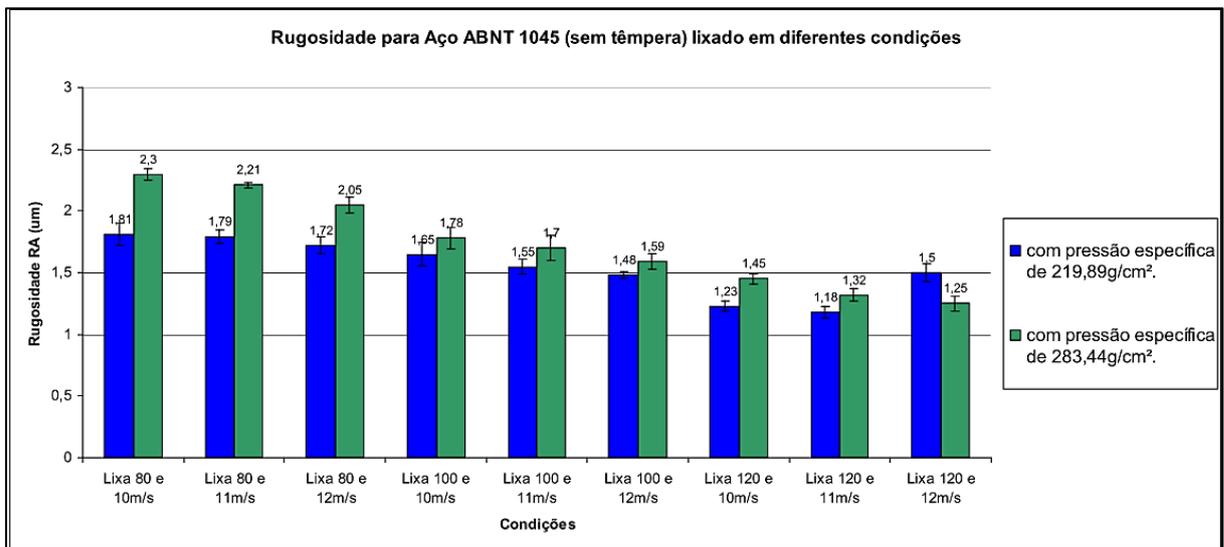
A especificação da lixa utilizada é fundamental, já que o tipo de lixa está relacionado à vida útil da lixa e à qualidade do acabamento superficial desejado. A Tabela 6 destaca alguns fatores que influenciam na vida útil da lixa e figura 2.3.2a destaca outros fatores que influenciam na Ra (Rugosidade Aritmética) da superfície (ALVES, 2010)

Tabela 6 - Influência das variáveis do processo de lixamento sobre a vida do abrasivo.

Fator	Efeitos sobre a vida do abrasivo
Pressão	Com o aumento da pressão aumenta-se proporcionalmente a taxa de remoção de material, a temperatura da lixa e a carga o que acarreta danos ao abrasivo
Comprimento da área de contato	Reduzindo a área de contato reduzirá a temperatura e o carregamento sobre a lixa, aumentando a vida útil da lixa, mas reduzindo a taxa de remoção de material, ou seja, produtividade
Granulometria da lixa	Quanto maior o número menor a taxa de remoção de remoção de material e mais fino é o acabamento. No entanto quanto maior esse número maior o carga sobre a lixa
Velocidade da lixa	Alta taxa de velocidade conduzirá a uma maior remoção de material, mas levará a um aumento da temperatura causando danos ao abrasivo
Tipo de Abrasivo	Dependendo do tipo de abrasivo ocorrerá uma maior ou menor taxa de desgaste, sendo sua escolha correta de suma importância

Fonte: ALVES, 2010.

Figura 27 - Influência da granulometria da lixa, velocidade e força de lixamento sobre a Ra (Rugosidade Aritmética) da superfície.



Fonte: ALVES, 2010.

Sobre a ótica na Figura 27, é possível estabelecer as relações entre Granulometria da lixa, velocidade de lixamento, pressão/força para melhor rugosidade aritmética, conforme plotado na Tabela 7.

Tabela 7 - Influência da malha da lixa, velocidade e força de lixamento sobre a Ra (Rugosidade Aritmética) da superfície.

Granulometria da Lixa	Velocidade de lixamento	Pressão/Força	Rugosidade (Ra)
Menor	Menor	Maior	Maior
Maior	Maior	Menor	Menor

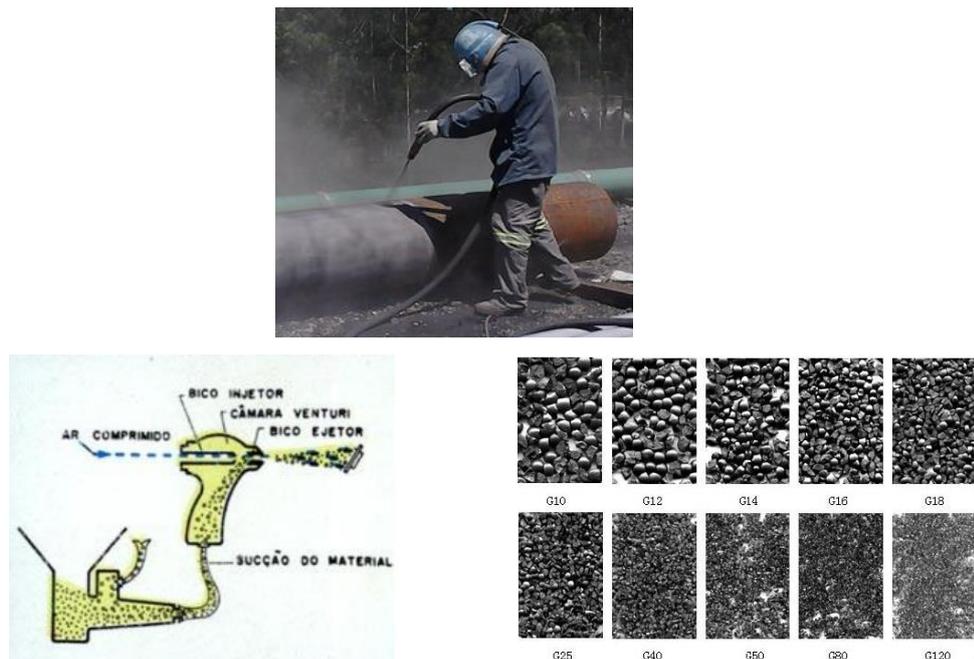
Fonte: AUTOR, 2017.

1.6.3 Jateamento

O Jateamento é uma técnica de tratamento superficial abrasiva que utiliza uma máquina para expelir jatos de partículas ou fluidos utilizando altas pressões. As partículas ou o fluido são acelerados e jateados até atingir a superfície do material com elevada velocidade e energia de impacto causando abrasão, remoção de pintura, oxidação e contaminantes, e proporcionando uma tensão residual compressiva na superfície. Estas partículas podem ser sólidas ou líquidas,

onde os principais materiais utilizados são areia, óxido de alumínio, granalha de aço, sponge-jet, água, etc. (Figura 28), entretanto esta técnica necessita de isolamento/confinamento do ambiente onde se encontra a peça a ser jateada, o uso de areia sílica é prejudicial à saúde e a granalha de aço pode provocar oxidação por armazenamento inadequado, mas é possível reutilizar/reciclar a granalha de aço.

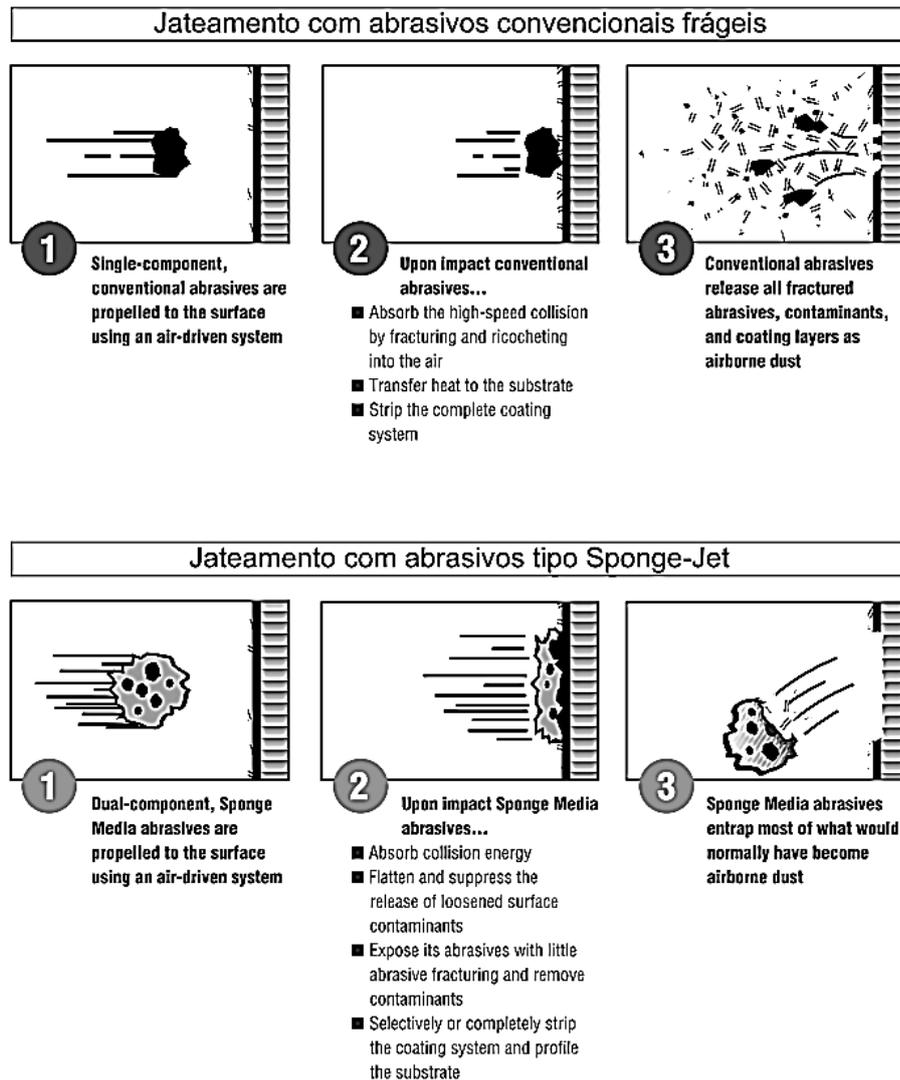
Figura 28 - Jateamento convencional, pistola e granalhas de aço.



Fonte: O autor, 2017.

O Jateamento sponge-jet utiliza partículas abrasivas de óxido de alumínio, aço, prata, etc. revestidas por um tipo especial de esponja, esta combinação reduz os níveis de pó transportado pelo ar, os ricochetes e o desperdício associados com os abrasivos convencionais (Figura 29). Este tratamento promove os mais variados níveis de rugosidade, entretanto o resultado final é influenciado diretamente pelo material da granalha (dureza principalmente), da dimensão da granalha, do tempo de ataque, e da distância entre a pistola e o substrato. Após o jateamento a superfície deve ser limpa com escovas, aspiradores ou jato de ar seco para a remoção de grãos de areia e outras partículas soltas (PAREDES).

Figura 29 - Jateamento por Sponge-Jet.



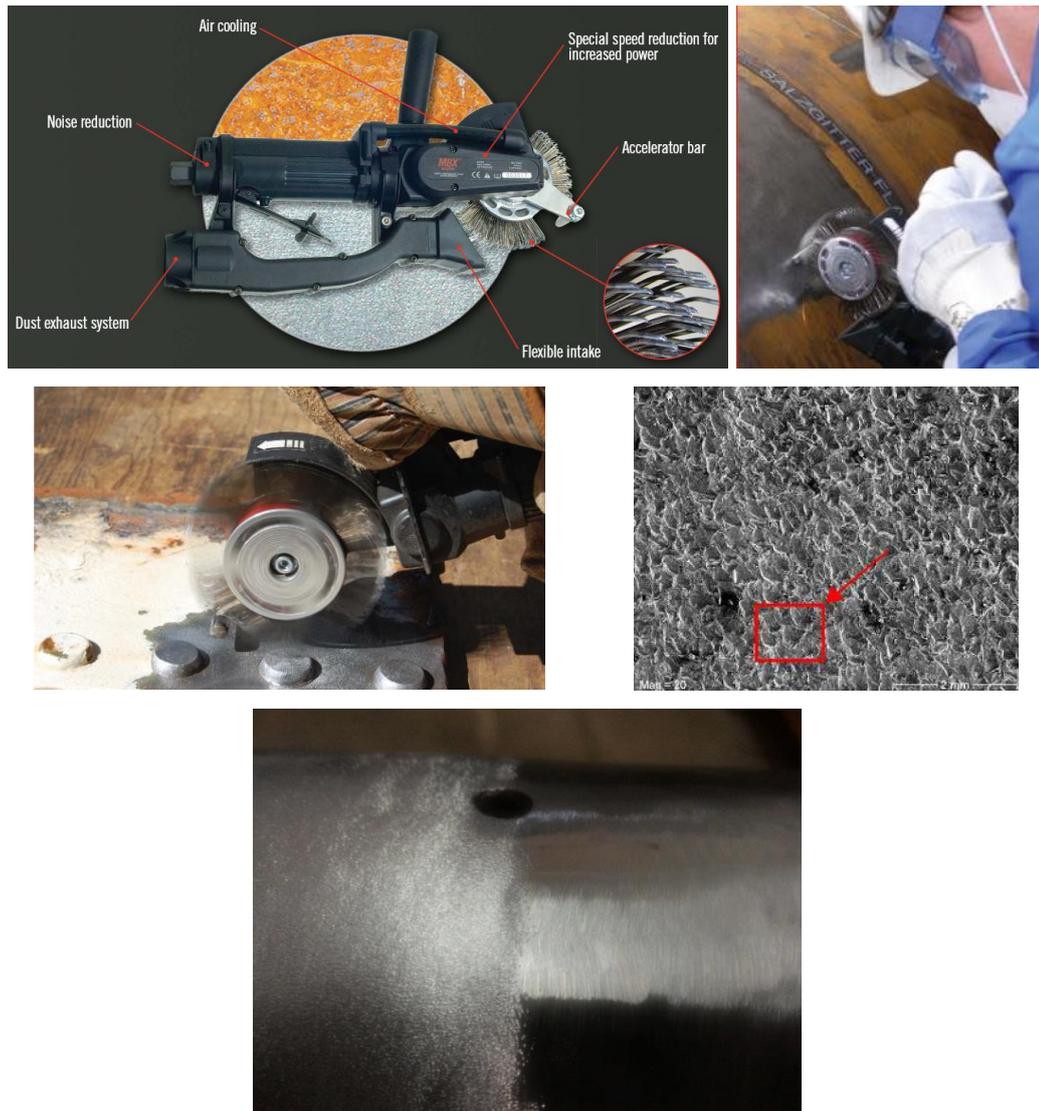
Fonte: SPONGE-JET MANUAL, 2003.

1.6.4 Ferramenta MBX (*Bristle Blasting*)

O tratamento com ferramenta MBX Bristle Blasting é um tratamento superficial que utiliza uma máquina rotativa elétrica com cerdas de arame de aço de alto carbono, ou seja, com dureza elevada. A energia cinética de impacto das cerdas com a superfície é equivalente à do jateamento com granalhas de aço proporcionando uma superfície limpa de óxidos/corrosão, revestimento/pintura e contaminantes, gera uma rugosidade aritmética maior/melhor para a adesão entre substrato e adesivo, gera tensões residuais compressivas, o equipamento é compacto e simples de manusear, pode ser alimentado por eletricidade ou ar comprimido, não

gera resíduos perigosos, pode ser utilizado em algumas zonas classificadas com atmosfera explosiva, etc (Figura30). As cerdas da ferramenta são normalmente de aço API 5L com taxa de varredura de $1,1\text{m}^2/\text{h}$, podendo atingir uma rugosidade média (R_z) entre $65\ \mu\text{m}$ e $83\ \mu\text{m}$, quanto menor a taxa, maior será a rugosidade média (ABREU, 2008).

Figura 30 - Ferramenta MBX (*Bristle Blasting*).



Fonte: O autor, 2017.

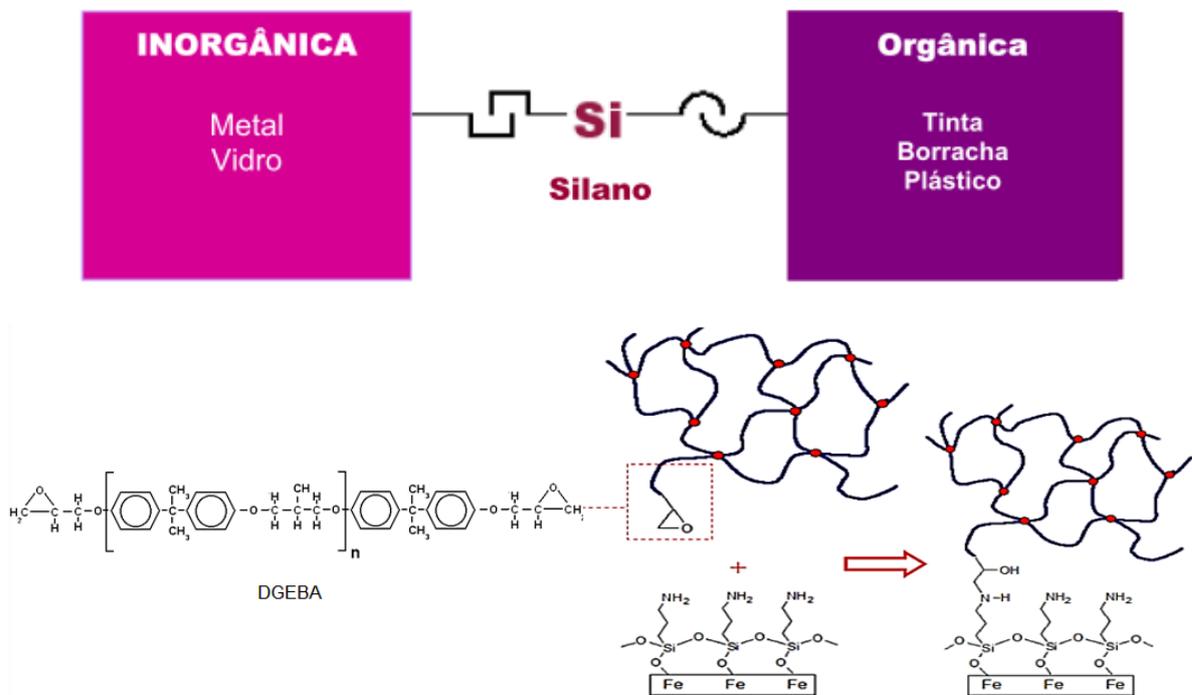
1.6.5 Silano

O Silano (organosilano) é conhecido como agente de acoplamento, ele é usado para melhorar união entre os adesivos orgânicos e substratos inorgânicos, se comportando como um

agente intermediário que se acopla de um lado ao adesivo, e do outro ao substrato, onde ambos acoplamentos são por ligações químicas primárias (DOIDJO, 2013), onde naturalmente o adesivo estaria ligado ao substrato apenas por ligações químicas secundárias, que são mais fracas (Figura 31).

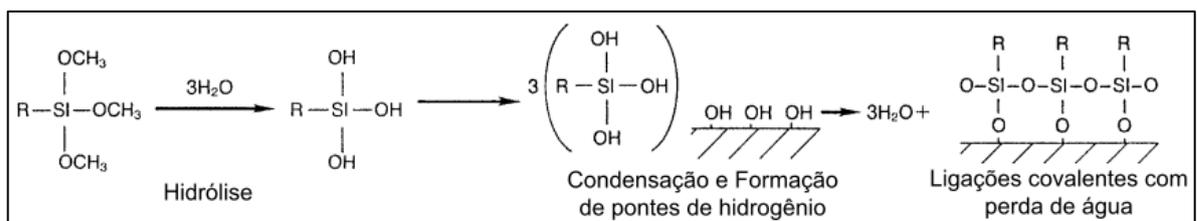
A atuação do Silano se inicia pela a hidrólise dos seus três grupos substituintes, depois ocorre a condensação de oligômeros, os oligômeros formam ligações de pontes de hidrogênio com grupos OH do substrato, e por fim formam ligações covalentes com o substrato com a consequente perda de água (Figura 32) (PETRIE, 2007).

Figura 31 - Mecanismo de acoplamento do Silano.



Fonte: O autor, 2017.

Figura 32 - Reação do Silano.



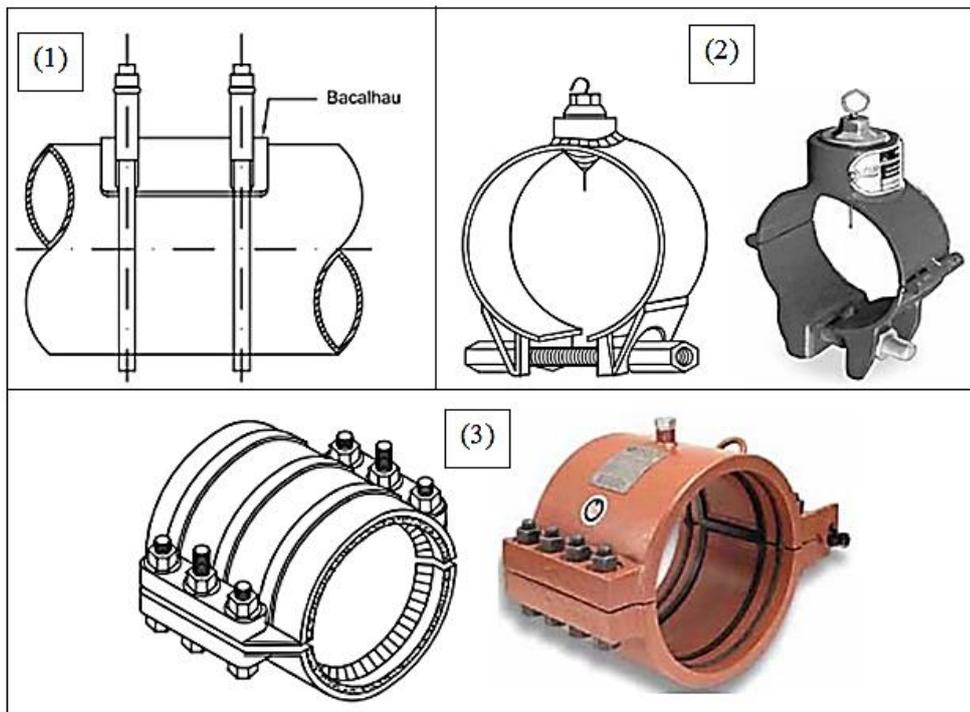
Fonte: O autor, 2017.

1.7 Reparo de tubulações

Tubulações e vasos de pressão com o tempo podem apresentar diversos tipos de defeitos, dentre eles estão os vazamentos e perda de espessura proveniente principalmente de corrosão. Os principais tipos de reparos para tratamento vazamentos e perda de espessura são: braçadeiras, corte e substituição, dupla calha soldada, dupla calha com enchimento, braçadeira com grampo, reparo com compósito. Além destes, o LAA vem desenvolvendo reparos com chapa colada que será tratado no próximo tópico.

As braçadeiras se apresentam de várias formas conforme a Figura 33, elas são utilizadas principalmente para estancar vazamentos que podem causar improdutividade, impacto ambiental e até mesmo às pessoas. Sua aplicação não é permanente, um reparo permanente ou temporário deverá superar este tipo de reparo.

Figura 33 - Braçadeiras: (1) Braçadeira com grampo, (2) Braçadeira com pino centralizador e (3) Braçadeira mecânica parafusada.



Fonte: PETROBRAS (N-2737 Rev.A), ROHEM, 2010.

O corte e substituição de um trecho de tubo é a técnica ideal de reparo de tubos. A grande vantagem é substituir o trecho danificado por um segmento novo que possui as características

originais da linha, principalmente resistência estrutural e vida útil (Figura 34). No entanto, a execução deste tipo de reparo gera diversos transtornos operacionais e logísticos (DIAS, 2007).

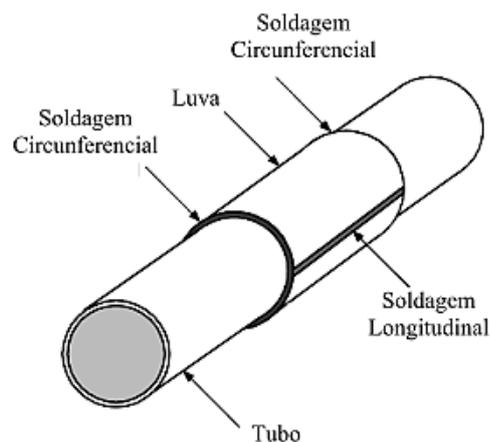
Figura 34 - Corte e substituição.



Fonte: PERRUT, 2009.

A dupla calha soldada consiste em envolver o tubo com duas meias-canais ou calhas de material similar ao material do tubo. As calhas envolvem o tubo danificado sem deixar espaço anular e cobrem toda a área danificada (Figura 35) (PERRUT, 2009).

Figura 35 - Dupla calha soldada.

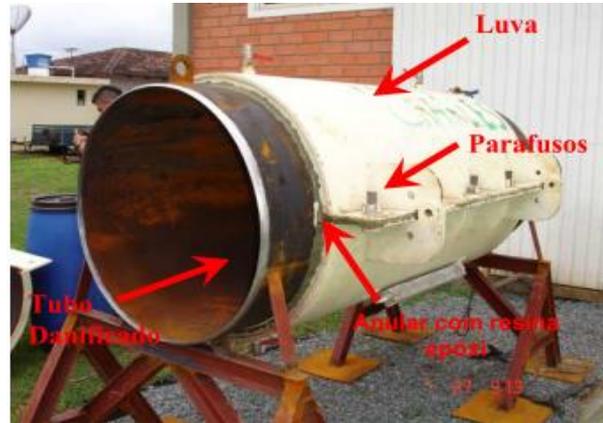


Fonte: PERRUT, 2009.

A dupla calha com enchimento consiste em envolver o trecho danificado com duas calhas formando uma luva maior que o diâmetro externo do tubo para haver um espaço anular entre o tubo e a luva. A uniformidade da distância entre a luva e o tubo é garantida por meio de espaçadores e as extremidades da luva são seladas para evitar o escape da resina de preenchimento do anular. O espaço anular é preenchido normalmente com resina epóxi

utilizando pressão para garantir o preenchimento completo do espaço. A união entre as calhas é feita com parafusos (Figura 36) (ALVES, 2006).

Figura 36 - Dupla calha com enchimento.



Fonte: PERRUT, 2009.

O reparo com compósito consiste em envolver o tubo com mantas de compósitos reforçados por fibras de alta resistência. Esta técnica tem demonstrado vantagens sobre outras pela sua simplicidade e facilidade de aplicação, sem solda, se adaptam as irregularidades geométricas, ideal para áreas classificadas onde não é permitida a geração de calor por risco de incêndio (Figura 37) (PERRUT, 2009). A norma ISO 24817:2015 é muito utilizada para projetar este tipo de reparo.

Figura 37 - Reparo com compósito.



Fonte: ROHEM, 2010.

O Laboratório de Adesão e Aderência do Instituto Politécnico da UERJ vem desenvolvendo trabalhos na área de reparo de tubos e participando das publicações dos trabalhos de Rohem (2010) que desenvolveu um sistema de reparo para dutos e tubulações industriais utilizando materiais compósitos de matriz polimérica, Albani (2011) que desenvolveu um sistema inovador de reparo emergencial em dutos com danos transpassantes,

Silva (2015) que estudou o fator de forma de área em reparo com chapa colada em tubulações com furo, Silva (2016) que a resistência à pressão hidrostática de reparo com chapa colada em tubulações com furo, e o presente trabalho sobre reparo com chapa colada em tubulações de aço com diferentes tratamentos superficiais.

1.7.1 Reparo com chapa colada

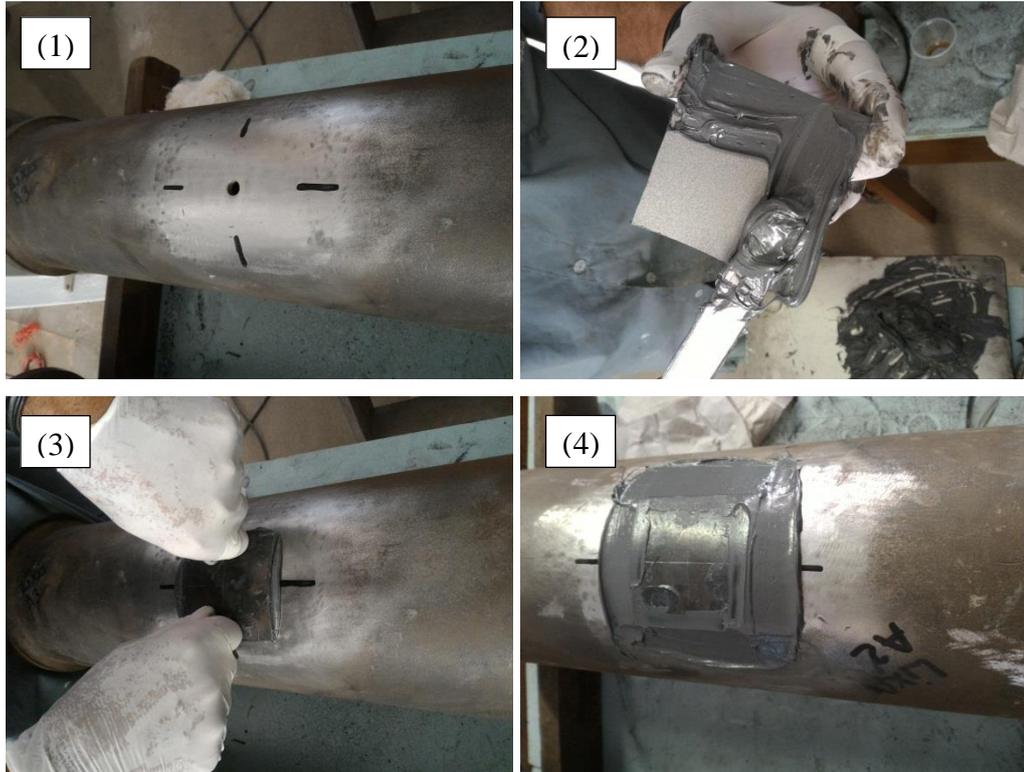
O Reparo com chapa colada consiste na colagem de uma chapa de aço sobre o dano ou defeito na tubulação utilizando um adesivo estrutural (Figura 38), as principais vantagens em relação aos reparos convencionais são a facilidade e simplicidade de projetar e aplicar, a distribuição mais uniforme das tensões, por não necessitar de aporte de calor e baixo custo.

As propriedades mais importantes deste tipo de reparo estão relacionadas ao adesivo, ele deve possuir boa resistência descolamento devido à pressão, T_g pelo menos 20°C superior à temperatura de operação, resistir a fluência, e não degradar com o fluido de operação. O parâmetro de temperatura segue a norma ISO 24817:2015 sobre reparos com compósitos, aplicada a tubulações de água e hidrocarbonetos produzidos, fluidos inflamáveis, sistemas de gás (classe 3), defeitos transpassantes (tipo B) e vida útil até 2 anos.

Silva (2015) estudou sobre reparos com chapa colada em tubos, e concluiu que quanto maior a área da chapa, maior será a resistência de ruptura em testes hidrostáticos, e a resistência do reparo independe da direção de colagem da chapa quando ela for retangular.

Silva (2016) também identificou que quanto maior a espessura de chapa, maior será a resistência do reparo, e dentre as chapas comerciais, as chapas com espessura de 3,175mm são as mais adequadas, porque possuem maior resistência do que chapas mais finas, e chapas mais grossas prejudicam o processo de laminação, caso seja aplicado.

Figura 38 - Reparo com chapa colada.



Fonte: O autor, 2017.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Equipamentos e materiais

Os Equipamentos e materiais utilizados neste trabalho estão descritos na Tabela 8.

Tabela 8 - Equipamentos e materiais utilizados.

Rugosímetro 3D	Taylor Hobson Precision - Talyscan 150
Rugosímetro portátil	Mitutoyo SJ-301
Prensa hidráulica	Capacidade 15t
Bomba pneumática	Flutrol (Modelo Haskel MS-71) Recalque: 700bar
Sensores de pressão	Tipo 1: INOTEC 160bar Tipo 2: VELKI 400bar
Sensores de Temperatura	Termopar
Aquecedor	Resistência-elétrica (Ajustada para 60°C)
Jateadora	Capela Contijato / Alimentador IBIX 10psi Granalha de aço G40
Compressor	DeWalt CDW 25/250 5hp pcm 250litros 175lbf/pol ² Filtro MDR (Ajustado para 10bar)
Ferramenta MBX	Monti Pneumática 6,2 bar (90psi)
Lixa	Norton Ferro K246 N°36
Chapa	Material: Aço baixo carbono Dimensões: 76x76x3,175mm Concavidade: Raio externo de 152,4mm
Tubo/Vaso de Pressão	Material: Aço de baixo carbono API 5L X56 Especificação: DN 6" Sch 40
Adesivo	NVT (Fabricante: Macseal) 2 partes Resina: Epóxi, aditivos e cargas minerais Endurecedor: Poliamina, aditivos e cargas minerais Volume 1 reparo: 20ml (Resina) + 10ml (Endurecedor)
Acetona	Comercial
Silano	Silano (LAA) do grupo Glycidoxypopyl Trimethoxy
Água Deionizada	Produzida no Laboratório
EPIs	Óculos, luvas e mascaras respiratórias

Fonte: O autor, 2017.

2.2 Chapas da junta

A escolha das chapas utilizadas neste trabalho foi baseada em estudos anteriores sobre reparos realizados pelo LAA. SILVA (2015) identificou que chapas maiores que 76x76mm apresentaram não conformidades durante sua conformação e SILVA (2016) também identificou que a espessura de chapa comercial seria de 3,175mm (1/8 polegadas) porque possuem maior resistência que chapas mais finas, e chapas mais grossas prejudicam o processo de laminação, caso seja aplicado.

As especificações das chapas da junta estão descritas na Tabela 9.

Tabela 9 - Características da chapa da junta.

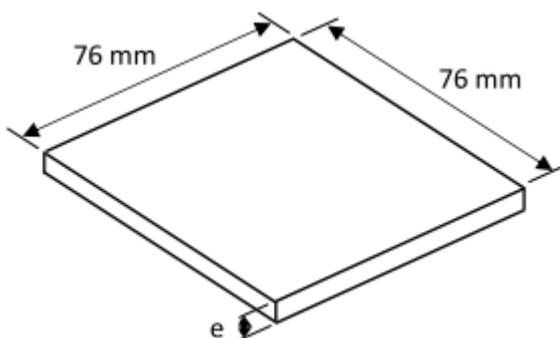
Material	Aço baixo carbono
Dimensões	76mm x 76mm x 3,175mm (1/8 polegadas)
Curvatura/concavidade:	Raio externo de 152,4mm (6 polegadas)

Fonte: O autor, 2017.

A preparação da chapa foi dividida em 5 etapas básicas: corte e marcação, conformação, jateamento, aplicação de Silano e medição de rugosidade.

O Corte da chapa foi realizado a partir de uma chapa comercial, ela foi cortada em pedaços menores com dimensões de 76mm x 76mm x 3,175mm (1/8 polegadas). Após o corte, foram feitas marcações das linhas de centro das chapas que auxiliam o posicionamento da chapa simétrica ao defeito gerado (Figura 39).

Figura 39 - Tamanho definitivo da chapa à esquerda, chapa cortada e marcada, e cortada, marcada e curvada à direita.



Fonte: SILVA, 2015.

A conformação da chapa foi efetuada por uma prensa hidráulica de 15t. A curvatura adquirida ficou próxima ao diâmetro de 152,4mm , que é o diâmetro da tubulação que será reparada (Figura 40).

Figura 40 - Conformação da capa e chapa na curvatura final de diâmetro 154,2mm (6 polegadas).



Fonte: SILVA, 2015.

Antes do jateamento, foram feitas 15 medições de rugosidade para avaliar o efeito do jateamento na rugosidade.

O jateamento foi escolhido como tratamento superficial por apresentar maiores rugosidade aritmética (Ra), média (Rz), quadrática (Rq) e altura total do perfil (Rt) em relação aos outros tratamentos disponíveis no laboratório. Adotou-se o procedimento do LAA para efetuar o jateamento com as seguintes recomendações: segregar/peneirar a granalha com a granulometria desejada G40, ajustar pressão da máquina para 6,5bar, utilizar EPIs, realizar teste de qualidade da granalha, e por último efetuar o jateamento na chapa a distância de 11cm por pelo menos 30 segundos (Figura 41). Apenas a região de interface com o substrato foi jateada. Após o jateamento, foram feitas 9 medições de rugosidade para avaliar o efeito do Silano na rugosidade.

Figura 41 - Jateamento da região de interface com o substrato.



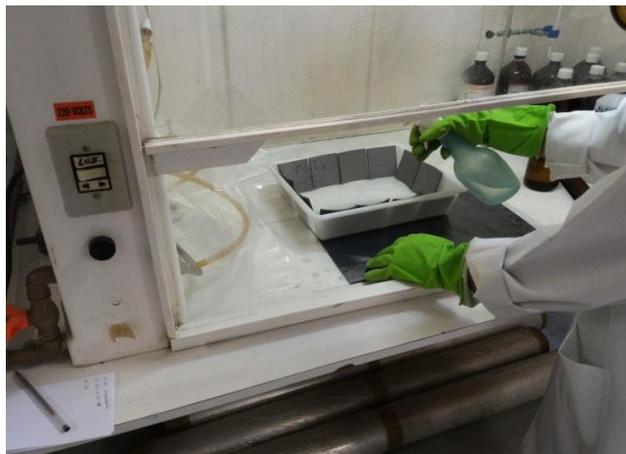
Fonte: SILVA, 2015.

Silva (2015) estudou sobre reparos com chapa colada em tubos, e observou uma predominância de falhas adesivas entre chapa e adesivo em seus experimentos, diante disto se optou por utilizar o Silano para promover maior adesão e aderência entre a chapa e o adesivo.

A aplicação do Silano foi efetuada apenas na chapa, na região de interface com o substrato, e a chapa foi conservada em estufa a 25°C até o momento da colagem (Figura 42).

Após a aplicação do Silano, foram feitas 9 medições de rugosidade para avaliar o efeito do Silano na rugosidade.

Figura 42 - Aplicação do Silano.



Fonte: O autor, 2017.

As medições da rugosidade foram feitas utilizando o rugosímetro portátil (Figura 43) e foram registrados as rugosidades aritmética (R_a) e quadrática (R_q) nas situações da Tabela 10.

Figura 43 - Medição da rugosidade com Rugosímetro portátil.



Fonte: O autor, 2017.

Tabela 10 - Plano de Medição de rugosidade.

TIPO DE TRATAMENTO	Nº DE MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE
Nenhum	15
Jateamento puro	9
Jateamento e aplicação de Silano	9

Fonte: O autor, 2017.

2.3 Tubos

Os tubos utilizados como substrato foram adquiridos com as especificações da Tabela 11.

Tabela 11 - Especificações dos tubos utilizados.

Material:	Aço de baixo carbono API 5L X56
Dimensões:	DN 154,2mm (6 polegadas) Sch 40
Defeito/furo:	Furo de diâmetro de 10mm

Fonte: O autor, 2017.

A preparação dos tubos foi dividida em 4 etapas básicas e sequenciadas: polimento/limpeza, tratamento superficial, limpeza com cetona e medição de rugosidade.

O polimento/limpeza foi necessário para eliminar as impurezas, camadas frágeis e rugosidade remanescentes residentes na superfície de todos os tubos. A superfície final desta etapa pode ser vista na Figura 44. A limpeza ocorreu utilizando um esmeril elétrico manual com lixa de mesh 35.

Figura 44 - Superfície do tubo polida/limpa.



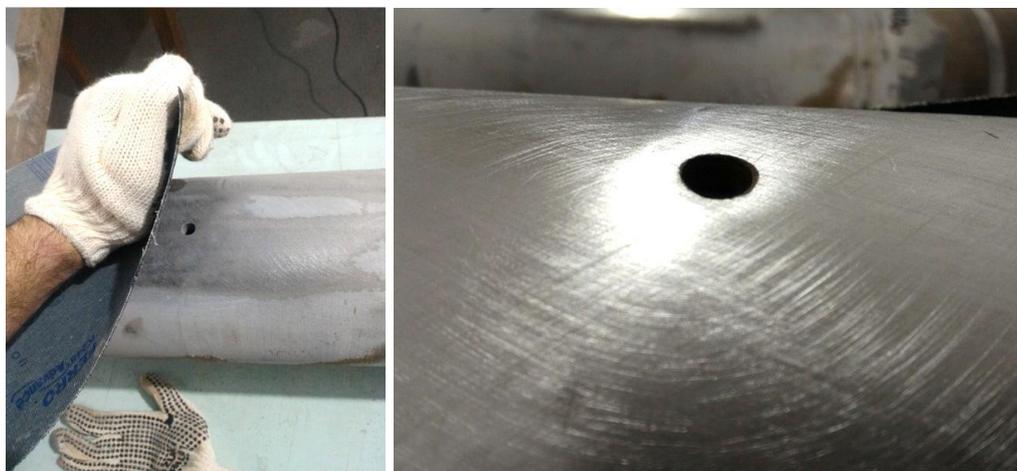
Fonte: O autor, 2017.

Os tratamentos superficiais foram adotados para aumentar a rugosidade superficial visando aumentar resistência dos reparos.

Foram adotados 3 tipos de tratamentos superficiais na tubulação: lixamento, jateamento e com ferramenta MBX. Cada tratamento superficial imprimiu um perfil próprio de rugosidade.

O lixamento foi efetuado manualmente com lixa para aço N°36 e duração de 10 minutos. A Figura 45 apresenta o aspecto final do lixamento. Após o tratamento, os tubos foram limpos com acetona.

Figura 45 - Superfície do tubo lixada.



Fonte: O autor, 2017.

O jateamento foi aplicado utilizando o procedimento do LAA com as seguintes recomendações: segregar/peneirar a granalha com a granulometria desejada G40, ajustar pressão da máquina para 6,5bar, utilizar EPIs, realizar teste de qualidade da granalha, e por último efetuar o jateamento no tubo a distância de 11cm por pelo menos 30 segundos (Figura 46). A região atingida cobre uma área superior à área da chapa. Após o tratamento, os tubos foram limpos com acetona.

Figura 46 - Tubo e chapa após o jateamento com granalha G40.

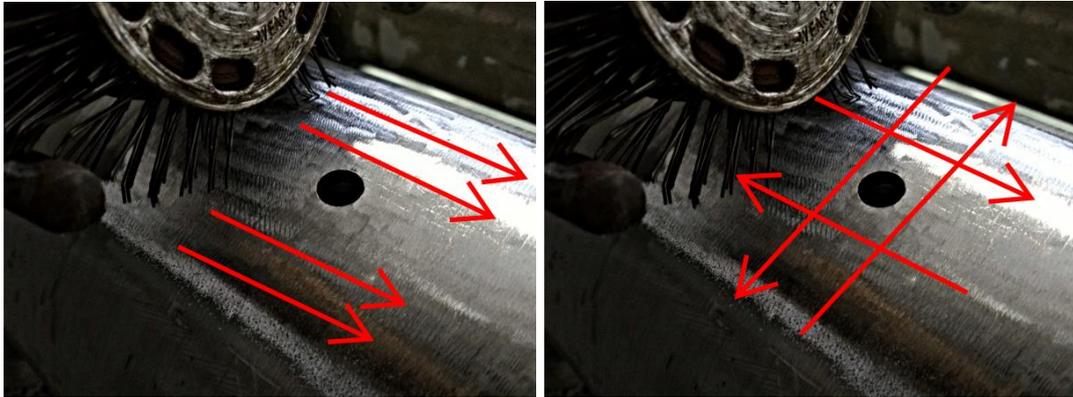


Fonte: SILVA, 2015.

Inicialmente a ferramenta MBX foi utilizada com cerdas para aço, pressão de alimentação de 10bar e regulador de pressão de 14mm, mas a ferramenta apresentou desempenho insatisfatório, em vários momentos a ferramenta não funcionou. Diante do problema, foi feita a substituição do regulador de pressão pelo de 23mm (maior vazão), o que resultou em um desempenho satisfatório. Outra questão observada foi que procedimento de uso da ferramenta informado pelo fabricante orientava que o ataque fosse realizado em apenas um sentido e direção, entretanto foi experimentado outro ataque em sentido e direção aleatórios para compará-lo com o procedimento do fabricante (Figura 47). Foram feitas 5 medições de rugosidade em cada tipo de ataque e o resultado mostrou que o ataque em aleatório produz maiores parâmetros de rugosidade (Tabela A.14). Desta forma, o ataque com a ferramenta MBX para colagem utilizou cerdas para aço, pressão de alimentação de 10bar, regulador de pressão

de 23mm e ataque em direção e sentido aleatórios. Após o tratamento, os tubos foram limpos com acetona. A aparência final da superfície está na Figura 48.

Figura 47 - Sentido e direção únicos, e sentido e direção aleatórios.



Fonte: O autor, 2017.

Figura 48 - Superfície do tubo tratada com ferramenta MBX.



Fonte: O autor, 2017.

As medições da rugosidade foram feitas utilizando o rugosímetro portátil (Figura 49) e as rugosidades aritmética (R_a), média (R_z), quadrática (R_q) e altura total do perfil (R_t) foram registradas nas situações da Tabela 11.

Figura 49 - Medição da rugosidade com Rugosímetro portátil.



Fonte: O autor, 2017.

Tabela 11 - Plano de Medição de rugosidade

TIPO DE TRATAMENTO	Nº DE MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE
Lixamento Aleatório	12
Ferramenta MBX em apenas um sentido e direção para definir o melhor procedimento	5
Ferramenta MBX aleatória para definir o melhor procedimento	5
Ferramenta MBX aleatória	12
Jateamento	12

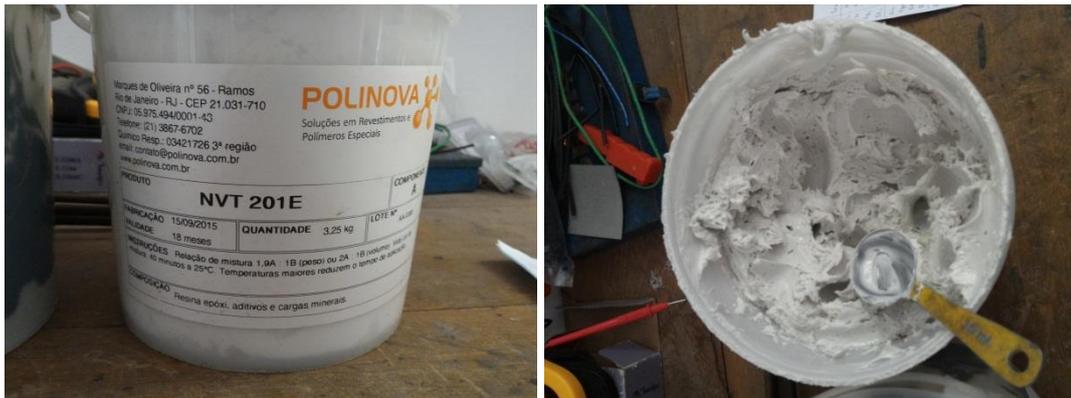
Fonte: O autor, 2017.

2.4 Colagem/Reparo

A colagem/reparo se iniciou com a marcação do centro do dano para orientar o posicionamento correto da chapa, a marcação do centro do dano ficou afastada do dano para não contaminar a região de colagem com tinta e prejudicar a adesão. Depois o adesivo NVT foi preparado misturando 30ml de resina (Figura 50) e 15ml de endurecedor (Figura 51) utilizando uma concha de 15ml, os 45ml da mistura possibilitaram realizar 3 colagens/reparos. As partes são misturadas com uma espátula até homogeneização, e a aplicação ocorreu em menos de 30min após a mistura, não ultrapassando o limite de 40min informado pelo fornecedor. Em

seguida o adesivo foi aplicado somente na chapa para garantir menor espessura de adesivo e garantir repetitividade do processo. Depois efetuou-se o contato/colagem da chapa no tubo com pressão manual e realizou-se o acabamento cobrindo as bordas da chapa com adesivo. Por fim, os reparos foram curados com tempo mínimo de 60 horas e foram iniciados os primeiros ensaios de ruptura (Figura 52).

Figura 50 - Resina epóxi (Componente A).



Fonte: O autor, 2017.

Figura 51 - Endurecedor (Componente A).



Fonte: O autor, 2017.

Figura 52 - Etapas de colagem: (1) marcação do centro, (2) e (3) preparação do adesivo, (4) aplicação do adesivo, (5) colagem da chapa, (6) cobertura das bordas com adesivo, (7) Fim da Colagem, (8) Colagem curada.



Fonte: O autor, 2017.

2.5 Ensaios hidrostáticos

Os ensaios hidrostáticos foram adotados para avaliar o desempenho dos reparos porque são capazes de simular as situações reais de campo, possibilitando prever se os reparos suportariam as situações reais pela leitura dos parâmetros de operação como pressão e temperatura do fluido. Eles foram divididos em ensaios de ruptura e ensaios de fluência conforme, onde os ensaios de ruptura ocorreram apenas nos tubos tratados com lixamento e ferramenta MBX, e os de fluência ocorreram em tubos com todos os tipos de tratamento (Tabela 12). Os ensaios foram instrumentados com sensores de temperatura e pressão que registraram seus comportamentos, e a partir do quarto teste ou primeiro teste de ruptura no tubo tratado com ferramenta MBX, utilizou-se um pigmento vermelho na água para facilitar a visualização do vazamento. A estrutura do ensaio está apresentada na Figura 53.

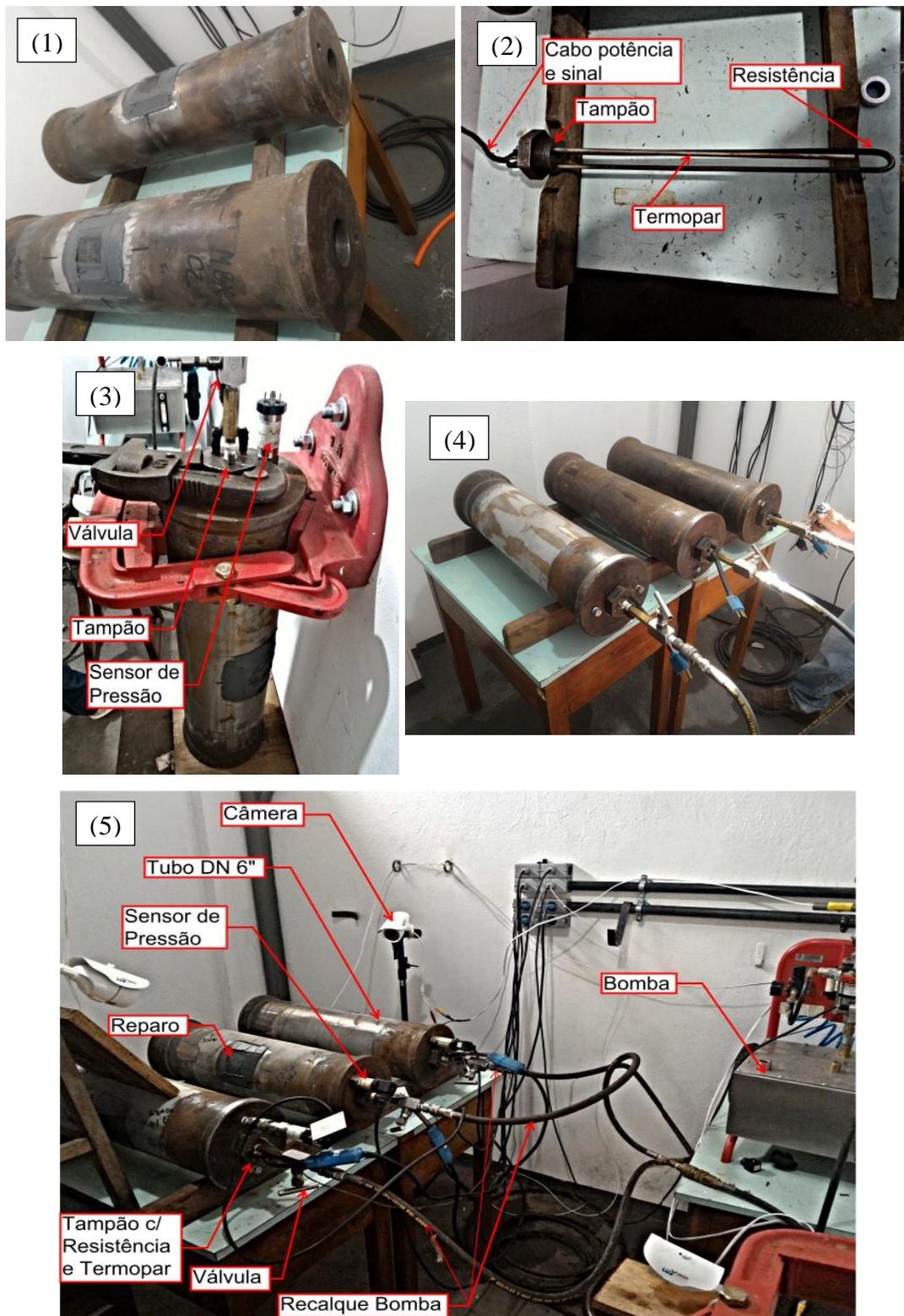
Tabela 12 - Plano de ensaios hidrostáticos.

Ensaio	Fluido interno	Tratamento superficial	Teste	Temperatura	Pressão	Nº de corpos de prova
1,2,3	Água	Lixada	Ruptura	Ambiente	P1 (1bar/s)	3
4,5,6		Ferr. MBX	Ruptura		P2 (1bar/s)	3
7,10,13		Lixada	Fluência	60°C	40bar (1bar/s)	3
8,11,14		Ferr. MBX	Fluência		40bar (1bar/s)	3
9,12,15		Jateada	Fluência		40bar (1bar/s)	3
Total:						15

Fonte: O autor, 2017.

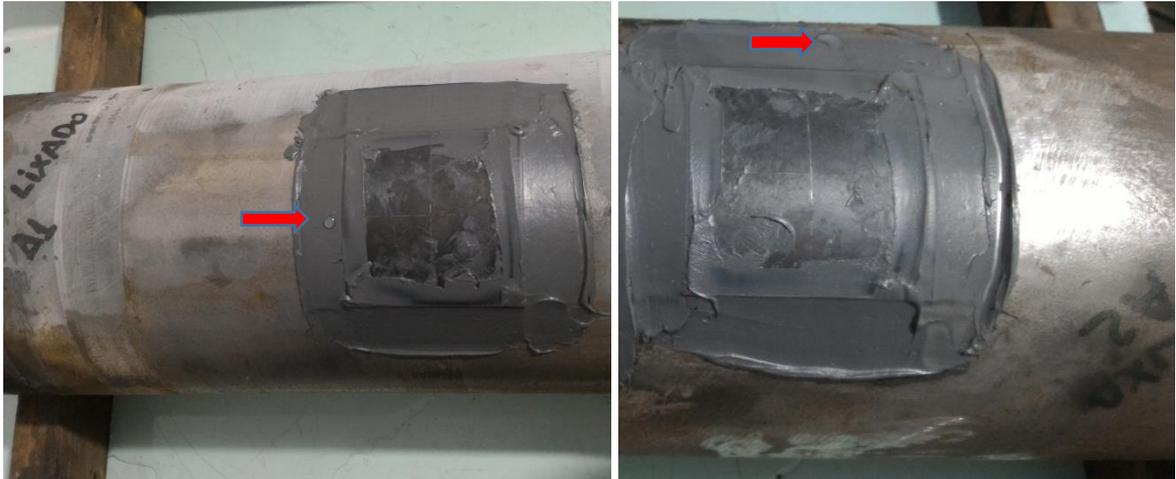
Os ensaios de ruptura consistiram em preencher os tubos com água na temperatura ambiente e aumentar a pressão interna gradativamente com taxa de 1bar/s (Norma ASTM D 1599:05) até que os reparos falhassem. Todos os reparos falharam, entretanto alguns vazamentos foram tão pequenos que só foram identificados pela queda suave de pressão (Figura 54), outros vazamentos foram identificados tanto pela queda de pressão, como por vazamento visível (Figura 55). Os resultados de pressão destes primeiros ensaios foram utilizados para definir a pressão de realização dos ensaios de fluência.

Figura 53 - Estrutura dos testes hidrostáticos: (1) Tubos, (2) Resistência e termopar, (3) Montagem de acessórios, (4) Conexão hidráulica e (5) Teste.



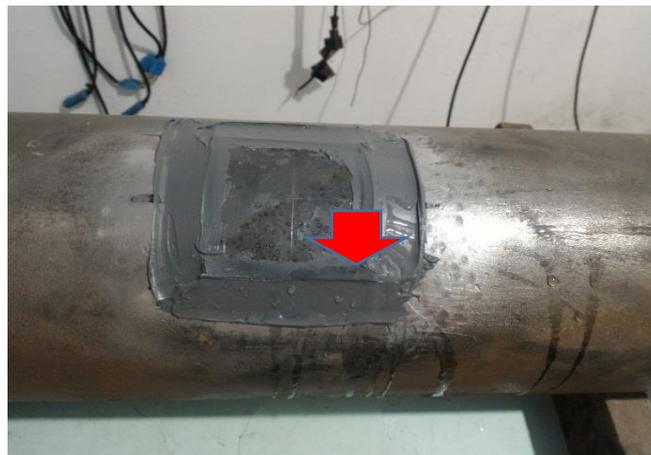
Fonte: O autor, 2017.

Figura 54 - Vazamentos pequenos em forma de gota com queda de pressão suave.



Fonte: O autor, 2017.

Figura 55 - Vazamento visível com queda de pressão acentuada.



Fonte: O autor, 2017.

Os ensaios de fluência consistiram em preencher os tubos com água e aquecendo-a até 60°C sem pressão por pelo menos 2 horas para que todo o fluido interno atingisse esta temperatura, que foi mantida até o final de cada ensaio. Em seguida houve a pressurização com taxa de 1bar/s (Norma ASTM D 1599:05) até a pressão de 40 bar, que também foi mantida até que os reparos falhassem.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Tratamentos superficiais na chapa

Todos os substratos que sofreram tratamentos superficiais e suas rugosidades foram medidas e plotadas nas tabelas a seguir.

Tabela 13 - Medidas de Rugosidade da chapa original, jateada sem Silano e jateada com Silano.

		R médio (μm)	Desvio Padrão
Rugosidade da chapa original (μm)	Ra	0,2	0,06
	Rq	0,25	0,08
Rugosidade da chapa Jateada sem Silano (μm)	Ra	9,10	0,75
	Rz	48,98	2,55
	Rq	10,98	0,90
	Rt	68,61	8,73
Rugosidade da chapa Jateada com Silano (μm)	Ra	8,94	1,15
	Rz	49,10	5,44
	Rq	11,13	1,41
	Rt	65,93	9,24

Fonte: O autor, 2017.

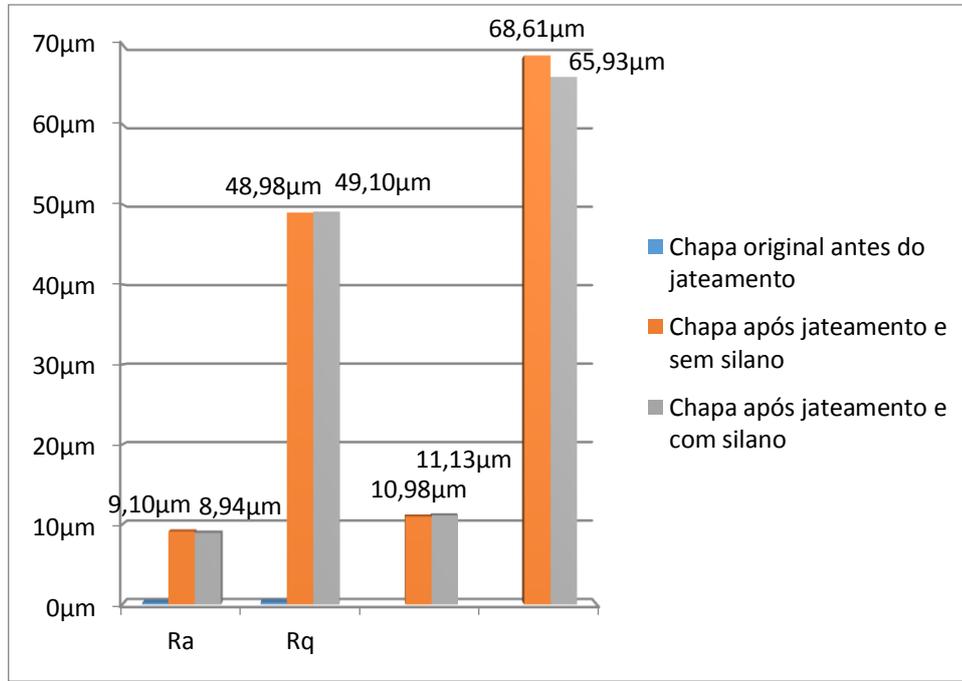
Tabela 14 - Comparativo entre a rugosidade da chapa jateada sem Silano e jateada com Silano.

			R médio (μm)	Desvio Padrão	% desvio
Comparação: R Sem Silano x R Com silano	Ra	Chapa s/ Silano	9,02	0,11	1,20%
		Chapa c/ Silano			
	Rz	Chapa s/ Silano	49,04	0,09	0,17%
		Chapa c/ Silano			
	Rq	Chapa s/ Silano	11,05	0,11	0,96%
		Chapa c/ Silano			
Rt	Chapa s/ Silano	67,27	1,90	2,82%	
	Chapa c/ Silano				

Fonte: O autor, 2017.

Foi constatado que o jateamento imprimiu uma rugosidade muito superior à rugosidade original da chapa, e a aplicação do Silano não influenciou na rugosidade da chapa (Figura 56).

Figura 56 - Gráfico de comparação entre as Rugosidades da chapa original antes do jateamento, após o jateamento e sem Silano, e após o jateamento com Silano.



Fonte: O autor, 2017.

3.2 Tratamentos superficiais no tubo

Todos os substratos que sofreram tratamentos superficiais e suas rugosidades foram medidas e plotadas nas tabelas a seguir.

Tabela 15 - Medidas de Rugosidade do tubo lixado.

		R médio (μm)	Desvio Padrão
Lixamento (Tubo A1) para o ensaio de ruptura	Ra	0,87	0,16
	Rz	5,72	0,82
	Rq	1,17	0,12
	Rt	8,24	0,56
Lixamento (Tubo A2) para o ensaio de ruptura	Ra	0,78	0,09
	Rz	5,43	1,17
	Rq	1,02	0,16
	Rt	7,71	2,82
Lixamento (Tubo A3) para o ensaio de ruptura	Ra	0,96	0,07
	Rz	5,96	1,04
	Rq	1,23	0,09
	Rt	7,77	0,92

Fonte: O autor, 2017.

Tabela 16 - Comparativo entre a Rugosidade do tubo lixado.

			R médio (μm)	Desvio Padrão	% desvio
Comparação: Lixamentos para o ensaio de ruptura	Ra	Tubo A1	0,87	0,090	10,40%
		Tubo A2			
		Tubo A3			
	Rz	Tubo A1	5,70	0,268	4,70%
		Tubo A2			
		Tubo A3			
	Rq	Tubo A1	1,14	0,109	9,53%
		Tubo A2			
		Tubo A3			
	Rt	Tubo A1	7,90	0,295	3,73%
		Tubo A2			
		Tubo A3			

Fonte: O autor, 2017.

Os dados comparativos entre as rugosidades mostra que houve repetitividade nos processos de lixamento (Tabela 16).

Tabela 17 - Medidas de Rugosidade dos tubos jateados.

		R médio (μm)	Desvio Padrão
Jateamento (Tubo D1) para o ensaio de fluência	Ra	8,10	1,18
	Rz	43,77	6,31
	Rq	9,98	1,49
	Rt	61,78	8,24
Jateamento (Tubo D2) para o ensaio de fluência	Ra	9,12	0,66
	Rz	50,91	6,48
	Rq	11,34	0,96
	Rt	68,49	15,02
Jateamento (Tubo D3) para o ensaio de fluência	Ra	8,00	0,40
	Rz	44,42	1,31
	Rq	10,02	0,30
	Rt	61,56	3,98

Fonte: O autor, 2017.

Tabela 18 - Comparação entre as medidas de Rugosidade dos tubos jateados para o ensaio de fluência.

			R Médio (μm)	Desvio Padrão	% desvio
Comparação: Jateamentos para o ensaio de fluência	Ra	Tubo D1	8,41	0,619	7,36%
		Tubo D2			
		Tubo D3			
	Rz	Tubo D1	46,37	3,947	8,51%
		Tubo D2			
		Tubo D3			
	Rq	Tubo D1	10,45	0,770	7,37%
		Tubo D2			
		Tubo D3			
	Rt	Tubo D1	63,94	3,938	6,16%
		Tubo D2			
		Tubo D3			

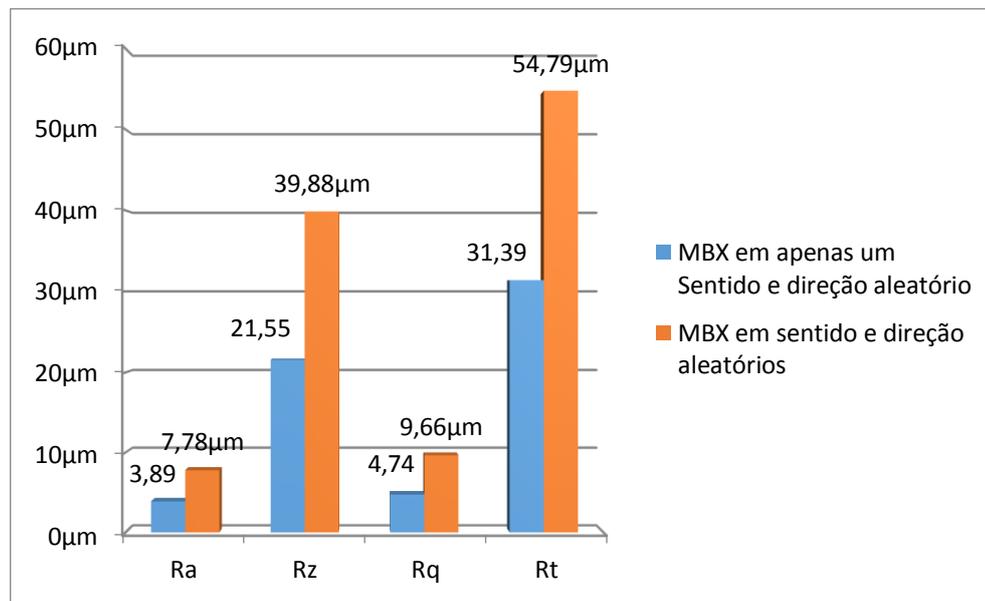
Fonte: O autor, 2017.

Tabela 19 - Comparação entre as medidas de Rugosidade dos tubos após uso da ferramenta MBX para avaliar o melhor procedimento/sentido/direção de uso da ferramenta MBX.

		R Médio (μm)	Desvio Padrão	Diferença
Comparação: MBX em apenas um sentido e direção x MBX em sentido e direção aleatório	Ra	Apenas um sentido e direção	3,89	100,21%
		Sentido e direção aleatório	7,78	
	Rz	Apenas um sentido e direção	21,55	85,06%
		Sentido e direção aleatório	39,88	
	Rq	Apenas um sentido e direção	4,74	103,58%
		Sentido e direção aleatório	9,66	
Rt	Apenas um sentido e direção	31,39	74,56%	
	Sentido e direção aleatório	54,79		

Fonte: O autor, 2017.

Figura 57 - Gráfico de comparação entre as medidas de Rugosidade dos tubos uso da ferramenta MBX em sentido e direção aleatório para o ensaio de ruptura.



Fonte: O autor, 2017.

O fornecedor do equipamento orienta que o ataque com a ferramenta MBX ocorra em apenas um sentido e direção, entretanto também foi realizado o ataque em sentido e direção aleatórios para comparação, e foi constatado que o ataque em sentido e direção aleatórios imprime maior rugosidade.

Tabela 20 - Medidas de Rugosidade dos tubos atacado com a ferramenta MBX para o ensaio de fluência.

		R Médio (μm)	Desvio Padrão
MBX (Tubo C1) em sentido e direção aleatório	Ra	5,13	0,49
	Rz	26,32	4,33
	Rq	6,41	0,78
	Rt	38,65	8,08
MBX (Tubo C2) em sentido e direção aleatório	Ra	5,02	0,29
	Rz	24,62	1,69
	Rq	6,11	0,43
	Rt	33,24	2,68
MBX (Tubo C3) em sentido e direção aleatório	Ra	4,23	0,23
	Rz	21,47	2,16
	Rq	5,17	0,33
	Rt	30,88	3,58

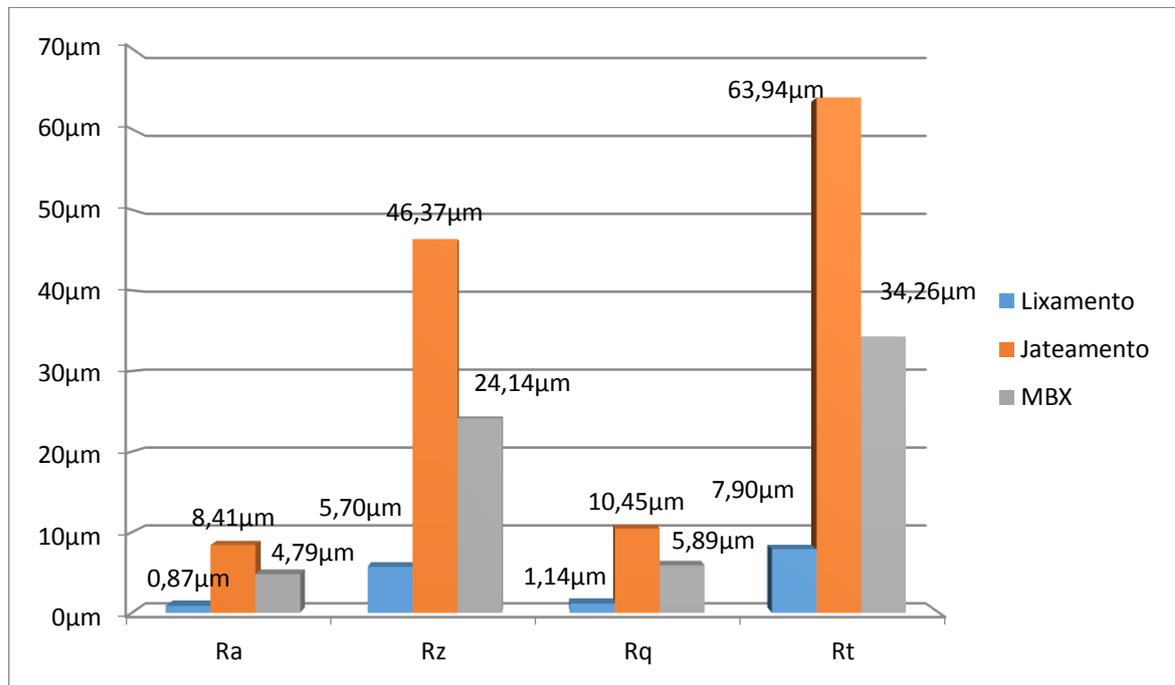
Fonte: O autor, 2017.

Tabela 21 - Comparação entre as medidas de Rugosidade dos tubos após ataque com a ferramenta MBX em sentido e direção aleatório para o ensaio de ruptura.

		R médio (μm)	Desvio Padrão	% desvio
Comparação: MBX	Ra	4,79	0,493	10,29%
	Rz	24,14	2,460	10,19%
	Rq	5,89	0,648	11,00%
	Rt	34,26	3,984	11,63%

Fonte: O autor, 2017.

Figura 58 - Gráfico de comparação entre as medidas de Rugosidade dos tubos após Lixamento, Jateamento e ataque com a ferramenta MBX em sentido e direção aleatórios.



Fonte: O autor, 2017.

Foi constatado que o jateamento imprimiu a maior rugosidade no tubo, seguido pelo tratamento com ferramenta MBX e por último o lixamento.

3.3 Ensaios hidrostáticos de ruptura

3.3.1 Tubos lixados

Os 2 primeiros ensaios de ruptura dos tubos tratados com lixa não foram registrados pelo sistema supervisor, entretanto os valores de pressão onde se identificou o vazamento e os valores máximos de pressão foram visualizados no painel do supervisor e estão na Tabela 22.

Tabela 22 - Ensaio de ruptura do tubo lixado.

DESCRIÇÃO	PRESSÃO (bar)
Identificação do vazamento do 1º ensaio	~200
Pressão máxima onde se decidiu encerrar o 1º ensaio	~310
Identificação do vazamento do 2º ensaio	~210
Pressão máxima onde se decidiu encerrar o 2º ensaio	~300

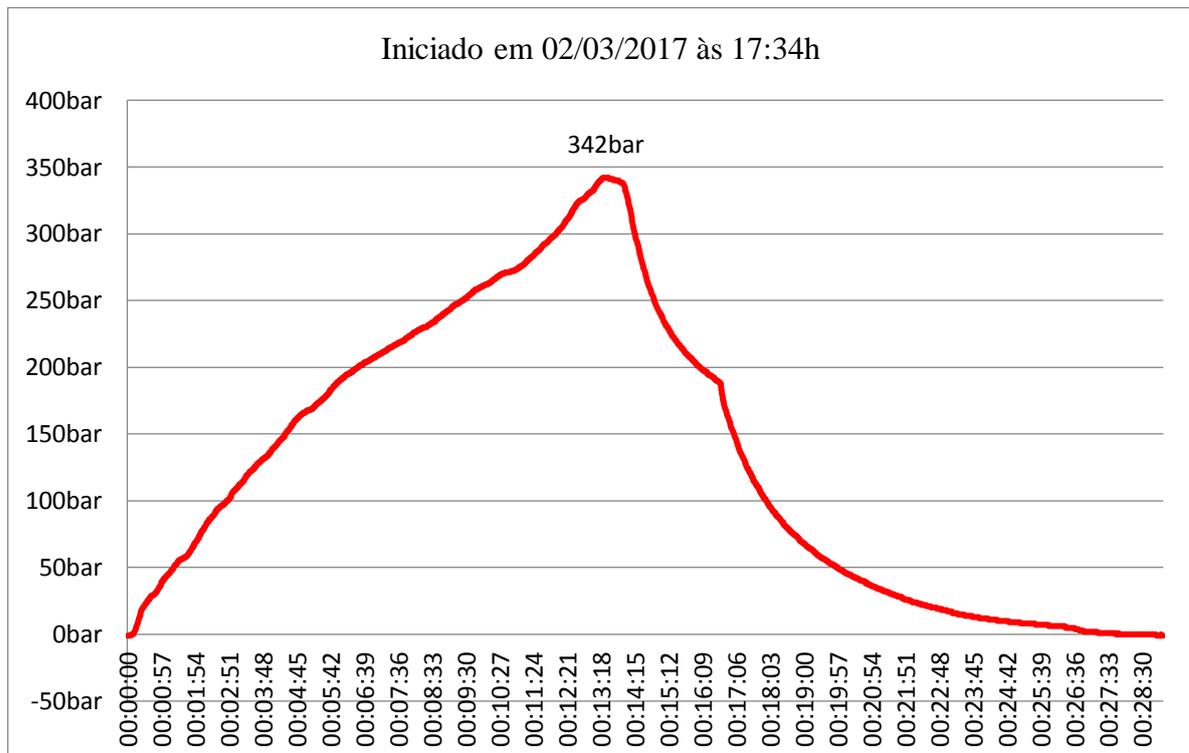
Fonte: O autor, 2017.

O segundo tubo já com o reparo danificado foi ensaiado novamente para se registrar a pressão máxima suportada pelo reparo, a pressão chegou a 342bar e o teste foi encerrado sem haver o descolamento total do reparo (Figura 59).

O terceiro tubo foi pressurizado até 144bar quando ocorreu o vazamento e o teste foi encerrado sem haver o descolamento total do reparo (Figura 60).

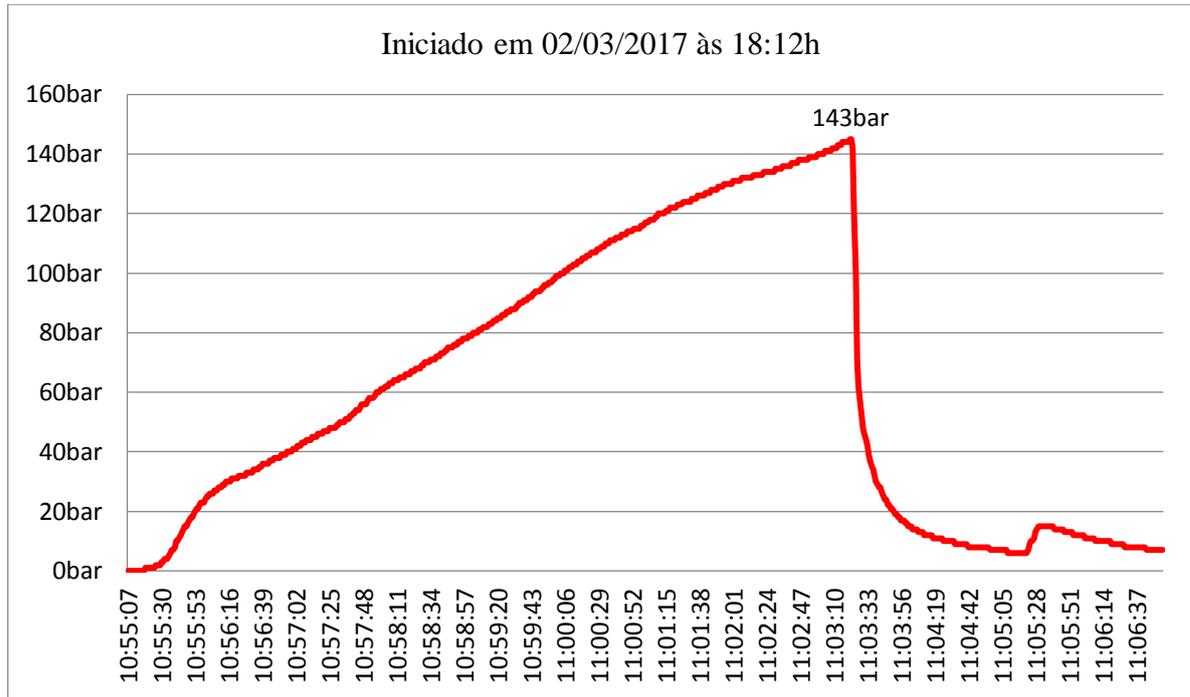
Após o fim dos registros, foi feito o descolamento manual forçado dos reparos, as figuras 61, 62 e 63 mostram os vazamentos e após o descolamento forçado.

Figura 59 - Gráfico do ensaio 2 de ruptura de um tubo tratado com lixamento.



Fonte: O autor, 2017.

Figura 60 - Gráfico do ensaio 3 de ruptura de um tubo tratado com lixamento.



Fonte: O autor, 2017.

Figura 61 - Falha do ensaio 1 do tubo lixado.



Fonte: O autor, 2017.

Figura 62 - Falha do ensaio 2 do tubo lixado.



Fonte: O autor, 2017.

Figura 63 - Falha do ensaio 3 do tubo lixado.



Fonte: O autor, 2017.

Avaliando a quantidade de adesivo presente na chapa após seu descolamento forçado, se identificou uma melhora na aderência entre o adesivo e a chapa comparado com o trabalho de SILVA (2015), que utilizou os mesmos materiais e métodos, mas não utilizou o Silano. É importante registrar que os vazamentos não foram catastróficos.

3.3.2 Tubos tratados com a ferramenta MBX

Os 3 ensaios de ruptura dos tubos tratados com ferramenta MBX ocorreram normalmente. O comportamento da pressão e os momentos exatos dos vazamentos foram registrados nas Figuras 64, 65 e 66, e Apêndice A.

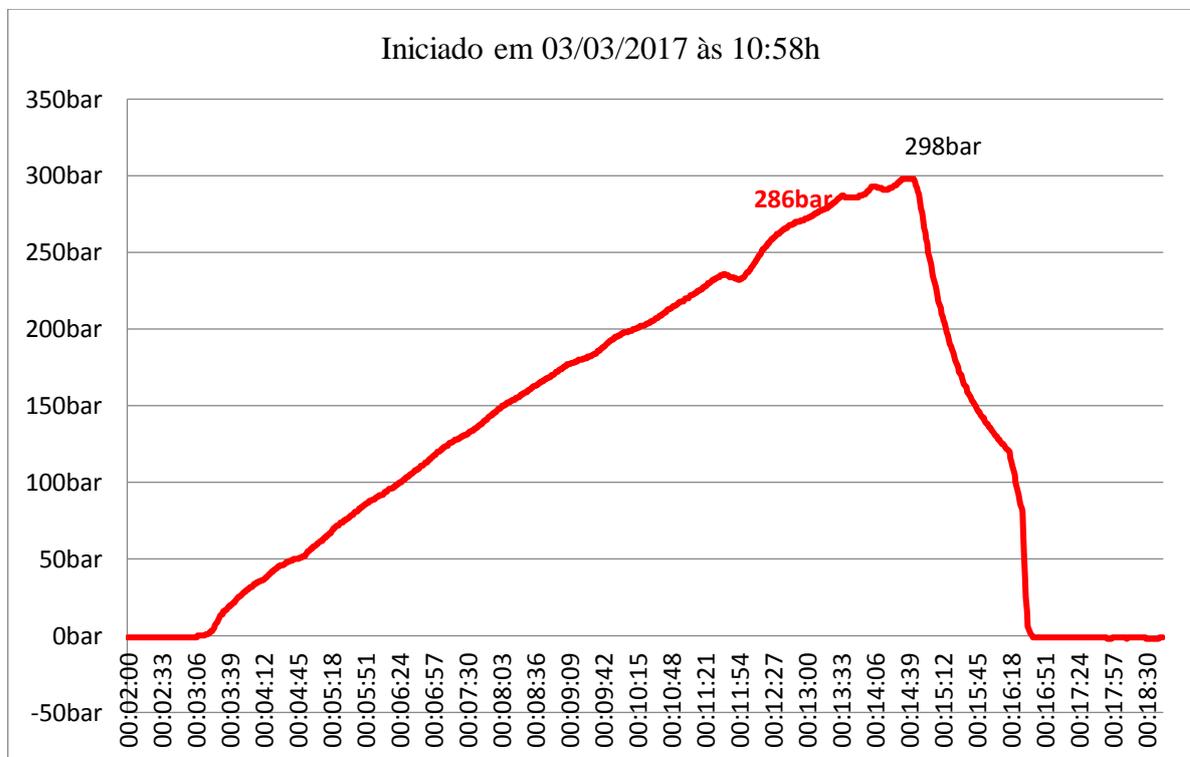
No tubo 1 o reparo vazou a 234bar, entretanto a pressurização continuou até 298bar onde teste foi encerrado sem haver o descolamento total do reparo (Figura 64).

No tubo 2 o reparo vazou a 186bar, entretanto a pressurização continuou até 199bar onde teste foi encerrado sem haver o descolamento total do reparo (Figura 65).

No tubo 3 o reparo vazou a 180bar, entretanto a pressurização continuou até 197bar onde teste foi encerrado sem haver o descolamento total do reparo (Figura 66).

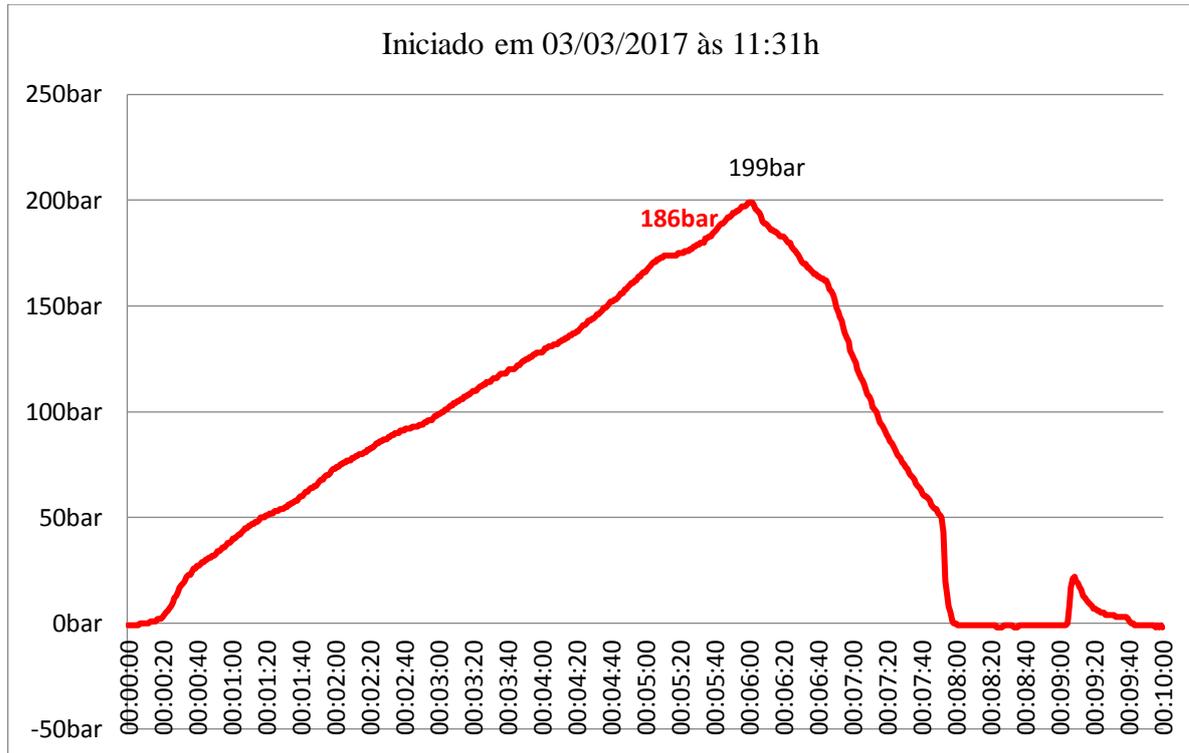
Após o fim dos registros, foi feito o descolamento manual forçado dos reparos, as figuras 67, 68 e 69 mostram os vazamentos e o descolamento forçado.

Figura 64 - Gráfico do ensaio 1 de ruptura de um tubos tratados com ferramenta MBX.



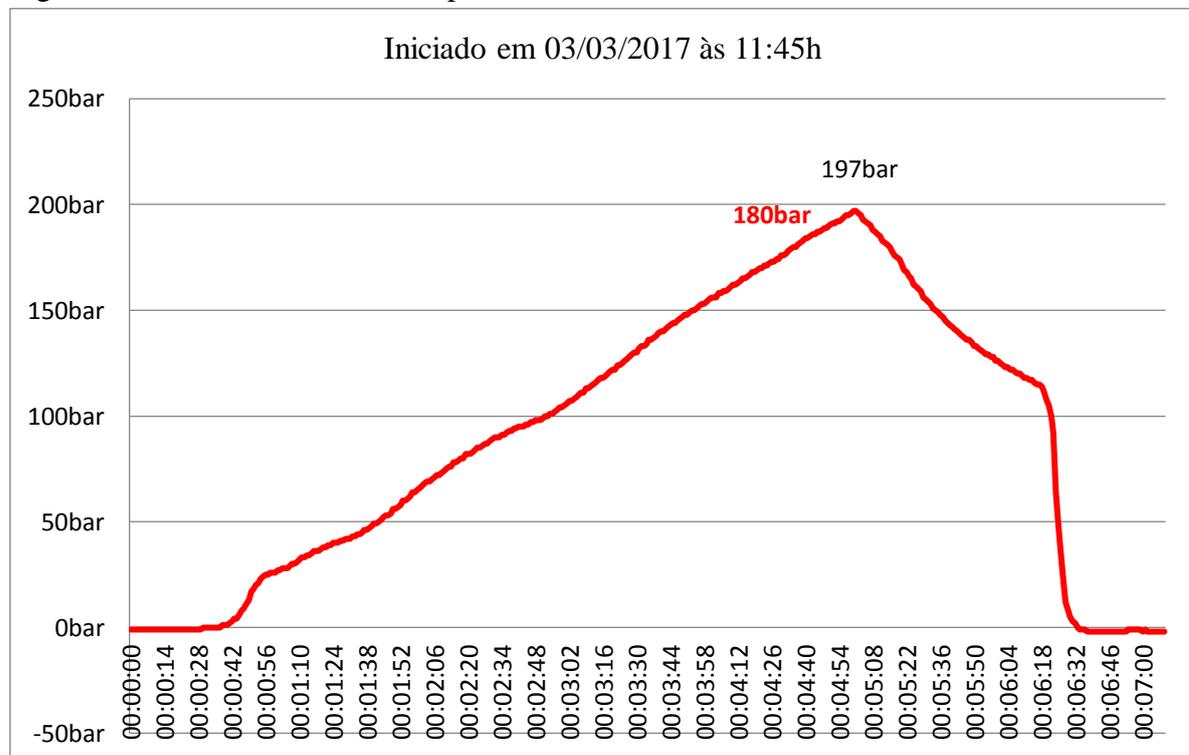
Fonte: O autor, 2017.

Figura 65 - Gráfico do ensaio 2 de ruptura de um tubos tratados com ferramenta MBX.



Fonte: O autor, 2017.

Figura 66 - Gráfico ensaio 3 de ruptura de um dos tubos tratados com ferramenta MBX.



Fonte: O autor, 2017.

Figura 67 - Falha do ensaio 1 do tubo tratado com ferramenta MBX.



Fonte: O autor, 2017.

Figura 68 - Falha do ensaio 2 do tubo tratado com ferramenta MBX



Fonte: O autor, 2017.

Figura 69 - Falha do ensaio 3 do tubo tratado com ferramenta MBX



Fonte: O autor, 2017.

Avaliando a quantidade de adesivo presente na chapa após seu descolamento forçado, se identificou uma melhora na aderência entre o adesivo e a chapa comparado com o trabalho de Silva (2015), que utilizou os mesmos materiais e métodos, mas não utilizou o Silano.

Avaliando o percurso dos vazamentos, nota-se que o vazamento percorreu um caminho longitudinal, isso pode ter ocorrido pela diferença entre as tensões de casca em tubos longitudinal e circunferencial. A tensão circunferencial é o dobro da tensão longitudinal.

3.4 Ensaios hidrostáticos de fluência

3.4.1 Tubos lixados

Foram planejados 3 ensaios de fluência em tubos com tratamento superficial de lixamento, onde o ensaio 1 ocorreu normalmente até o vazamento do reparo, o ensaio 2 ocorreu normalmente até ultrapassar 1000 horas de duração e foi interrompido sem vazamento, o ensaio 3 não foi iniciado até o fechamento deste trabalho, está programado para o dia 11/05/2017. Os parâmetros de cada ensaio estão descritos na tabela 23.

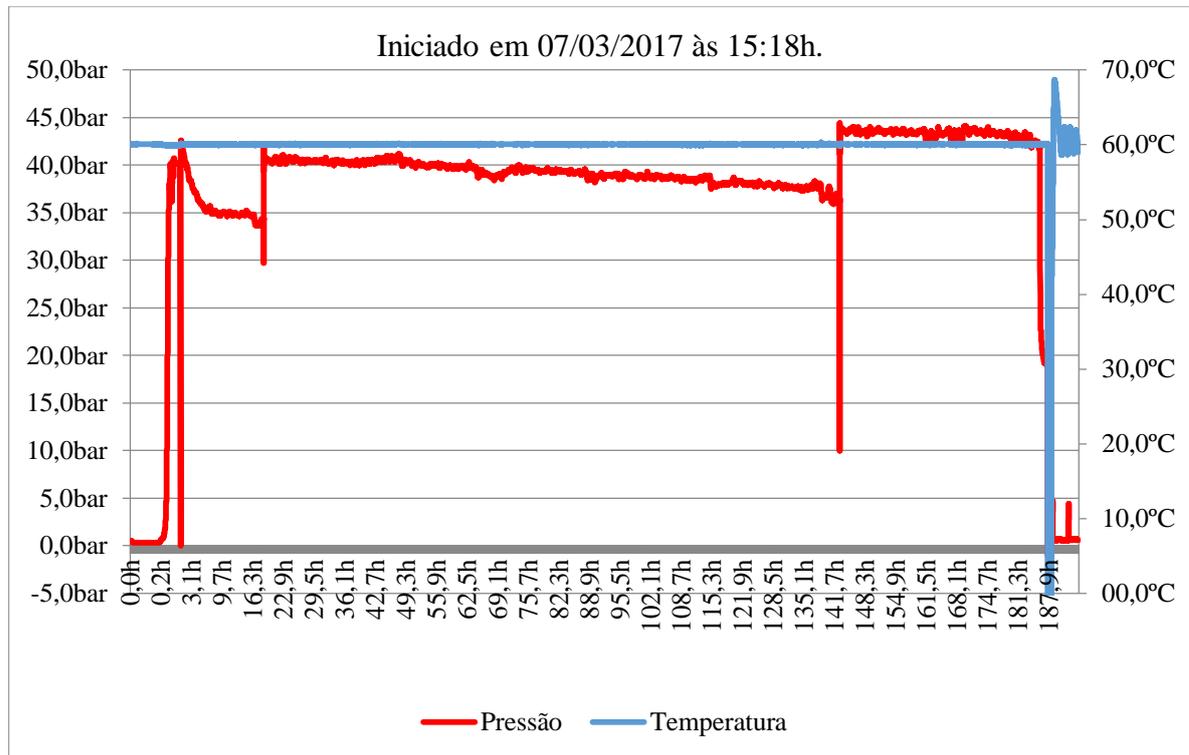
Tabela 23 - Ensaios de fluência do tubo lixado.

DESCRIÇÃO DO ENSAIO	ENSAIO 1	ENSAIO 2	ENSAIO 3
Início efetivo considerado no gráfico	0,1h	8,2h	Nota 1
Fim efetivo considerado no gráfico	183,1h	944,7h	Nota 1
Duração total	183,0h	936,5h	12h
Pressão média	36,83bar	36,1bar	28,9bar
Pico de Pressão máxima	44,4bar	60,8bar	40bar
Temperatura média	59,2°C	60,0°C	Nota 2
Pico de Temperatura máxima	68,7°C	64,7°C	Nota 2
Nota 1: O ensaio 3 foi descartado porque o vazamento do reparo ocorreu em um intervalo de tempo inferior a 24 horas.			

Fonte: O autor, 2017.

O ensaio 1 iniciou no dia 07/03/2017 às 15:18 horas e se encerrou após o vazamento no reparo. O gráfico da figura 70 mostra o comportamento do ensaio onde o reparo resistiu aos efeitos da fluência por 183 horas ou 7,6 dias com pressão média de 36,8bar e temperatura média de 59,2°C.

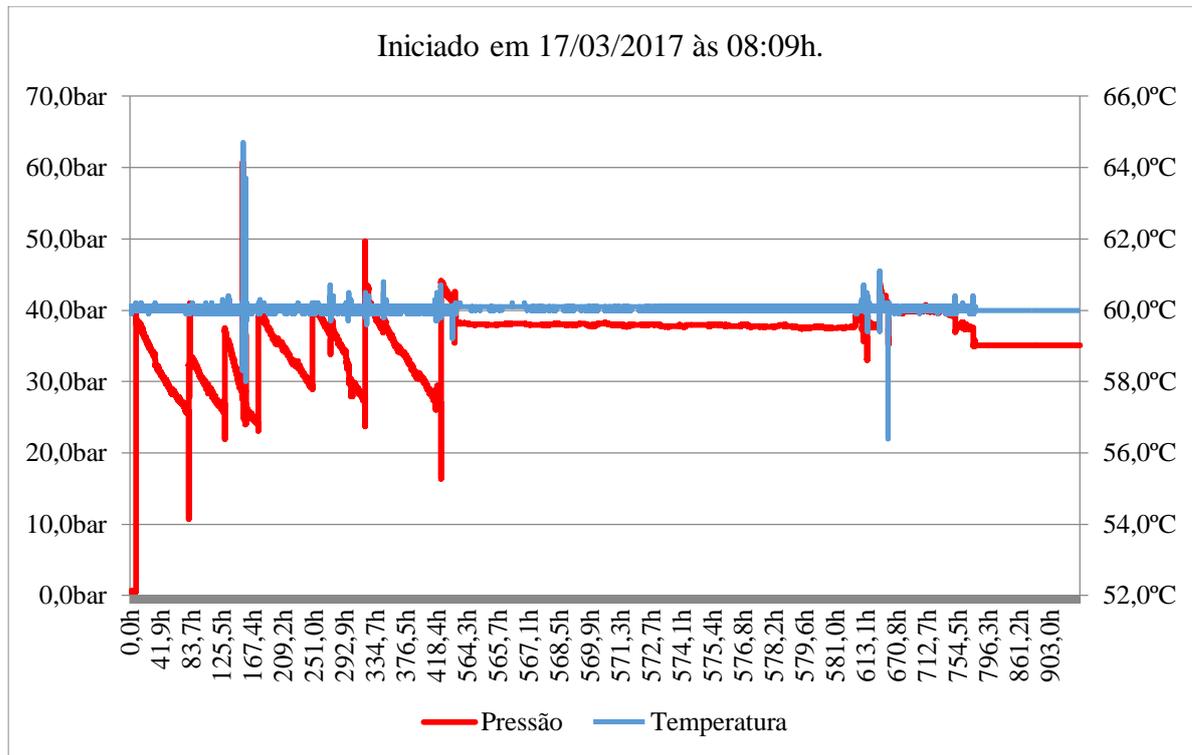
Figura 70 - Gráfico do ensaio 1 de fluência com superfície lixada com duração de 183 horas.



Fonte: O autor, 2017.

O ensaio 2 iniciou no dia 17/03/2017 às 08:09 horas e foi interrompido após 1000 horas ou 41,6 dias sem que houvesse vazamento no reparo. O gráfico da figura 70 mostra o comportamento do ensaio onde o reparo resistiu aos efeitos da fluência por mais de 1000 horas ou 41,2 dias com pressão média de 36,1bar e temperatura média de 60,0°C. A oscilação de pressão e temperatura apresentada no gráfico figura 71, entre 0 e 418,4 horas, foi causada por vazamentos nos anéis de vedação das conexões hidráulicas, sem vazamento no reparo.

Figura 71 - Gráfico do ensaio 2 de fluência com superfície lixada.



Fonte: O autor, 2017.

O ensaio 3 iniciou no dia 03/05/2017 às 08:57 horas e foi interrompido após 21,3 horas ou 0,89 dias sem que houvesse vazamento no reparo, entretanto o ensaio apresentou problemas no registro da temperatura não podendo ser utilizado para qualquer conclusão de ensaio de fluência.

3.4.2 Tubos tratados com a ferramenta MBX

Foram planejados 3 ensaios de fluência em tubos com tratamento superficial com a ferramenta MBX, onde o ensaio 1 ocorreu normalmente até o vazamento do reparo, o ensaio 2 apresentou grande instabilidade de pressão e temperatura até o vazamento do reparo, o ensaio 3 apresentou queda suave de pressão desde o início até o vazamento do reparo. Os parâmetros de cada ensaio estão descritos na tabela 24.

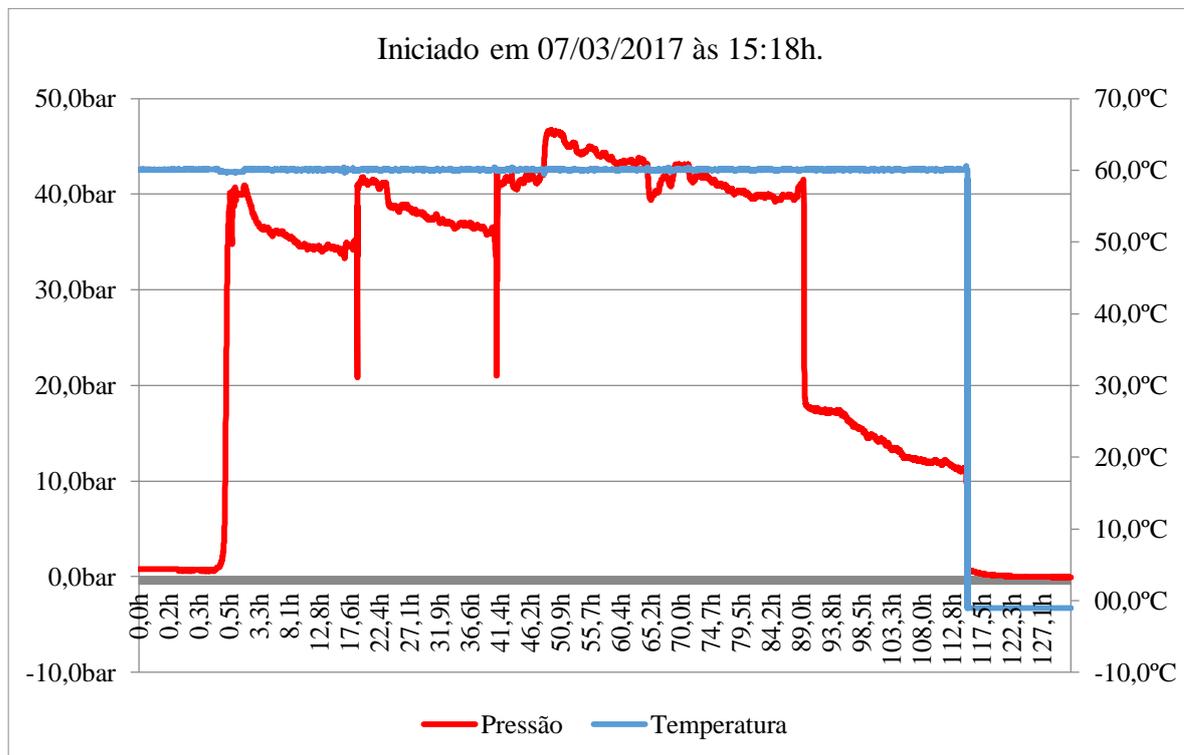
Tabela 24 - Ensaios de fluência do tubo tratado com a ferramenta MBX.

DESCRIÇÃO DO ENSAIO	ENSAIO 1	ENSAIO 2	ENSAIO 3
Início efetivo considerado no gráfico	0,4h	0,0h	0,2h
Fim efetivo considerado no gráfico	89,4h	96,5h	52,3h
Duração total	89,0h	96,5h	52,1h
Pressão média	38,9bar	12,1bar	29,7bar
Pressão máxima	46,7bar	83,4bar	40,0bar
Temperatura média	60,0°C	60,0°C	60,0°C
Temperatura máxima	60,6°C	62,4°C	60,0°C

Fonte: O autor, 2017.

O ensaio 1 iniciou no dia 07/03/2017 às 15:18 horas e se encerrou após o vazamento no reparo. O gráfico da figura 72 mostra o comportamento do ensaio onde o reparo resistiu aos efeitos da fluência por 89 horas ou 3,7 dias com pressão média de 38,9bar e temperatura média de 60,0°C.

Figura 72 - Gráfico do ensaio 1 de fluência com superfície tratada com a ferramenta MBX.

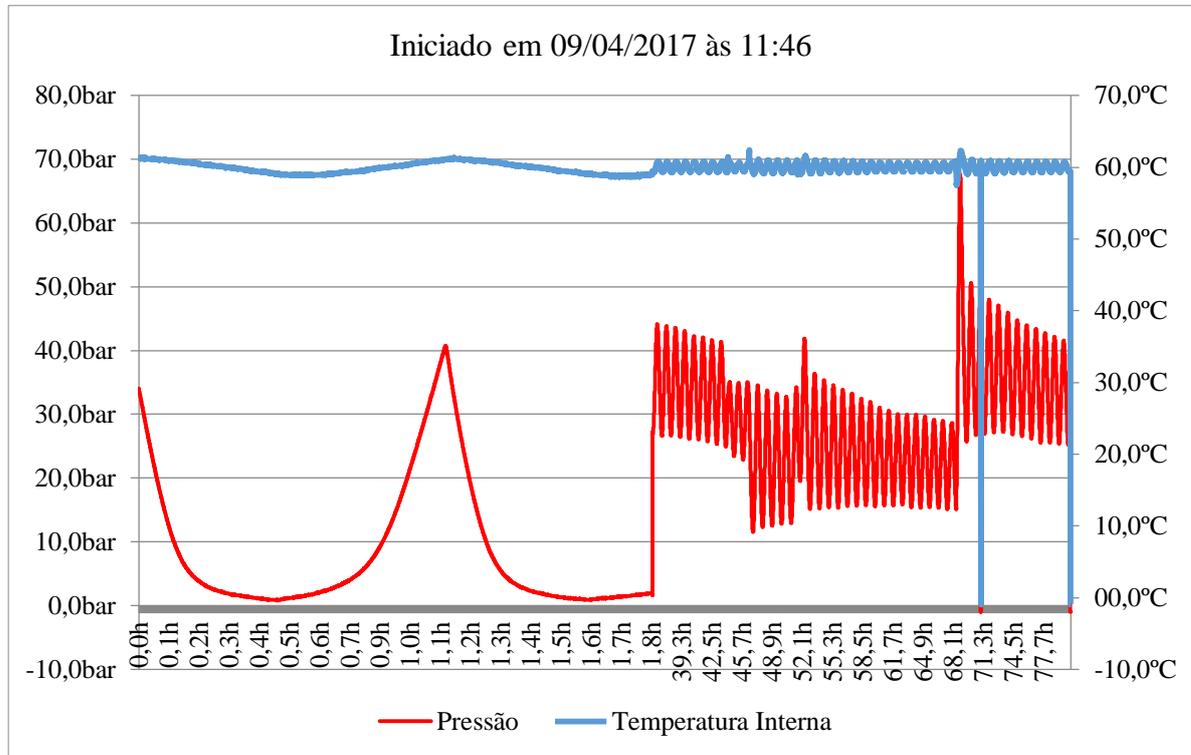


Fonte: O autor, 2017.

O ensaio 2 iniciou no dia 09/03/2017 às 11:46 horas, apresentou grande oscilação de pressão e temperatura, e se encerrou após o vazamento no reparo. O gráfico da figura 73 mostra

o comportamento do ensaio, onde o reparo resistiu aos efeitos da fluência por 96,5 horas ou 4 dias com pressão média de 12,1bar e temperatura média de 60,0°C.

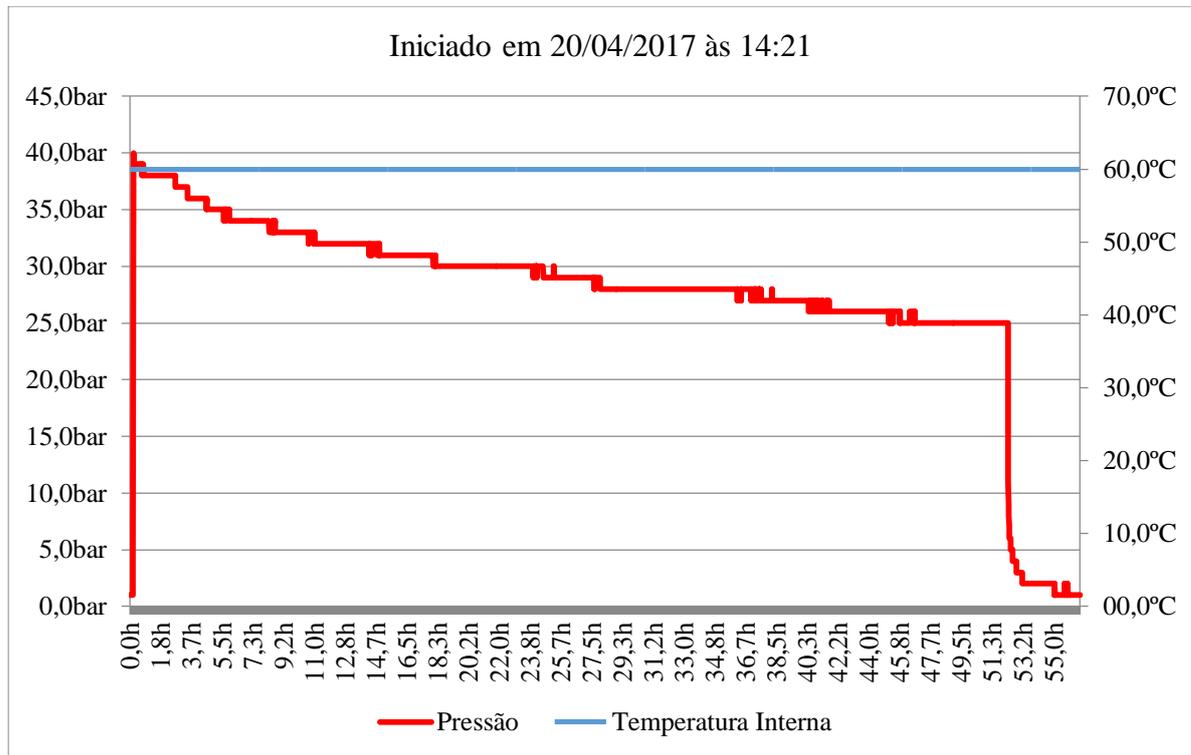
Figura 73 - Gráfico do ensaio 2 de fluência com superfície tratada com a ferramenta MBX.



Fonte: O autor, 2017.

O ensaio 3 iniciou no dia em 20/04/2017 às 14:21 horas, apresentou queda suave e contínua de pressão desde o início e se encerrou após o vazamento no reparo. O gráfico da figura 74 mostra o comportamento do ensaio, onde o reparo resistiu aos efeitos da fluência por 52,1 horas ou 2,2 dias com pressão média de 29,7bar e temperatura média de 60,0°C.

Figura 74 - Gráfico do ensaio 3 de fluência com superfície tratada com a ferramenta MBX.



Fonte: O autor, 2017.

3.4.3 Tubos tratados com jateamento

Foram planejados 3 ensaios de fluência em tubos com tratamento superficial de jateamento, onde o ensaio 1 ocorreu o vazamento do reparo com menos de 24 horas de teste não podendo ser caracterizado como fluência e foi descartado, o ensaio 2 ocorreu normalmente até ultrapassar 1000 horas de duração e foi interrompido sem vazamento, o ensaio 3 não foi iniciado até o fechamento deste trabalho, está programado para o dia 25/04/2017. Os parâmetros de cada ensaio estão descritos na tabela 25.

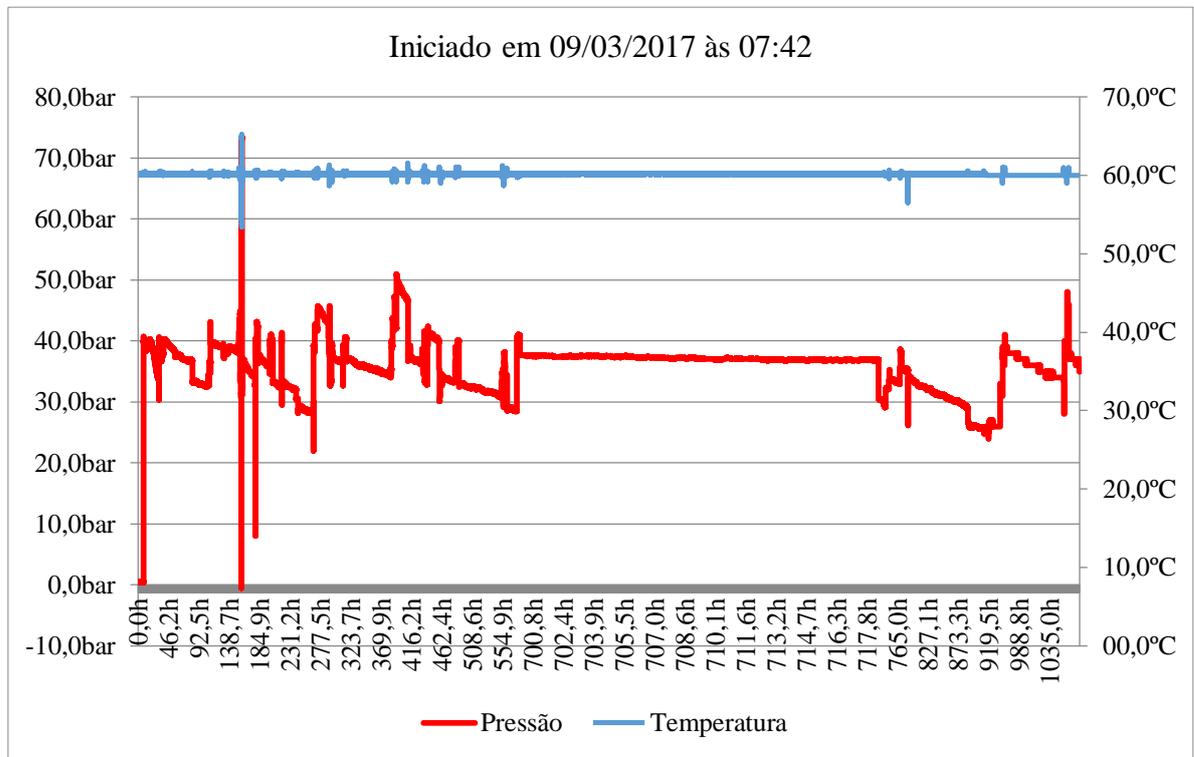
Tabela 25 - Ensaio de fluência do tubo jateado.

DESCRIÇÃO DO ENSAIO	ENSAIO 1	ENSAIO 2	ENSAIO 3
Início efetivo considerado no gráfico	Nota 1	7,7h	Nota 1
Fim efetivo considerado no gráfico		1081,1h	
Duração total		1073,4h	
Pressão média		35,9bar	
Pressão máxima		73,5bar	
Temperatura média		60,2°C	
Temperatura máxima		65,2°C	
Nota 1: O ensaio 1 foi descartado porque o vazamento do reparo ocorreu em um intervalo de tempo inferior a 24 horas. O ensaio 3 foi descartado porque o supervisor não registrou a pressão e temperatura na maior parte do ensaio.			

Fonte: O autor, 2017.

O ensaio 2 iniciou no dia 09/03/2017 às 07:42 horas e foi interrompido após 1000 horas ou 41,6 dias sem que houvesse vazamento no reparo. O gráfico da figura 75 mostra o comportamento do ensaio onde o reparo resistiu aos efeitos da fluência por mais de 1000 horas ou 41,6 dias com pressão média de 35,9bar e temperatura média de 60,2°C.

Figura 75 - Gráfico do ensaio 2 de fluência com superfície tratada com por jateamento.



Fonte: O autor, 2017.

CONCLUSÃO

Os tratamentos superficiais de Lixamento, ferramenta MBX e Jateamento produzem diferentes perfis de rugosidade. O Jateamento com granalha G40 produz uma rugosidade de aproximadamente 2 vezes a produzida pela ferramenta MBX, e aproximadamente 8 vezes a produzida pelo Lixamento com lixa N°36.

O Silano aplicado na chapa não altera o nível de rugosidade da chapa, mas melhora o desempenho da colagem do NVT na superfície metálica da chapa comparado com o trabalho de SILVA (2015) que não utilizou o Silano.

O procedimento do uso da ferramenta MBX para produzir rugosidade é influenciado pelo sentido de passagem da ferramenta pela superfície, onde o ataque no sentido aleatório produz maior rugosidade que o ataque em apenas um sentido e em duas direções que é metodologia informada pelo fabricante do equipamento.

Os reparos em superfícies tratadas por lixamento que são aplicados às tubulações de 152,4mm (6 polegadas) com danos-furos de 10mm de diâmetro, com superfícies tratadas com lixa N°36 e com cura do adesivo NVT superior a 24 horas são capazes de resistir a pressões internas instantâneas de 144bar, que foi a menor pressão suportada pelo reparo até o vazamento nos testes hidrostáticos de ruptura. Estes reparos também são capazes de resistir aos efeitos da fluência de pelo menos 183 horas ou 7,6 dias com pressão média de 36,8bar e temperatura média de 59,2°C.

Os reparos em superfícies tratadas pela ferramenta MBX que são aplicados às tubulações de 152,4mm (6 polegadas) com danos-furos de 10mm de diâmetro, com superfícies tratadas com ferramenta MBX e com cura do adesivo NVT superior a 24 horas são capazes de resistir a pressões internas instantâneas de 180bar, que foi a menor pressão suportada pelo reparo até o vazamento nos testes hidrostáticos de ruptura. Estes reparos também são capazes de resistir aos efeitos da fluência de pelo menos 52,1 horas ou 2,2 dias com pressão média de 29,7bar e temperatura média de 60,0°C.

Os reparos em superfícies tratadas por jateamento que são aplicados às tubulações de 152,4mm (6 polegadas) com danos-furos de 10mm de diâmetro, com superfícies tratadas com ferramenta MBX e com cura do adesivo NVT superior a 24 horas são capazes de resistir a pressões internas instantâneas de 180bar, que foi a menor pressão suportada pelo reparo até o vazamento nos testes hidrostáticos de ruptura. Estes reparos também são capazes de resistir aos

efeitos da fluência de pelo menos 1000 horas ou 41,6 dias com pressão média de 35,9bar e temperatura média de 60,2°C.

O modo de falha apresentado nos reparos desenvolvidos neste trabalho não é catastrófico, ou seja, não há descolamento completo e instantâneo da chapa, garantindo segurança na utilização em campo.

Há maior incidência de vazamentos na região longitudinal do tubo, que corrobora com a teoria de tensões em tubos com paredes finas, onde as maiores tensões são no sentido circunferencial que provocam rasgos no sentido longitudinal.

Apesar da oscilação dos valores encontrados nos ensaios de fluência para as superfícies tratadas com lixamento e jateamento, ambos os tratamentos tiveram corpos de prova reparados que resistiram mais de 1.000 horas sobre fluência, o que sugere que novos ensaios devam ser realizados para uma análise estatística de confiabilidade.

TRABALHOS PROPOSTOS

Estudar a influência do método de aplicação do adesivo da junta (aplicação no tubo e chapa, Aplicação apenas no tubo e Aplicação apenas na chapa);

Avaliar qual o mecanismo de falha da junta através de ensaios não destrutivos.

Avaliar o reparo de tubos com outras geometrias de defeito.

Avaliar o comportamento do reparo usando fita filamentosa sobre ele.

Testar novos corpos de prova sobre fluência para o estudo da confiabilidade dos reparos.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 4287:2002: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade, 2002.

ABREU, W. M., *Estudo da Temperatura de Transição Vítrea (T_g) em Vidros Orgânicos: Mel, Corante Caramelo e Frutose*, Tese de Doutorado, REDEMAT, UFOP - CETEC - UEMG, Ouro Preto, MG, 2008.

ALVES, T. M. J.; SOARES, M. A. Definitive Repair of Subsea Pipelines by using Metallic Sleeve and Epoxy Resin. In: *JORNADA LATINOAMERICANA OPERADORES DE MONOBOYAS, Cartagena de Indias*, 2006.

ALVES, M. C. S.; GONÇALVES, M. T. T.; VARASQUIM, F. M. F. A.; SANTIAGO, L. F. F.; VARANDA, L. D.; BIANCHI E. C., Análise da influência da velocidade de corte, da granulometria da lixa e da pressão específica de corte no processo de lixamento. In: VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, Campina Grande, PB, 2010.

ALVES, M. L. *Reconhecimento da rugosidade em imagens monocromáticas por meio de análise de textura*. Tese (Doutorado em Engenharia mecânica), Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2011.

BS EN ISO 24817:2015, Composite Repairs for Pipework - Qualification and Design, Installation, Testing and Inspection, 2015.

CALLISTER, Jr, WILLIAM D., *Materials science and engineering an introduction*. 7th edition. New York, NY: John Wiley, 2007.

DIAS, R. S., *Curso de Padrão de Integridade de Dutos*, Universidade Petrobras, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

DIN 4768:1999, Determination of values of surface roughness parameters Ra, Rz, Rmax using electrical contact (stylus) instruments; concepts and measuring conditions, 1999.

DOIDJO, M. R. T.; BELEC, L.; ARAGON, E.; JOLIFF, Y.; LANARDE, L.; MEYER, M.; BONNAUDET, M.; PERRIN, F. X., Influence of silane-based treatment on adherence and wet durability of fusion bonded epoxy/steel joints, *Progress in Organic Coatings Journal*, Elsevier, Science Direct, 2013.

FERREIRA, F. L.Q.; SILVA, G. G.; CASTRO, V. G.; BORTOLOTTI, J.; ROCHA G. C. *Caracterização de resinas epóxi aditivadas com nanotubos de carbono para aplicação na Petrobras*. CTNANOTUBOS - Belo Horizonte, MG, 2016.

FOX, H.W.; ZISMAN, W.A. The Spreading of Liquids on Low Energy Surfaces. I. Polytetrafluoroethylene. *Journal of Colloid Science*, v. 5, Versão 6, 1950, p.p 514 -531.

ISLAMA, M.S., TONGA, L.; FALZONB, P.J. Influence of metal surface preparation on its surface profile, contact angle, surface energy and adhesion with glass fibre prepreg. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2014.

KINLOCH, A. J., *Adhesion and Adhesives*. New York: Chapman and Hall, 1987. pp. 18-100.

PAREDES, R. S. C. *Aplicações Gerais do Processo de Jateamento*, Universidade Federal do Paraná - Departamento de Engenharia Mecânica - Laboratório de aspensão térmica e soldagem especiais, Curitiba, PR.

PEREIRA L. R. *Dossiê Técnico*. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC) - Belo horizonte, MG, 2007.

PERRUT, V. A., *Análise de reparo de tubos com defeito transpassante por meio de materiais compósitos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

PETROBRAS, N-2737 Rev. A - Manutenção de oleoduto e gasoduto terrestre, 2012.

QUEIROZ, R. A., *Estudo do comportamento em fluência de juntas metálicas coladas*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro - Centro de Tecnologia e Ciências - Instituto Politécnico, Nova Friburgo, RJ, 2013.

PHAM P., *The University of Utah in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Theoretical studies of mechanisms of epoxy curing systems*. Department of chemistry - The University of Utah, Utah, U.S.A. 2011. p. 11.

QUINI, J. G., *Histórico e conceitos básicos dos adesivos*. Relatório de estágio do Curso Técnico Químico - Senai Mário Amato (CENATEC) - São Paulo, 1998.

RECABARREN, R. A. P. *Modelação da força de adesão em válvulas de compressores considerando fenômenos interfaciais na película de óleo lubrificante*. Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2014.

ROHEM, N. R. F.; SAMPAIO, E. M.; QUEIROZ, R. A.; CORTINES, V. J., Desenvolvimento e qualificação de compósitos laminados de Matriz polimérica para o reparo de dutos e tubulações Industriais. In: 19º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, CBECiMat, Campos do Jordão, SP, 2010.

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

SAMPAIO, E. M., *Um Modelo de Dano para Juntas Coladas*, Tese de D.Sc., COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 1998.

SAMPAIO, E. M.; GARCIA, F. G.; LIMAVERDE, A. M.; SILVA, A. H. M. F. T.; PERRUT V. A., Aderência de juntas metálicas de cisalhamento coladas com adesivos epoxídicos de baixa e alta viscosidade. In: CBECIMAT, Foz do Iguaçu, PR, 2006.

SHIELDS, John. *Adesives handbook*. 3rd ed. Butterworth & Co. 1984.

SILAEX. Disponível em: <http://www.silaex.com.br/agentes%20de%20cura.htm>. Acesso em: 25 jan. 2017.

SILVA, L. F. M.; MAGALHÃES, A. M. M., *Juntas Adesivas Estruturais*, Publindustria, 2007.

PETRIE, E.W. *Handbook of Adhesives and Sealants*. 2. ed. New York, N.Y., McGraw-Hill, 2007.

SILVA, R. H. *Estudo do fator de forma de área em reparo com chapa colada em tubulações com furo*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro - Centro de Tecnologia e Ciências - Instituto Politécnico, Nova Friburgo, RJ, 2015.

SILVA, R. H.; SAMPAIO, E. M.; ROHEM, N. R.; QUEIROZ, G. A. Estudo da resistência à pressão hidrostática de reparo com chapa colada em tubulações com furo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS - CBCIMAT, Natal, RN, 2016.

SPONGE-JET MANUAL, Sponge-jet INC, 2003.

SSPC-SP1:2004, Solvent Cleaning, Surface Preparation Specifications, Surface Preparation Commentary for Steel and Concrete Substrates, 2004.

UNICAMP. Disponível em:

<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/graduacao/EM335/rugosidade.htm>. Acesso em: 10 jan. 2017.

WEG Tintas, Manual de Preparação de Superfície, 2017.

APÊNDICE A

Tabela A.1 - Rugosidade original da chapa.

			Medição 1 (μm)	Medição 2 (μm)	Medição 3 (μm)	Medição 4 (μm)	R médio (μm)	Desvio Padrão
Rugosidade da chapa original	Ra	Chapa1	0,18	0,16	0,18	0,27	0,20	0,06
		Chapa2	0,16	0,16	0,18	0,17		
		Chapa3	0,37	0,17	0,13	0,13		
		Chapa4	0,17	0,17	0,17	0,23		
		Chapa5	0,21	0,21	0,23	0,25		
	Rq	Chapa1	0,23	0,23	0,23	0,37	0,25	0,08
		Chapa2	0,21	0,21	0,22	0,22		
		Chapa3	0,49	0,22	0,16	0,17		
		Chapa4	0,2	0,22	0,21	0,31		
		Chapa5	0,26	0,26	0,29	0,31		

Fonte: O autor, 2017.

Tabela A.2 - Rugosidade da chapa Jateada antes de aplicar o Silano.

			Medição 1 (μm)	Medição 2 (μm)	Medição 3 (μm)	R médio (μm)	Desvio Padrão
Rugosidade da chapa Jateada sem Silano	Ra	Chapa 1	8,01	9,81	7,89	9,10	0,75
		Chapa2	8,87	9,61	9,22		
		Chapa3	9,87	8,89	9,7		
	Rz	Chapa 1	46,38	48,14	44,97	48,98	2,55
		Chapa2	49,43	53,49	47,55		
		Chapa3	50,83	50,32	49,69		
	Rq	Chapa1	10	9,81	10,03	10,98	0,90
		Chapa2	11,06	11,88	11,38		
		Chapa3	12,2	10,61	11,82		
	Rt	Chapa1	63,66	56,11	68,37	68,61	8,73
		Chapa2	60,83	77,16	63,04		
		Chapa3	73,26	71,03	84		

Fonte: O autor, 2017.

Tabela A.3 - Rugosidade da chapa Jateada após de aplicar o Silano.

			Medição 1 (μm)	Medição 2 (μm)	Medição 3 (μm)	R médio (μm)	Desvio Padrão
Rugosidade da chapa Jateada com Silano	Ra	Chapa1	10,12	8,91	9,24	8,94	1,15
		Chapa2	6,98	8,18	7,80		
		Chapa3	10,71	9,28	9,27		
	Rz	Chapa1	58,67	48,59	50,99	49,10	5,44
		Chapa2	39,61	44,77	45,50		
		Chapa3	51,81	49,37	52,58		
	Rq	Chapa1	12,75	10,82	11,58	11,13	1,41
		Chapa2	8,73	9,90	9,82		
		Chapa3	12,88	11,89	11,77		
	Rt	Chapa1	77,55	58,68	70,91	65,93	9,24
		Chapa2	47,38	64,47	69,25		
		Chapa3	76,33	63,81	64,95		

Fonte: O autor, 2017.

Tabela A.4 - Comparação entre as Rugosidades da chapa Jateada antes e depois de aplicar o Silano.

			Rs médios (μm)	R médio (μm)	Desvio Padrão	% desvio
Comparação: R Sem Silano X R Com Silano	Ra	Chapa s/ Silano	9,10	9,02	0,11	1,20%
		Chapa c/ Silano	8,94			
	Rq	Chapa s/ Silano	10,98	11,05	0,11	0,96%
		Chapa c/ Silano	11,13			

Fonte: O autor, 2017.

Tabela A.5 - Rugosidade do tubo (1) após o Lixamento para o ensaio de ruptura.

		Medição 1 (μm)	Medição 2 (μm)	Medição 3 (μm)	Medição 4 (μm)	R médio (μm)	Desvio Padrão
Lixamento (Tubo A1) para o ensaio de ruptura	Ra	0,74	0,92	0,74	1,07	0,87	0,16
	Rz	6,48	6,1	4,58	5,71	5,72	0,82
	Rq	1,17	1,17	1,01	1,31	1,17	0,12
	Rt	8,34	8,89	8,21	7,53	8,24	0,56

Fonte: O autor, 2017.

Tabela A.6 - Rugosidade do tubo (2) após o Lixamento para o ensaio de ruptura.

		Medição 1 (μm)	Medição 2 (μm)	Medição 3 (μm)	Medição 4 (μm)	R médio (μm)	Desvio Padrão
Lixamento (Tubo A2) para o ensaio de ruptura	Ra	0,66	0,79	0,78	0,87	0,78	0,09
	Rz	4,35	5,45	4,87	7,04	5,43	1,17
	Rq	0,84	1,02	0,99	1,23	1,02	0,16
	Rt	5,15	7,47	6,52	11,68	7,71	2,82

Fonte: O autor, 2017.

Tabela A.7 - Rugosidade do tubo (3) após o Lixamento para o ensaio de ruptura.

		Medição 1 (μm)	Medição 2 (μm)	Medição 3 (μm)	Medição 4 (μm)	R médio (μm)	Desvio Padrão
Lixamento (Tubo A3) para o ensaio de ruptura	Ra	0,92	1,04	0,89	0,97	0,96	0,07
	Rz	6,7	6,8	5,78	4,57	5,96	1,04
	Rq	1,22	1,36	1,16	1,19	1,23	0,09
	Rt	8,17	8,79	7,43	6,67	7,77	0,92

Fonte: O autor, 2017.

Tabela A.8 - Comparação entre as medidas de Rugosidade dos tubos após o Lixamento para o ensaio de ruptura.

			Rs médios (μm)	R médio (μm)	Desvio Padrão	% desvio
Comparação: Lixamentos para o ensaio de ruptura	Ra	Tubo A1	0,87	0,87	0,090	10,40%
		Tubo A2	0,78			
		Tubo A3	0,96			
	Rz	Tubo A1	5,72	5,70	0,268	4,70%
		Tubo A2	5,43			
		Tubo A3	5,96			
	Rq	Tubo A1	1,17	1,14	0,109	9,53%
		Tubo A2	1,02			
		Tubo A3	1,23			
	Rt	Tubo A1	8,24	7,90	0,295	3,73%
		Tubo A2	1,02			
		Tubo A3	7,77			

Fonte: O autor, 2017.

Tabela A.9 - Rugosidade do tubo (4) após o Jateamento para o ensaio de fluência.

		Medição 1 (μm)	Medição 2 (μm)	Medição 3 (μm)	Medição 4 (μm)	R médio (μm)	Desvio Padrão
Jateamento (Tubo D1) para o ensaio de fluência	Ra	7,97	9,66	7,98	6,8	8,10	1,18
	Rz	40,87	52,59	43,61	38	43,77	6,31
	Rq	9,55	12,04	9,84	8,5	9,98	1,49
	Rt	52,1	71,22	58,66	65,13	61,78	8,24

Fonte: O autor, 2017.

Tabela A.10 - Rugosidade do tubo (5) após o Jateamento para o ensaio de fluência.

		Medição 1 (μm)	Medição 2 (μm)	Medição 3 (μm)	Medição 4 (μm)	R médio (μm)	Desvio Padrão
Jateamento (Tubo D2) para o ensaio de fluência	Ra	8,72	9,3	9,97	8,48	9,12	0,66
	Rz	46,8	47,03	60,47	49,33	50,91	6,48
	Rq	10,59	11,44	12,66	10,65	11,34	0,96
	Rt	56,14	55,98	86,36	75,47	68,49	15,02

Fonte: O autor, 2017.

Tabela A.11 - Rugosidade do tubo (6) após o Jateamento para o ensaio de fluência.

		Medição 1 (μm)	Medição 2 (μm)	Medição 3 (μm)	Medição 4 (μm)	R médio (μm)	Desvio Padrão
Jateamento (Tubo D3) para o ensaio de fluência	Ra	7,84	8,39	7,51	8,25	8,00	0,40
	Rz	44,09	42,71	45,49	45,4	44,42	1,31
	Rq	9,61	10,18	10,02	10,28	10,02	0,30
	Rt	58,97	63,54	57,58	66,16	61,56	3,98

Fonte: O autor, 2017.

Tabela A.12 - Comparação entre as medidas de Rugosidade dos tubos após o Jateamento para o ensaio de fluência.

		Rs médios (μm)	R médio (μm)	Desvio Padrão	% desvio	
Comparação: Jateamentos para o ensaio de fluência	Ra	Tubo D1	8,10	8,41	0,619	7,36%
		Tubo D2	9,12			
		Tubo D3	8,00			
	Rz	Tubo D1	43,77	46,37	3,947	8,51%
		Tubo D2	50,91			
		Tubo D3	44,42			
	Rq	Tubo D1	9,98	10,45	0,770	7,37%
		Tubo D2	11,34			
		Tubo D3	10,02			
	Rt	Tubo D1	61,78	63,94	3,938	6,16%
		Tubo D2	68,49			
		Tubo D3	61,56			

Fonte: O autor, 2017.

Tabela A.13 - Rugosidade do tubo após ataque com a ferramenta MBX em apenas um sentido e direção.

		Medição 1 (μm)	Medição 2 (μm)	Medição 3 (μm)	Medição 4 (μm)	Medição 5 (μm)	R médio (μm)	Desvio Padrão
MBX em apenas um sentido e direção	Ra	4,16	3,88	4,64	3,78	2,97	3,89	0,61
	Rz	27,99	18	26,27	18,86	16,63	21,55	5,19
	Rq	5,16	4,57	5,65	4,58	3,76	4,74	0,71
	Rt	32,51	25,39	38,71	33,84	26,48	31,39	5,50

Fonte: O autor, 2017.

Tabela A.14 - Rugosidade do tubo após ataque com a ferramenta MBX em sentido e direção aleatórios.

		Medição 1 (μm)	Medição 2 (μm)	Medição 3 (μm)	Medição 4 (μm)	Medição 5 (μm)	R médio (μm)	Desvio Padrão
MBX em sentido e direção aleatório	Ra	6,9	6,99	7,96	7,58	9,47	7,78	1,04
	Rz	38,64	37,5/	40,98	38,9	41	39,88	1,29
	Rq	8,71	8,85	9,76	9,54	11,43	9,66	1,09
	Rt	48,55	64,52	57,52	48,25	55,1	54,79	6,78

Fonte: O autor, 2017.

Tabela A.15 - Comparação entre as medidas de Rugosidade dos tubos após ataque com a ferramenta MBX para avaliar o melhor procedimento/sentido/direção de uso da ferramenta.

			R médio (μm)	Diferença
Comparação: MBX em apenas um sentido e direção x MBX em sentido e direção aleatório	Ra	Apenas um sentido e direção	3,89	100,21%
		Sentido e direção aleatório	7,78	
	Rz	Apenas um sentido e direção	21,55	85,06%
		Sentido e direção aleatório	39,88	
	Rq	Apenas um sentido e direção	4,74	103,58%
		Sentido e direção aleatório	9,66	
	Rt	Apenas um sentido e direção	31,39	74,56%
		Sentido e direção aleatório	54,79	

Fonte: O autor, 2017.

Tabela A.16 - Rugosidade do tubo (7) após ataque com a ferramenta MBX em sentido e direção aleatório para ensaio de ruptura.

		Medição 1 (μm)	Medição 2 (μm)	Medição 3 (μm)	Medição 4 (μm)	R médio (μm)	Desvio Padrão
MBX (Tubo C1) em sentido e direção aleatório	Ra	4,69	5,81	5,12	4,89	5,13	0,49
	Rz	22,28	32,45	25,51	25,03	26,32	4,33
	Rq	5,58	7,46	6,4	6,19	6,41	0,78
	Rt	30,26	48	42,52	33,83	38,65	8,08

Fonte: O autor, 2017.

Tabela A.17 - Rugosidade do tubo (8) após ataque com a ferramenta MBX em sentido e direção aleatório para ensaio de ruptura.

		Medição 1 (μm)	Medição 2 (μm)	Medição 3 (μm)	Medição 4 (μm)	R médio (μm)	Desvio Padrão
MBX (Tubo C2) em sentido e direção aleatório	Ra	4,6	5,03	5,21	5,24	5,02	0,29
	Rz	23,24	24,11	27,09	24,05	24,62	1,69
	Rq	5,57	6,00	6,56	6,30	6,11	0,43
	Rt	32,19	30,24	36,55	33,97	33,24	2,68

Fonte: O autor, 2017.

Tabela A.18 - Rugosidade do tubo (9) após ataque com a ferramenta MBX em sentido e direção aleatório para ensaio de ruptura.

		Medição 1 (μm)	Medição 2 (μm)	Medição 3 (μm)	Medição 4 (μm)	R médio (μm)	Desvio Padrão
MBX (Tubo C3) em sentido e direção aleatório	Ra	4,48	3,93	4,3	4,19	4,23	0,23
	Rz	23,39	19,48	23,29	19,72	21,47	2,16
	Rq	5,55	4,84	5,32	4,95	5,17	0,33
	Rt	35,98	27,86	30,58	29,11	30,88	3,58

Fonte: O autor, 2017.

Tabela A.19 - Comparação entre as medidas de Rugosidade dos tubos após ataque com a ferramenta MBX para o ensaio de ruptura.

		R médio (μm)	Desvio Padrão	% desvio
Comparação: MBX	Ra	4,79	0,493	10,29%
	Rz	24,14	2,460	10,19%
	Rq	5,89	0,648	11,00%
	Rt	34,26	3,984	11,63%

Fonte: O autor, 2017.