CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

ESTUDO DO PROCESSO DE ENVELHECIMENTO DE POLÍMERO UTLIZADO PARA REPARO EM ESTRUTURAS DE TERMINAIS DE DISTRIBUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS

Ricardo Aguiar Guimarães

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título em Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais

Orientador(a): Juliana Primo Basílio de Souza
Coorientador(a): Hector Reynaldo de Meneses Costa

Rio de Janeiro
Agosto de 2019

ESTUDO DO PROCESSO DE ENVELHECIMENTO DE POLIMERO UTLIZADO PARA REPARO EM ESTRUTURAS DE TERMINAIS DE DISTRIBUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título em Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Ricardo Aguiar Guimarães

Banca Examinadora:

_____

Presidente, Professora Dra. Juliana Primo Basílio de Souza (UFMG)

_____

Professor Dr. Hector Reynaldo Meneses Costa (CEFET/RJ)

_____

Professor Dr. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar (CEFET/RJ)

_____

Professor Dr. Heraldo Silva da Costa Mattos (UFF)

Rio de Janeiro
Agosto de 2019

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

G963 Guimarães, Ricardo Aguiar
Estudo do processo de envelhecimento de polímero utlizado para reparo em estruturas de terminais de distribuição de combustíveis / Ricardo Aguiar Guimarães. – 2019.
78f. : il.color. , grafs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2019.
Bibliografia : f. 72-78.
Orientador : Juliana Primo Basílio de Souza
Hector Reynaldo Meneses Costa

1. Engenharia mecânica - Ensaios e provas. 2. Aço-carbono. 3. Juntas (Engenharia). I. Souza, Juliana Primo Basílio de. (Orient.). II. Costa, Hector Reynaldo Meneses. (Orient.). III. Título.

CDD 620.112

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes CRB-7/5281

Dedico este trabalho primeiramente
a meus pais, **Nero** e **Rose Guimarães**
que me deram como maior bem o estudo,
a minha esposa **Gisele Soares**,
por todo amor incondicional a mim dedicado,
as minhas filhas **Annah Sara** e **Maria Clara**, por
serem minha inspiração e combustível nessa
conquista e ao meu grande amigo **Evandro**
Alcântara, pelos conselhos e incentivos nestes
anos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À Deus, aos orixás e guias espirituais, pela emanação de todo axé necessário a superar essa árdua jornada.

Às minhas filhas Annah Sara e Maria Clara, que mesmo tão pequenas foram capazes, cada uma a sua forma, de mudar completamente a minha vida e se tornarem o combustível diário para enfrentar a dupla jornada acadêmica e profissional.

Aos meus queridos pais Nero e Rose Guimarães agradeço por todo esforço e dedicação em investir no maior e melhor bem possível a ser dado a mim: o estudo. Serei eternamente grato pelo amor a mim dado.

À minha pequena e amada esposa Gisele, que se torna uma gigante ao meu lado em todos os momentos.

Ao meu nobre amigo Evandro Alcântara, por ser um grande incentivador ao meu retorno a universidade. Sua parceria foi deveras importante, não só nos estudos, como na vida. Obrigado por todas as orientações e principalmente pelas nossas clássicas “brigas”.

À parceria junto ao Marco Aurelio Fonseca e Willian Martins, que se mostraram mais que líderes profissionais, sempre sendo aliados aos meus planos de crescimento acadêmico e profissional.

A todos amigos que, cada um à sua forma, puderam contribuir para que esse trabalho fosse finalizado e o sonho realizado.

À professora Julia Basílio por ter sido a primeira acadêmica a comprar a minha ideia de pesquisa e aceitar o desafio de me orientar, assim como o professor Hector Reynaldo por ter abraçado minha causa na reta final, conduzindo o processo com tamanha postura profissional. Não menos importante ao Professor Ricardo Aguiar pelo apoio durante os testes.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais do CEFET – RJ por me permitir realizar sonho de estudar novamente em uma instituição federal.

RESUMO

ESTUDO DO PROCESSO DE ENVELHECIMENTO DE POLIMERO UTLIZADO PARA REPARO EM ESTRUTURAS DE TERMINAIS DE DISTRIBUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS

Ricardo Aguiar Guimarães

Orientadores: Juliana Primo Basílio de Souza

Hector Reynaldo Meneses Costa

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de mestre em engenharia mecânica e tecnologia de materiais.

A indústria do petróleo, de uma forma geral, tem consideráveis índices de prejuízos, atrelados a corrosão e necessidades de paradas operacionais para manutenções preventivas e corretivas. Este trabalho se propõe a avaliar o impacto da exposição as condições atmosféricas do reparo polimérico utilizando a DGEBA (Diglicidil Éter do Bisfenol A), em particular a Belzona® 1111, aplicado a tanques de armazenagem de combustíveis. O estudo baseou-se em, após a aplicação do polímero sobre o metal que fora pré condicionado a quatro diferentes tratamentos de superfície, expô-lo a condições climáticas atmosféricas via ensaio de névoa salina, seguindo a norma ASTM B117. Foi realizado ensaio de adesão (*pull-off test*), baseado na norma ASTM D4541. Uma avaliação microestrutural através de microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada. Os resultados indicam que a utilização de técnicas de preparação como o jateamento e o escovamento das superfícies metálicas, aumentam a rugosidade auxiliando na adesão entre o reparo e o substrato.

Palavras-chave: Adesão; Tanques; Aço Carbono; Reparo; DGEBA; Envelhecimento.

Rio de Janeiro

Agosto, 2019

ABSTRACT

STUDY OF THE POLYMER AGING PROCESS USED FOR REPAIR ON STRUCTURES OF FUEL DISTRIBUTION TERMINALS

Ricardo Aguiar Guimarães

Advisors: Juliana Primo Basílio de Souza

Hector Reynaldo Meneses Costa

Abstract of the Master's Dissertation submitted to the Postgraduate Program in Mechanical Engineering and Materials Technology of the Celso Suckow Federal Center of Technological Education of Fonseca, CEFET / RJ, as part of the mechanical engineering and materials technology course requirements.

Generally, petroleum industry has significant financial loss, linked to corrosion thereby causing operational stops and causing preventive and corrective maintenance. This work intends to evaluate the impact of an exposition to atmospheric conditions of a polymeric repair, using DGEBA (Diglicidil Ether of Bisphenol A), in particular Belzona™ 1111, applying in fuel storage tanks. This study was based on, after applying the polymer on the metal, that had been preconditioned to four different surface treatment, expose it to atmospheric conditions by a salt spray chamber testing, based on ASTM B117. A pull-off test was done, to measure adhesion, based on ASTM D4541, and microstructural analysis by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM) were done. The results indicate that the use of preparation techniques such as bristle blasting and shoot peening of metallic surfaces increases the roughness, helping in the adhesion between the repair and the substrate.

Keywords: Adhesion; Tanks; Carbon steel; Repair; DGEBA; Aging.

Rio de Janeiro

August, 2019

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais componentes de um tanque de armazenamento 15
Figura 2 – Parque de Tancagem (Base de Duque de Caxias) 20
Figura 3 – Concentração de Cloretos x Distância em Relação ao Mar - Adaptado 22
Figura 4 – Esquemático do método de lixamento em sentidos alternados. 25
Figura 5 – Esquemático de movimento de cerdas durante processo de escovamento rotativo (Adaptado) 25
Figura 6 – Esquemático de sistema típico de jateamento (Adaptado). 26
Figura 7 – Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos. 28
Figura 8 – Estrutura química de uma resina epóxi DGEBA 29
Figura 9 – Estrutura química da BAPP 30
Figura 10 – Estrutura química do EHBPE 31
Figura 11 – Estrutura química do Polipirrol (PPy) 31
Figura 12 – Áreas envolvidas na Ciência da adesão Adaptada 34
Figura 13 – (a) Falhas adesivas e coesivas e (b) ejeção de partículas. 35
Figura 14 – Explicação esquemática da teoria da adesão mecânica 35
Figura 15 – Representação geral da Teoria da Adsorção; 36
Figura 16 – Explicação esquemática da teoria da difusão 36
Figura 17 – Explicação esquemática da teoria eletrostática 37
Figura 18 – Desenho esquemático de ensaio de arrancamento do filme fino do substrato, através do pino de tração. Adaptado 38
Figura 19 – Componentes que são originários da estrutura química da DGEBA 40
Figura 20 – Belzona® 1111 41
Figura 21 – Elemento base da Belzona® 1111 42
Figura 22 – Elemento Solidificador Belzona® 1111 42
Figura 23 – Amostras após preparação de superfície: 44
Figura 24 – Detalhe Dolly Jateado 45
Figura 25 – Medição de Perda de Espessura 45
Figura 26 – Mistura/Aplicação de Belzona® 1111 nos Corpos de Prova 46
Figura 27 – Câmara de Névoa Salina 47
Figura 28 – Detalhe de Modelo da Câmara de Névoa Salina 47
Figura 29 – Amostras Pré-Envelhecimento 48
Figura 30 – Detalhe de Modelo da Máquina de Teste de Adesão 49
Figura 31 – Máquina de teste de Adesão PosiTest AT-A 49
Figura 32 – Corpo de Prova Escovado 50
Figura 33 – Corpo de Prova Lixado 50
Figura 34 – Corpo de Prova Como Recebido 51
Figura 35 – Corpo de Prova Jateado 51
Figura 36 – (a) Microscópio Ótico (b) Microscópio Eletrônico por Varredura 52
Figura 37 – Resultado Gráfico da Média de Perda de Espessura 54
Figura 38 – Amostras após 48h 54
Figura 39 – Amostras após 72h 55
Figura 40 – Amostras após 168h 55
Figura 41 – Amostras após 240h 56
Figura 42 – Resultados do ensaio de adesão para as condições estudadas 58
Figura 43 – Aspecto após o ensaio de aderência (como recebida) 58
Figura 44 – Aspecto após o ensaio de aderência (escovada) 59
Figura 45 – Aspecto após o ensaio de aderência (lixada) 59
Figura 46 – Aspecto após o ensaio de aderência (jateada) 60
Figura 47 – Detalhe do corpo de prova após o ensaio de aderência, como recebido . 60

Figura 48 – Detalhe do corpo de prova após o ensaio de aderência, lixado 61
Figura 49 – Detalhe do corpo de prova após o ensaio de aderência, jateado 61
Figura 50 – Detalhe do corpo de prova após o ensaio de aderência, escovada..... 62
Figura 51 – Macrografia da superfície do dolly (como recebido). MO 63
Figura 52 – Macrografia da superfície do dolly (lixado). MO 64
Figura 53 – Macrografia da superfície do dolly (escovada). MO 64
Figura 54 – Macrografia da superfície do dolly (jateada). MO 65
Figura 55 – Micrografias da superfície do dolly “Como Recebido“ 66
Figura 56 – Micrografia da superfície do dolly “Como Recebido” 1500x LED (MEV)... 67
Figura 57 – Micrografias da superfície do dolly “Lixado” 67
Figura 58 – Micrografia da superfície do dolly “Lixado” 1000x LED (MEV)..... 68
Figura 59 – Micrografias da superfície do dolly “Escovado” 68
Figura 60 – Micrografia da superfície do dolly “Escovado” 1500x BED (MEV) 69
Figura 61 – Micrografias da superfície do dolly “Jateado” 69
Figura 62 – Micrografia da superfície do dolly “Jateado” 1500x BED (MEV) 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de Líquidos Inflamáveis Combustíveis 17
Tabela 2 – Relação de Produto x Tanque 18
Tabela 3 – Principais características dos epóxidos bicomponentes 32
Tabela 4 – Propriedades Características da Belzona® 1111 41
Tabela 5 – Propriedades Mecânicas da Belzona® 1111 43
Tabela 6 – Especificação Técnica Aço ASTM A283 GR. C 43
Tabela 7 – Resultados da Medição de Perda de Espessura 53
Tabela 8 – Dados do ensaio de aderência para as quatro condições estudadas 57

Sumário

1. Introdução 13
1.1. Objetivo 14
1.2. Metodologia & Pesquisa 14
2. Revisão Bibliográfica 15
2.1. Tanques Aéreos de Armazenamento de Combustíveis 15
2.1.1. Classificação dos Tanques 16
2.1.1.1. Quanto ao Tipo de Produto 16
2.1.1.2. Quanto ao Tipo de Teto 17
2.1.2. Seleção do Tipo de Tanque de Armazenamento 18
2.1.3. Definição da Capacidade de Armazenamento 19
2.2. Corrosão 21
2.2.1. Aço Carbono na Atmosfera Salina 21
2.2.2. Principais Formas de Corrosão 22
2.3. Técnicas de Preparação de Superfície 23
2.3.1. Lixamento 24
2.3.2. Escova Rotativa (Bristle Blasting) 25
2.3.3. Jateamento (Shoot Peening) 26
2.4. Polímeros 26
2.4.1. Compósitos 27
2.4.2. Adesivos estruturais 32
2.4.3. Envelhecimento de Polímeros 33
2.4.4. Teoria da Adesão 34
2.4.5. Medição da Adesão (Arrancamento) 37
3. Materiais e Métodos 40
3.1. Materiais 40
3.1.1. DGEBA (Belzona® 1111) 40
3.1.2. Aço ASTM A-283 Grau C 43
3.2. Métodos 44
3.2.1. Preparações de Superfície 44
3.2.2. Medição de Perda de Espessura 45
3.2.3. Aplicação de Reparo 46
3.3. Ensaios & Análises 47
3.3.1. Envelhecimento 47

3.3.2. Arrancamento 48
3.3.3. Microscopia Otica (MO) e Eletrônica por Varredura (MEV FEG) 52
4. Resultados e Discussão 53
4.1. Medição de Perda de Espessura 53
4.2. Análise Visual do Ensaio de Envelhecimento por Névoa Salina (*Salt Spray Aging*) 54
4.3. Ensaio de Adesão (*Pull-Off Test*) 57
4.4. Análise por Microscopia Ótica (MO) 63
4.5. Análise por Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV-FEG) 65
5. Conclusão 71
6. Referências Bibliográficas 72

1. Introdução

Os tanques de armazenamento são equipamentos estáticos de caldeiraria pesada, sujeitos à pressão próxima à atmosférica e, na maioria das vezes, destinados ao armazenamento de petróleo e seus derivados. Eles são uma divisão de vasos de armazenamento e não são pressurizados. Especificamente neste trabalho será abordado um estudo do caso de um trecho de metal de aplicação ao costado de um tanque, cilíndrico, vertical, não enterrado e construído com chapas de aço carbono previamente soldadas, comumente usados em refinarias e terminais de que estocam e distribuem petróleo, derivados, combustíveis, biocombustíveis etc. Esses equipamentos, principalmente pela sua utilidade, estão espalhados por todo mundo, auxiliando a infraestrutura e desenvolvimento industrial. Por conta da pulverização de terminais, muitos desses estão expostos a ambientes agressivos, como os corrosivos, próximos ao litoral.

Essa corrosão provoca prejuízos financeiros com a paralisação de plantas ou até mesmo para o meio ambiente, através de corrosão em equipamentos industriais e/ou em quilômetros de tubulação podendo provocar também desperdícios de recursos financeiros ou de homem/hora, como também perda e/ou contaminação do produto que está sendo manipulado elevando os custos de manutenção, sejam elas corretivas não planejadas ou até mesmo a troca do equipamento, gerando com isso um custo pela interrupção do processo operacional, redução da eficiência do equipamento impactando diretamente na eficiência da planta e o mais grave que é o impacto na segurança e danos, muitas vezes irreparáveis, ao meio ambiente como contaminação dos solos, rios e mares.

Muito utilizado para a manutenção corretiva com baixo impacto de tempo e custo, a junção de dois substratos de diferentes naturezas por meio da colagem é uma área com ampla possibilidade de crescimento, no que tange ao seu incremento. O desenvolvimento de novos compósitos aumentou o uso desse tipo de união no setor industrial. Esse progresso torna atrativo o estudo e pesquisa nessa área, para um melhor entendimento e compreensão da sua aplicação no campo da engenharia e no rendimento a que se propõe suas características físico-químicas para melhor aproveitamento pela indústria em geral.

Neste trabalho foi avaliado o processo de envelhecimento de polímero Belzona® 1111, utilizado para reparo, através do ensaio de névoa salina e a utilização de quatro condições pré-determinadas de preparação de superfícies: como recebido, lixado, escovado e jateado. A caracterização microestrutural foi realizada através das técnicas de microscopia ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV).

1.1. Objetivo

Este trabalho tem como foco o estudo da aplicação do polímero DGEBA (Diglicidil Éter do Bisfenol A) para reparos em material metálico ASTM A-283 Gr C utilizado para fabricação e construção de tanques, segundo API-650, exposto a condições de ambiente ao envelhecimento (*salt spray chamber*).

Foi executada a comparação de resultados de adesão (*pull-off test*) dos reparos poliméricos envelhecidos, com relação a reparos sem envelhecimento (ALCANTARA, 2018), com três preparações de superfície diferentes, além de uma sem preparação.

O objetivo é estudar a durabilidade e a resistência para utilização do polímero DGEBA, no reparo de tanques.

1.2. Metodologia & Pesquisa

Haverá quatro diferentes amostras do substrato (aço A-283 Gr C): uma em condição como recebida (sem tratamento de superfície) e outras três expostas a formas distintas de tratamento: lixamento, escovamento rotativo e jateamento, de forma a produzir padrões de limpeza de superfícies e rugosidades diferentes.

O adesivo compósito aplicado os substratos será a Belzona® 1111, preparado e aplicado conforme as especificações do fabricante. Após a aplicação as amostras serão expostas a condições de envelhecimento em uma câmara de névoa salina.

Em seguida, dollys serão colados a superfície adesiva e feito ensaios de arrancamento (pull-off), e forma a medir o grau de adesão entre adesivo e substrato.

Por fim, para analisar com maior grau de detalhamento as amostras, serão feitos dois tipos de microscopia: ótica (MO) e a eletrônica por varredura (MEV FEG).

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Tanques Aéreos de Armazenamento de Combustíveis

Assim como para construção de qualquer equipamento, os tanques são regidos por normas, sejam elas de empresas, brasileiras e/ou internacionais. No Brasil, a norma para a construção destes equipamentos é a ABNT NBR 7821, que abrange todos os tanques soldados para armazenamento de petróleo e derivados. Porém, a norma mais utilizada nas indústrias é a norma americana API 650 – *Welded Steel Tanks for Oil Storage – do American Petroleum Institute*. Dependendo do cliente final a receber o equipamento, podem ser aplicadas normas específicas, porém os principais componentes de um tanque de armazenamento são representados na Figura 1.

Legenda:

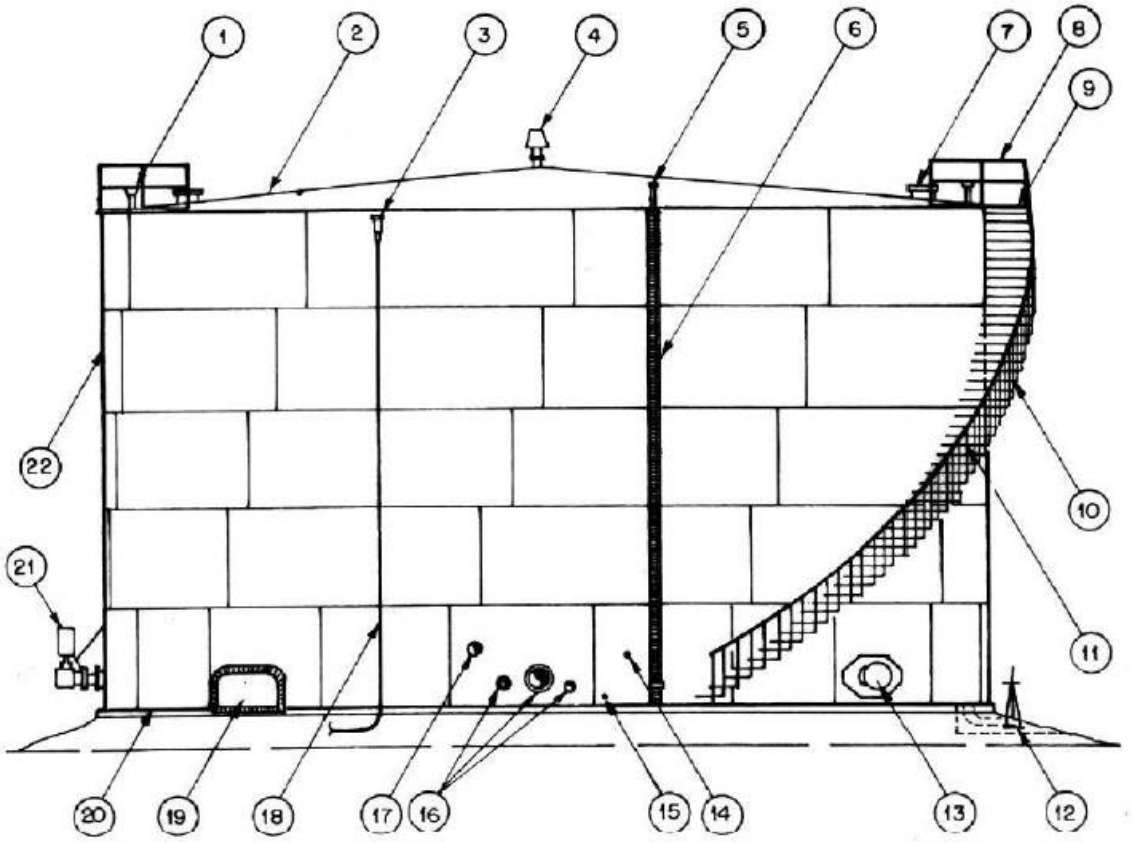


Figura 1 – Principais componentes de um tanque de armazenamento
Fonte: NBR-7821, (2015)

1 – Escotilha de medição
2 – Chapa do teto
3 – Câmara de espuma
4 – Respiro
5 – Caixas de selagem
6 – Régua externa do medidor boia
7 – Bocas de visita do teto
8 – Corrimão do teto
9 – Plataforma da escada
10 – Escada helicoidal de costado
11 – Corrimão
12 – Dreno de fundo
13 – Boca de visita no costado
14 – Termômetro
15 – Saída de condensado
16 – Bocal entrada/saída de produto
17–Entrada vapor de aquecimento
18 – Tubulação de espuma
19 – Porta de limpeza
20 – Chapa do fundo
21 – Misturador
22 – Costado

2.1.1. Classificação dos Tanques

2.1.1.1. Quanto ao Tipo de Produto

Os tanques são destinados a produtos a temperatura iguais ou superiores a seus pontos de fulgor e devem obedecer aos requisitos da classificação dos derivados líquidos do petróleo (ABNT NBR 17505 – 1, 2013), conforme Tabela 1:

Tabela 1 – Classificação de Líquidos Inflamáveis Combustíveis
Fonte: ABNT NBR 17505 – 1, 2013

	Líquidos	Ponto de Fulgor (PF)	Ponto de Ebulição (PE)
Inflamável	Classe I	PF<37,8ºC e PV<275,7 kPa	-
	Classe IA	PF<22,8ºC	PE<37,8ºC
	Classe IB	PF<22,8ºC	PE≥37,8ºC
	Classe IC	22,8ºC≤PF<37,8ºC	-
Combustível	Classe II	37,8ºC≤PF<60ºC	-
	Classe IIIA	60ºC≤ PF<93ºC	-
	Classe IIIB	PF≥93ºC	-
	Nota: PV (Pressão de Vapor)		

2.1.1.2. Quanto ao Tipo de Teto

Os tanques de armazenamento são classificados em função da natureza do seu teto (NBR-7821, 2015):

a) Tanques de Teto Fixo:
   - De teto suportado;
   - De teto cônico suportado;
   - De teto domo suportado;
   - De teto em gomos suportado;
   - De teto autoportante;
   - De teto cônico autoportante;
   - De teto cônico autoportante;
   - De teto domo autoportante;
   - De teto em gomos autoportante;

b) Tanques de Teto Flutuante:
   - De teto duplo;
   - De teto pontão;

2.1.2. Seleção do Tipo de Tanque de Armazenamento

Para selecionar um tipo de tanque em função do produto a ser armazenado, pode-se utilizar a norma Petrobras N-270 (Tabela 2), que recomenda os tipos mais usuais de tanque para cada aplicação.

Tabela 2 – Relação de Produto x Tanque
Fonte: (N-270, 2010)

Produto armazenado	Tipo de tanque (selecionado conforme projeto) [Prática Recomendada]
Produtos leves da faixa de gasolina e nafa leve. Petróleo cru.	Tanque atmosférico de teto flutuante externo;
	Tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno;
	Tanque atmosférico para pequena pressão interna, segundo a API STD 650:2007, Apêndice F;
	Tanque para baixa pressão de teto cônico, segundo a API STD 620;
Gasolina de Aviação (GAV).	Tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno;
	Tanque atmosférico para pequena pressão interna, segundo a API STD 650:2007, Apêndice F;
	Tanque para baixa pressão de teto cônico, segundo a API STD 620;
Álcool etílico hidratado. Metanol.	Tanque atmosférico de teto flutuante externo;
	Tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno;
Biodiesel.	Tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno;
	Tanque atmosférico para pequena pressão interna, segundo a API STD 650:2007, Apêndice F;
Álcool etílico anidro.	Tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno;
Óleo diesel classes I e II.	Tanque atmosférico de teto flutuante externo;
	Tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno;
Querosene de Aviação (QAV)	Tanque atmosférico de teto fixo;
	Tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno;
Produtos da faixa de querosene ou mais pesados, tais como: a) nafta pesada; b) querosene; c) óleo diesel classe III; d) resíduo de vácuo; e) diesel do FCC ("cycle-oil"); f) óleo combustível; g) resíduos ("slop"); h) óleo lubrificante; i) "flushing-oil" j) asfalto e cimento asfáltico; k) lastro de navio;	Tanque atmosférico de teto fixo;
Água bruta.	Tanque sem teto

2.1.3. Definição da Capacidade de Armazenamento

As chapas a serem utilizadas nesses equipamentos, podem ser classificadas em função de sua espessura como abaixo:

- Chapas grossas: espessura ≥ ¼” (6,35mm);
- Chapas finas: espessura < ¼” (6,35mm).

E fornecidas conforme as bordas das chapas:

- Bordas universais: apresentam as bordas provenientes da fabricação por laminação;
- Bordas aparadas: trabalhadas por meio de aparamento lateral.

As dimensões comerciais de chapas de aço carbono no Brasil, adotadas para o projeto são conforme abaixo:

a) Espessura até 4,75mm (chapas finas laminadas à quente):
   1500mm x 6000mm ou 1800mm x 6000mm com bordas aparadas;
b) Espessuras de 6,35mm, 8,00mm, 9,50mm, 12,50mm, 16,00mm, 19,00mm, 22,40mm ou acima (chapas grossas laminadas a quente):
   2440mm x 12000mm, com bordas aparadas (BARROS, 2014).

A norma API 650 (2013) especifica as chapas que devem ser utilizadas no projeto de um tanque de armazenamento em sua seção 4, parte 4.2.2, conforme transcrito na íntegra abaixo:

> As placas que estão em conformidade com as seguintes especificações ASTM são aceitáveis, desde que as placas estejam dentro das limitações especificadas.
> a) ASTM A36M/ A36 para chapas com uma espessura máxima de 40mm (1,5 pol). Nenhuma das especificações para os materiais que constam na Tabela 1 da ASTM A36M/ A36 são considerados aceitáveis para os tanques construídos segundo esta Norma a menos que seja expressamente declarado nesta Norma que as especificações são aceitáveis.
> b) ASTM A 131m/ A131 para chapas com uma espessura máxima de 13mm (0.5 pol). Série B para as placas para uma máxima espessura de 25mm (1 pol), e grau EH36 para placas com a espessura máxima de 45mm (1,75 pol) (placas de inserção e flanges de espessura máxima de 50mm [2pol]).
> c) ASTM A283m/ A283, Série C, com placas a uma espessura máxima de 25mm (1 in).
> d) ASTM A285m/ A285, Série C, com placas de espessura máxima de 25mm (1 in).
> e) ASTM A380 graus 516m, 415, 450, 485 / A 516, Grades 55,

60, 65 e 70, para placas com uma espessura máxima de 40mm (1,5 pol) (Placas de inserção e flanges para uma espessura máxima de 100 mm [4 pol]).

f) ASTM A537M/ A537, Classe 1 e Classe 2, com placas a uma espessura máxima de 45mm (1,75 pol) (Placas de inserção para um máximo espessura e de 100mm [4 pol]).

g) ASTM A573M classes 400, 450, 485 / A 573, as notas 58, 65 e 70, para placas com uma espessura máxima de 40mm (1,5 pol).

h) ASTM A633m/ A633, as classes C e D, para placas com uma espessura máxima de 45mm (1,75 pol) (Placas de inserção para um máximo espessura de 100mm [4 pol]).

i) ASTM A662m/ A662m, as classes B e C, com placas a uma espessura máxima de 40mm (1,5pol).

j) ASTM A 678m/ A678, classe A, com placas a uma espessura máxima de 40mm (1,5 pol) (Placas de inserção para uma espessura máxima de 65mm [2,5 pol]) e Série B para placas com uma espessura máxima de 45mm (1,75 pol) (Placas de inserção para uma espessura máxima de 65mm [2.5 pol]). Adições de boro não são permitidas.

k) ASTM A737m/ A737, Série B, com placas a uma espessura máxima de 40 mm (1,5 pol).

l) ASTM 841M/ A841 Grau A, classe 1 e classe B, classe 2 para placas a uma espessura de até 40 mm (1,5 pol) (Placas de inserção para uma espessura máxima de 65 [2.5 pol]).

Na figura 2 é possível observar o parque de tancagem de uma base de distribuição de derivados.



Figura 2 – Parque de Tancagem (Base de Duque de Caxias)
Fonte: Acervo Ipiranga Produtos de Petróleo

2.2. Corrosão

A corrosão pode ser definida como a degradação de um material, em grande parte das vezes metálico, através da ação química ou eletroquímica do meio ambiente, podendo ou não estar associado a esforços mecânicos (GENTIL, 2008). Por meio desse processo ocorrem alterações indesejáveis tais como desgastes, variações químicas ou até mesmo modificações estruturais, cuja deterioração causada pela interação físico-química entre o material e o seu meio operacional, deixa o material inadequado para uso.

Lyon (2012) ao dissertar sobre o tema, afirmou que a corrosão pode ser definida como a reação do metal com o meio ambiente ao qual está submetido, fazendo com que se converta a um estado não metálico. Com isso pode-se perder algumas das suas principais características, tais como: elasticidade, ductilidade, resistência mecânica, dentre outras, tornando-o inadequado para algumas aplicações para as quais tenha sido projetado.

O metal sujeito a uma força motriz sofre corrosão, pois é uma consequência natural de um estado temporário. Quando se deseja fabricar ou produzir metais, esta energia é fornecida a partir de minerais e minérios, porém este metal tende a retornar a sua forma original quando submetido a ambientes corrosivos (ROBERGE, 1999).

2.2.1. Aço Carbono na Atmosfera Salina

A atmosfera salina é gerada por cloretos dissolvidos em água que são pulverizados na atmosfera na forma de cloreto de sódio. A concentração da salinidade nesta atmosfera tem ligação diretamente proporcional ao poder de penetração da mesma, no material e acelerando o processo de corrosão através da perda de material.

A formação do FeCl2 acontece com a união do íon cloreto com o Fe2+, após o início do processo corrosivo (MEIRA *et al*, 2002). O Cl- é então liberado juntamente ao íon H+, através do processo de hidrólise. A liberação do íon H+ ocasiona o aumento na acidez na superfície anódica e consequentemente será encontrada em um potencial cada vez mais negativo neste local. Por sua vez, a liberação de OH- aumentará o pH destas áreas catódicas. Esta relação inversa faz com que o ciclo de corrosão não pare.

Por isso deve-se diminuir o pH nas áreas anódicas e aumentar a basicidade nas áreas catódicas e então teremos como consequência a diminuição de ataque corrosivo nesta região.

O gráfico abaixo, na Figura 3, mostra uma medição realizada que mostra que a concentração salina varia conforme no distanciamento da costa principalmente nos primeiros duzentos metros.

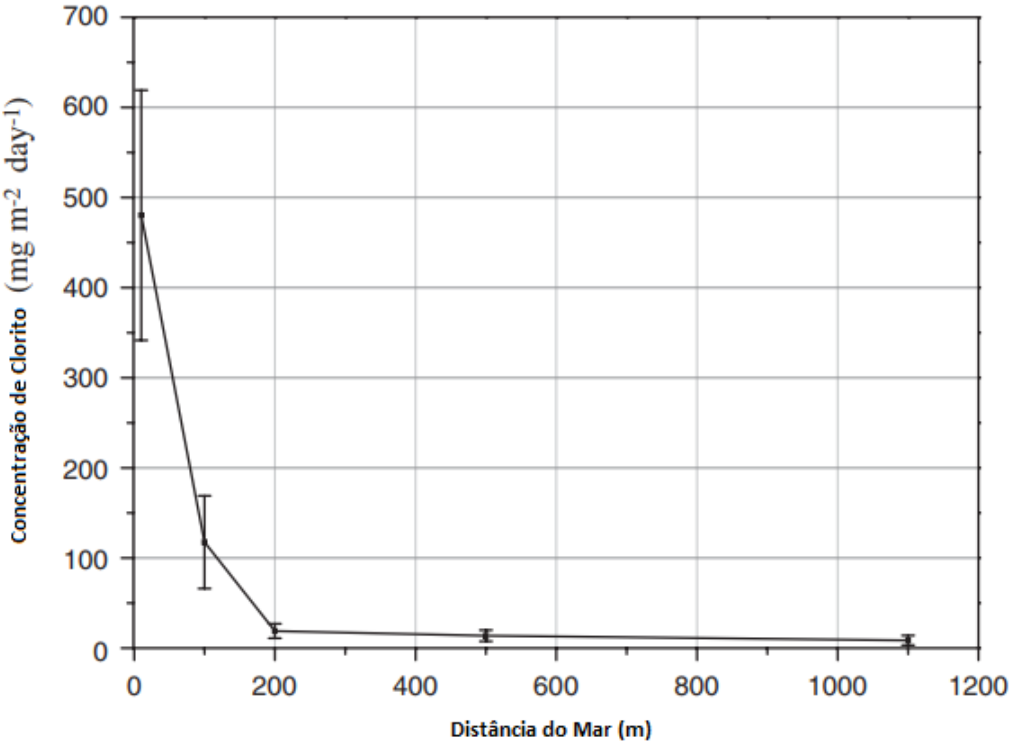


Figura 3 – Concentração de Cloretos x Distância em Relação ao Mar - Adaptado
Fonte: MEIRA *et al*, (2006)

2.2.2. Principais Formas de Corrosão

O material metálico pode estar submetido ao efeito de nove formas diferentes de corrosão (SCHWEITZER, 2003):

- Uniforme;
- Intergranular;
- Galvânica;
- Por frestas;
- Por pites;
- Por erosão;
- Por tensão;
- Microbiológica;
- Por lixiviação.

Os tipos de corrosão são caracterizados levando-se em conta a aparência ou forma de ataque e suas causas e mecanismos, por isso é de extrema importância conhecer as formas de ataque (GENTIL, 2008). Sendo assim é possível caracterizar cada tipo de corrosão, por:

- Morfologia – uniforme, por placas, alveolar, por pite, intergranular, filiforme, por esfoliação, grafítica, dezincificação, ao redor do cordão de solda e empolamento pelo hidrogênio;
- Causas ou mecanismos – por aeração diferencial, eletrolítica, galvânica, corrosão por tensão, grafítica, dezincificação, ao redor do cordão de solda e empolamento pelo hidrogênio;
- Fatores mecânicos – sob tensão, fadiga, atrito;
- Meio corrosivo – atmosférica, através do solo, provocada por microorganismos, pela água do mar, por salt spray, etc.;
- Localização do ataque – por pite, uniforme, intergranular, transgranular, etc.

Atualmente, as pesquisas em torno do processo corrosivo, em particular com o material ASTM A-283 Gr C, se dividem entre duas grandes áreas de atuação: a forma de atuação do processo corrosivo, seja por agentes presentes naturalmente no ambiente ou compostos químicos e em formas de prevenção deste processo, com a utilização de agentes externos, para aumento de vida útil do material (JA'BAZ, 2017).

Formas de geração de energia, que tenham menor impacto ao meio ambiente são aperfeiçoadas a cada dia, como a solar e a eólica. No caso da energia solar, uma das formas de geração é utilizando água salgada, seja quente ou gelada, para condução dessa energia gerada. Contudo, tanques e tubulações desse sistema são metálicos, fazendo com que haja um constante processo de ataque corrosivo nos mesmos. Para tanto, chegou-se à conclusão que a utilização de outros materiais, como o aço inoxidável e monitoramento por dados gravimétricos e eletroquímicos auxiliaria nesse processo (WALCZAK, 2018).

2.3. Técnicas de Preparação de Superfície

Por definição, a NBR 15239 (2005), que trata do tema, subdivide-as em tratamentos de superfícies de aço com ferramentas manuais e mecânicas. Os tratamentos manuais empregam escovas, espátulas, lixas, martelos, raspadores,

picadores e outras ferramentas manuais de impacto, ou a combinação destas, cujo objetivo é a remoção de carepas, óxidos, ferrugem etc. Já os tratamentos mecânicos utilizam ferramentas elétricas ou pneumáticas, como escovas rotativas, lixadeiras, esmerilhadeiras, pistola de agulhas ou outras ferramentas de impacto ou rotativas, sejam elas combinadas ou não, cujo objetivo é a remoção de placas de ferrugem, ferrugem, tintas etc.

2.3.1. Lixamento

O processo de lixamento pode ser feito de forma manual ou mecânica. A técnica de lixamento manual consiste na utilização de uma lixa na superfície de uma amostra, feita de forma contínua e removendo o material de superfície, por meio da abrasão. Para tal processo é utilizada a lixa, elemento básico para o processo, cuja granulometria empregada deve ser cada vez menor, alterando a direção a cada 90°, conforme Figura 4, em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior (NBR 15239, 2005).

A lixa é um elemento abrasivo, cuja folha é destinada a dar à abrasão ao corpo de prova. Para fins de melhora do acabamento e consequentemente da rugosidade superficial, a mudança de granulação da lixa se faz necessária. No lixamento o poder de desgaste é avaliado pela dureza do grão e pela sua granulometria da lixa. Este processo pode ser subdividido em três etapas:

a) A superfície do material sofrerá deformação elástica por conta do contato do grão abrasivo da lixa. Pelo repetitivo movimento de fricção entre lixa e superfície, ocorre o estresse de cisalhamento no metal, gerando também um estresse de compreensão, pela pressão aplicada.

b) Logo ao se exceder o limite de escoamento plástico, ele é plasticamente deformado.

c) Enquanto ocorre o contato da superfície metálica com a abrasiva da lixa, a força elástica é excedida no local, gerando o cavaco. Após, uma sub superfície deformada

plasticamente continuará existindo, logo abaixo da superfície (KLOCKE *et al*, 2005).

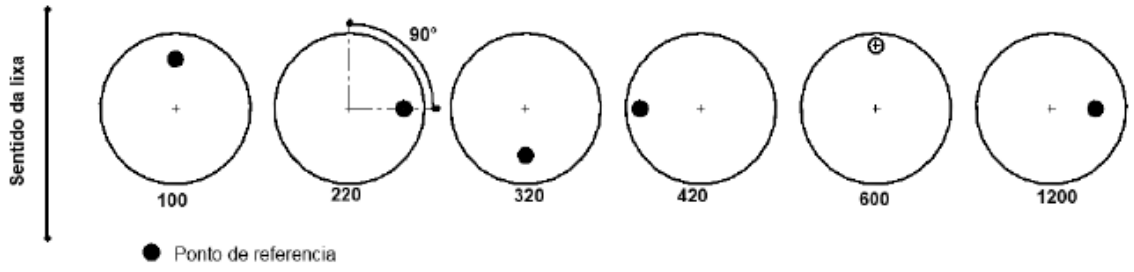


Figura 4 – Esquemático do método de lixamento em sentidos alternados.
Fonte: LEMM Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais - www.urisan.tche.br.

2.3.2. Escova Rotativa (Bristle Blasting)

O princípio básico do processo de escovação rotativa consiste na ligação de cerdas que podem ou não serem metálicas, a um elemento rotativo que pode ser pneumático ou elétrico. Durante o processo, estas cerdas entram em contato com a superfície metálica, como pode ser visto na Figura 5, gerando atrito para remoção de elementos não desejados (RODRIGUEZ, 2009).

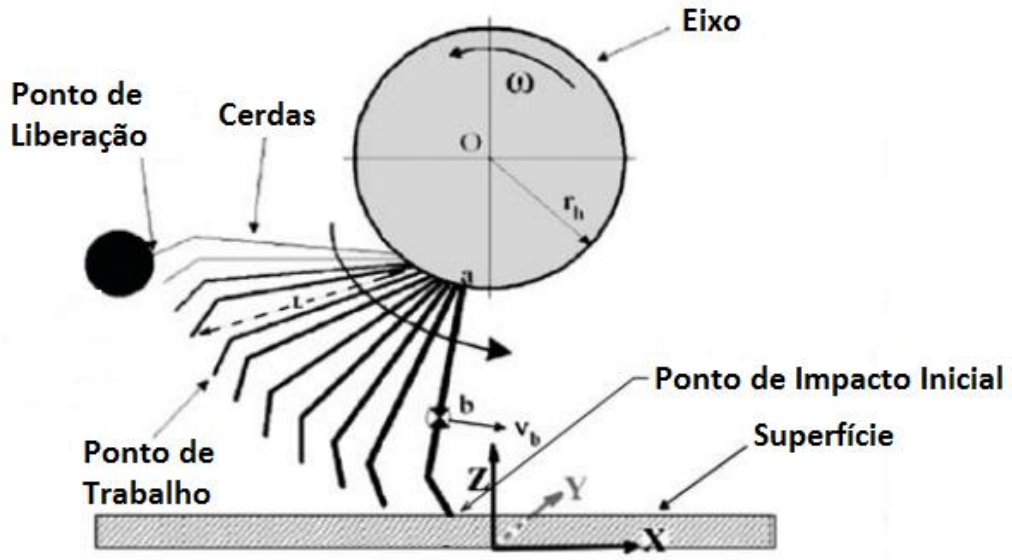


Figura 5 – Esquemático de movimento de cerdas durante processo de escovamento rotativo (Adaptado)
Fonte: Strango *et al*, (2009)

2.3.3. Jateamento (Shoot Peening)

Processo no qual a máquina jateamento dispara grãos que podem ser metálicos ou não, por meio de ar comprimido ou gás inerte sobre a superfície que se deseja tratar, conforme Figura 6. Estes grãos (granalha) podem ter de 10 a 50 µm de diâmetro e são pressurizadas a 6 bar, viajando até o bocal de jateamento a aproximadamente 150 a 300 m/s. (RODRIGUEZ, 2009)

As variáveis de dimensionamento da granalha, velocidade de impacto sobre a superfície, assim como o ângulo de aplicação da mesma são extremamente importantes para efetivo tratamento que se deseja (ASM, 2010).

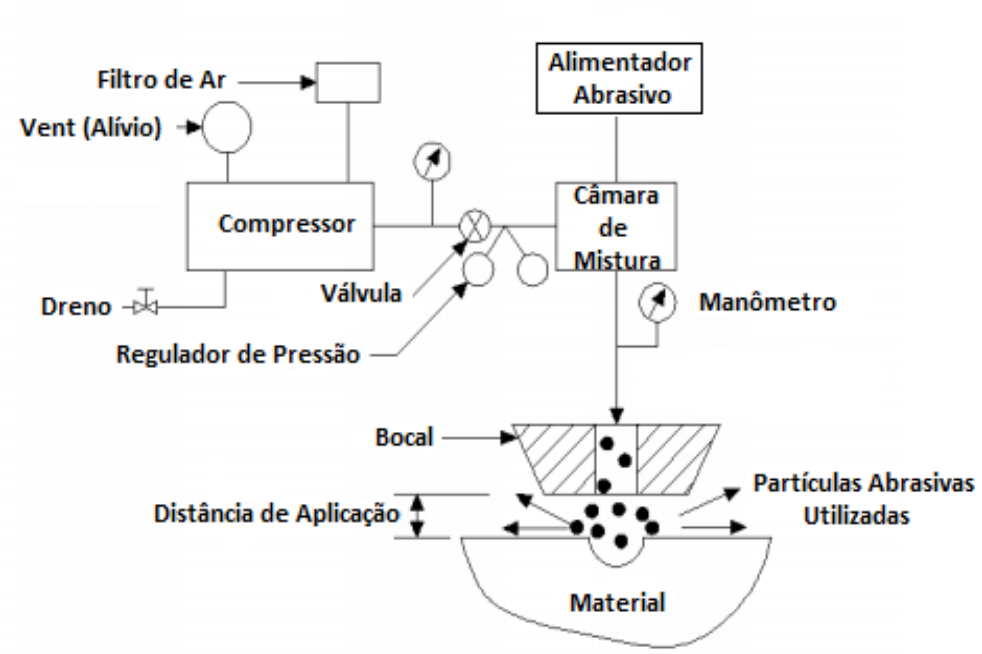


Figura 6 – Esquemático de sistema típico de jateamento (Adaptado).
Fonte: JAIN, *et al* (2001)

2.4. Polímeros

São macromoléculas formadas por pequenas unidades estruturais chamados monômeros. Também tem uma característica de ser um tipo de material que possui alto peso molecular, podendo variar de 10.000 a mais de 1.000.000 g/mol. Como comparação, podemos citar outras substâncias, como a água (18g/mol) e o açúcar (342

g/mol) que possuem um baixo valor do mesmo. Os polímeros estão presentes de inúmeras e diversas maneiras na natureza, como em tecidos de animais e vegetais (VAN DER VEGT, 2002).

Um dos tipos de classificação dos polímeros é baseado pela resposta à elevação de temperatura. Nesse formato, pode-se dizer que existem dois tipos de polímeros: os termoplásticos e os termofixos. A principal característica dos termoplásticos é que derretem em altas temperaturas e se solidificam com sua diminuição, podendo esse processo de aquecimento e arrefecimento ser feito diversas vezes sem afetar as propriedades desse polímero. Já os termofixos, derretem apenas na primeira vez que sofrem o processo de aquecimento. Um processo de cura acontece e depois disso, caso haja um novo reaquecimento, o material se degrada (KUMAR, 2003).

2.4.1. Compósitos

Algumas características dos plásticos, como a força e a rigidez pode ser aumentada significativamente com a adição de um reforço. Daí então define-se o compósito, que é formado por dois componentes: uma matriz e um reforço formado de partículas ou fibras. Geralmente a matriz tem uma resistência baixa em comparação a um reforço, com características mais rígidas. A função da matriz é apoiar as fibras e transmitir a carga externa, que deve aguentar o máximo possível da tensão aplicada (CRAWFORD, 1998).

São considerados como combinações de materiais diferentes na composição ou na forma em macroescala. Os constituintes mantêm duas respectivas identidades no compósito, ou seja, eles não se fundem ou se misturam completamente entre si, porém, agem em acordo. Comumente, os integrantes podem ser fisicamente identificados pois a combinação é realizada em nível macroscópico e aparecem em, pelo menos, duas diferentes fazes denominadas: matriz e reforço (NETO, 2006).

Os compósitos agem de acordo com o princípio da ação combinada, que diz que as propriedades de um material são dadas pela combinação das propriedades de ambas as fases constituintes. Com isso, cientistas e engenheiros combinam de modo inteligente vários metais, cerâmicas e polímeros para produzir materiais com as melhores combinações de propriedades mecânicas, tais como rigidez, tenacidade e resistências às condições do ambiente e de temperaturas elevadas (CALLISTER, 2012).

Abaixo, na Figura 7, segue um esquema para a classificação de materiais compósitos, que destaca duas divisões principais para os compósitos: reforçados com partículas e reforçados com fibras.

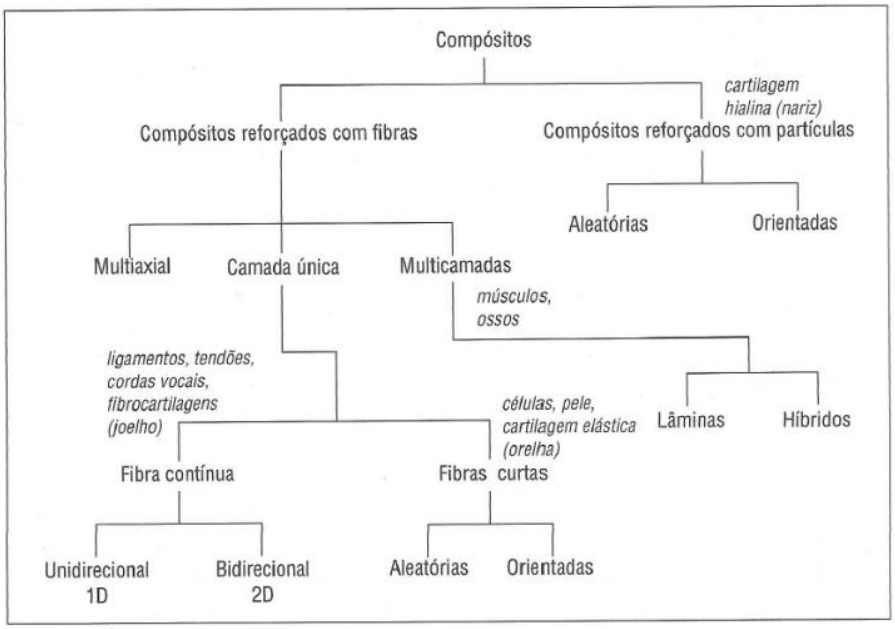


Figura 7 – Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos.
Fonte: NETO, (2006)

A aplicabilidade mais significativa do compósito, é aquela em que o reforço está na forma de fibras. O principal objetivo desses é ter alta resistência e rigidez em relação ao peso total. Essas características aparecem na forma de propriedades como resistência e módulo específicos. A resistência específica corresponde à razão entre o limite de resistência à tração e o peso específico, já o módulo específico é calculado pela razão entre o módulo de elasticidade e o peso específico (CALLISTER, 2012).

Importantes em diversos setores, como o da aviação, onde as fibras de carbono têm grande aplicabilidade, devido à alta resistência e baixo peso específica (ambas até cinco vezes maior que a do aço), os compósitos aumentam a cada dia sua usabilidade na indústria, de um modo geral.

a) Compósitos Com Matriz Polimérica

Também chamados de PMC (*Polymer Matrix Composites*), possuem uma resina polimérica como fase matriz, adicionados a fibras de reforço, tais como: vidro, carbono ou aramida. Através de suas principais propriedades, que são a resistência e rigidez, empregam-se em grande quantidade à temperatura ambiente, além de terem a

facilidade de fabricação e baixo custo (MALLICK, 2007).

b) Resina epóxi

Classificados como plásticos de estrutura rígida e termorrígidos, tem alto desempenho sendo utilizadas em vários setores da indústria, como a da eletrônica, embalagem, construção civil etc. A aplicabilidade se dá, na maior parte das vezes em equipamentos para indústria química, compósitos estruturais e adesivos. Dentre as mais difundidas, têm como base o diglicidil éter do bisfenol A, conhecido como, DGEBA, cuja estrutura básica é esquematizada na Figura 8 (NETO, 2006).

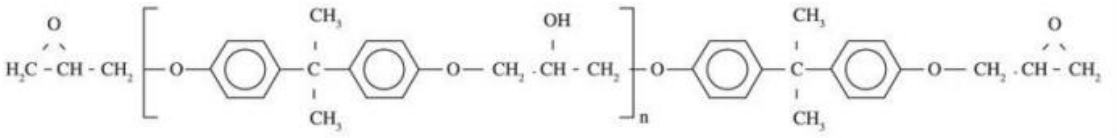


Figura 8 – Estrutura química de uma resina epóxi DGEBA
Fonte: NETO, (2006)

Hoje em dia existem inúmeros agentes aceleradores de cura no processamento de resinas epóxi, afetando as propriedades, sejam químicas ou físicas do material a ser curado. O processo de polimerização da cura de polímeros termorrígidos transforma a resina de estado líquido para estado sólido e se inicia na adição de pequenas quantidades do agente de cura, antes mesmo de incorporar fibras na mistura líquida, gerando um aumento no peso molecular do referido polímero.

Outra definição para a cura é um processo que provoca a mudança de propriedades de uma resina, através de reações químicas. De um modo geral, o aumento a resistência à tração e a estabilidade da temperatura acontecem, enquanto a tensão de ruptura é reduzida (NETO, 2006; CALLISTER, 2012).

Não somente a quantidade do agente curador deve ser levada em conta, como o tempo e a temperatura do ambiente no processo, também. Para alguns agentes a mesma ocorre a temperatura ambiente, para outros já há demanda de aquecimento. Já em outras vezes a adição de aceleradores de cura se faz necessária, numa reação que está tendo uma lenta cura, por exemplo (MALLICK, 2007).

Essa estequiometria da mistura é determinante para que sejam definidas quais propriedades do material se deseja obter. Obviamente o ideal é que haja uma mistura homogênea para que haja a reação de cura de forma completa, otimizando as

propriedades da mistura (NETO, 2006).

Muitas das pesquisas com o polímero DGEBA atualmente, tangem ao descobrimento de elementos que quando adicionados aumentem a resistência mecânica, a temperatura, pressão e outras variáveis, assim como os mecanismos da cura de tal.

O estudo de adição da diamina aromática, a 3,3-Bis(4-(4-aminofenóxido)fenil)ftalida (BAPP), conforme Figura 9, ao diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA) mostrou que quando há o excesso de BAPP na ordem de 10% na composição da mistura, há aumento na faixa de temperatura de transição vítrea (Tg) (REN, 2016).

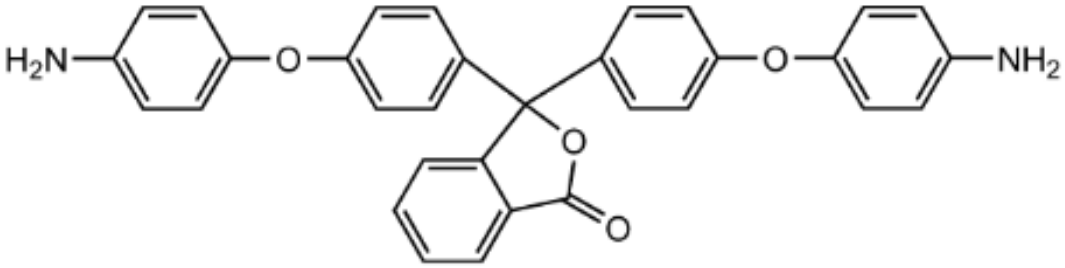


Figura 9 – Estrutura química da BAPP
Fonte: REN *et al*, (2016)

Quando misturada ao agente de cura, Poli 3-Hidroxibutirato (PHB), sob várias proporções e exposta a várias temperaturas, o composto apresentou diferenças no crescimento esférico, quando exposto a temperaturas superiores a 80°C (TOGNANA, 2015). A adição de Poliéter Hiper Ramificado Epóxi Terminado (EHBPE) em pequenas quantidades na mistura (apenas 5%), mostrou um grande aumento de resistência a corrosão do próprio polímero, aumentando a vida útil, seja quando utilizado como camada protetora ou reparo (MIAO et al, 2018), conforme Figura 10.

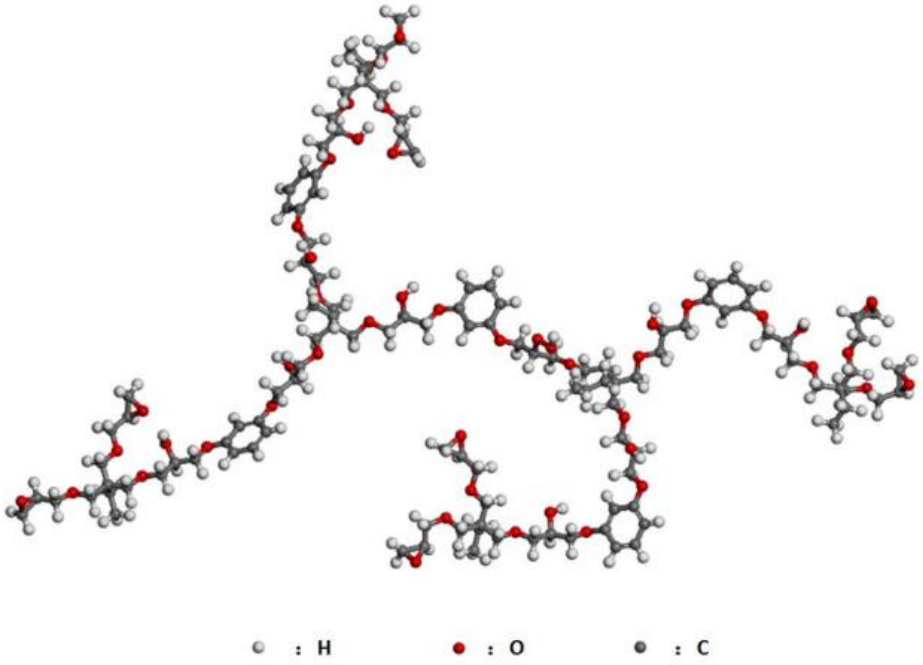


Figura 10 – Estrutura química do EHBPE
Fonte: MIAO *et al*, (2018)

Além das pesquisas com polímeros específicos, para melhora de certas propriedades, a utilização de polímeros como elementos de proteção a substratos metálicos, é utilizada comumente na indústria, de uma forma geral. Porém ao mesmo tempo em que tem essa função, em alguns casos o próprio polímero ataca o metal, provocando o início de um processo corrosivo. Atualmente está sendo estudado um modelo alternativo, no qual ao invés de somente uma camada de polímero, duas camadas são utilizadas: um filme passivo de Polipirrol (PPy) sobre o aço, com estrutura química conforme Figura 11, cuja função é a diminuição da ação de íons ao metal, enquanto uma segunda camada, também de Polipirrol auxilia no controle da permissibilidade da seletividade iônica dos íons de ácidos orgânicos (OHTSUKA, 2012).

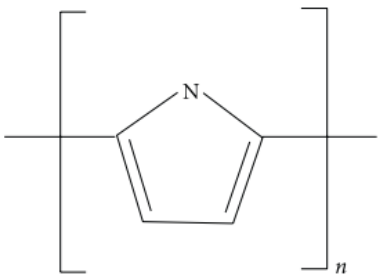


Figura 11 – Estrutura química do Polipirrol (PPy)
Fonte: OHTSUKA, (2012)

2.4.2. Adesivos estruturais

Ligação adesiva estrutural é a colagem para aplicações em que os aderentes (os objetos que estão sendo ligados) podem experimentar grandes tensões até o ponto de produção. As ligações adesivas estruturais devem ser capazes de transmitir estresse sem perda de integridade dentro dos limites do projeto (EBNESAJJAD, 2008).

A principal função do adesivo é: “a de manter ligadas as estruturas e de serem capazes de resistir a cargas elevadas sem grande deformação” (DA SILVA, 2007).

Em geral são classificados conforme sua composição química, dividindo-se em termoendurecíveis, termoplásticos e elastômeros. Para esse caso, em particular, os termoendurecíveis geralmente são aplicados em projetos estruturais, cuja característica principal é a de que não podem ser aquecidos e curados repetidas vezes após o primeiro processo de cura.

a) Adesivos Epóxi

Tendo como característica mais marcante a versatilidade, devido a diversos substratos e boa aderência, além de possuir excelente resistência a tração e umidade, os adesivos epóxi podem também ser comercializados sob a forma de um ou mais componentes. A Tabela 3, a seguir, ilustra as principais características:

Tabela 3 – Principais características dos epóxidos bicomponentes
Fonte: NETO, (2006)

Forma		2 partes em pasta
Método e aplicação		Mistura manual, mistura e aplicação automática
Cura		Temperatura ambiente (pode ser acelerada com a temperatura)
Temperatura de serviço		de -40°C a 100°C
Vantagens		Resistência e durabilidade
Desvantagens		Cura lenta. Mistura (bolhas)
Resistência ao meio ambiente	Água	Boa
	Solvente	Boa
	Óleo	Boa
Saúde e segurança		Dermatose, problemas respiratórios
Aplicações		Aviões, helicopteros, carros, comboios, artigos desportivos...

2.4.3. Envelhecimento de Polímeros

Por conta da alta diversidade de propriedades, como inércia química e biológica, boas propriedades adesivas e elétricas, assim como estabilidade estrutural e baixa permeabilidade, assim como a virtude de ter uma seleção adequada dos reagentes e processos de cura, as resinas epóxi são grandemente difundidas comercialmente (MAY, 1988).

As propriedades desejáveis das resinas normalmente aparecem após a cura, sendo que estas podem modificar-se por consequência do transporte, armazenamento e utilização destes materiais. As etapas de cura transformam os reagentes epoxidílicos de baixa massa molar em um material altamente reticulado com estrutura tridimensional, a qual envolve segmentos da resina e do agente de cura (ou endurecedor).

O processo que levará estes materiais a, espontaneamente, densificarem-se no sentido de atingirem um estado de equilíbrio metaestável (relaxação estrutural) denomina-se envelhecimento físico e, portanto, ocorrerá em todos os materiais vítreos, quer sejam poliméricos, monoméricos, orgânicos ou inorgânicos (STRUIK, 1978, 1986). A influência do envelhecimento físico nas propriedades visco elásticas das resinas epóxi baseadas no DGEBA foi bastante estudada, pois esta resina serve como modelo no estudo das estruturas reticuladas (MCKENNA, 1995).

A relaxação estrutural é conseqüência do estado de não equilíbrio do estado vítreo, e a velocidade de ocorrência deste processo depende da temperatura, da pressão e da história do material vítreo. Todas as propriedades que dependem do volume específico (ou do volume livre) se alteram durante este processo e, portanto, o envelhecimento físico possui importância prática na determinação das propriedades de engenharia destes vidros.

Com a grande difusão da utilização de materiais de diferentes composições, como metais e resinas, assim como a própria utilização do último elemento exclusivamente, levou alguns pesquisadores a estudar as condições de utilização delas ao limite. A câmara de névoa salina (*salt spray chamber*) é um equipamento que tem auxiliado os pesquisadores nesse aspecto. Com ela, já foi possível descobrir que há evidências de uma relativa equivalência entre a exposição natural a condições atmosféricas com a exposição controlada e artificial: 3 meses podem ser mais prejudiciais para ligações adesivas do que a exposição a condições semi-tropicais de alta umidade por três anos (ADAMS, 2005).

2.4.4. Teoria da Adesão

Para melhor entendimento de juntas coladas e adesivos, é necessario falar sobre teoria da adesão. Ao longo do tempo, as mais diversas teorias já foram desenvolvidas para explicar tal fenômeno. A adesão se refere a um estado em que dois corpos distintos estão em contato e uma força ou trabalho mecânico pode ser transferido através da superfície de contato, conforme pode ser visto na Figura 12 (EBNESAJJAD, 2008).

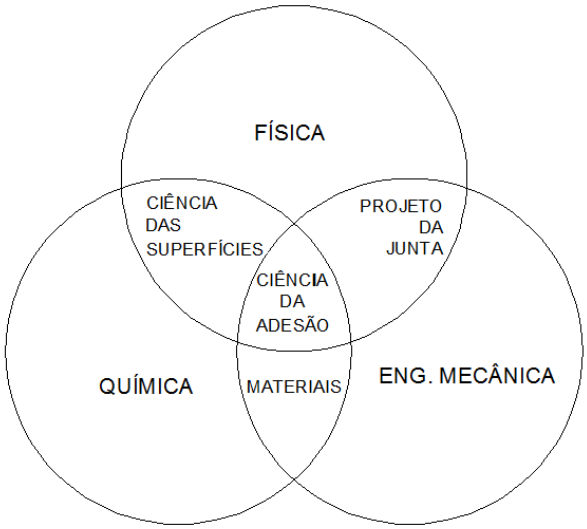


Figura 12 – Áreas envolvidas na Ciência da adesão Adaptada
Fonte: Da Silva, (2007)

A complementação de forças mecânicas, químicas e físicas que se sobrepõe são a principal função de um adesivo. Estudos indicam que existem quatro teorias gerais de adesão: mecânica, adsorção, difusão e eletrostática. Hoje em dia outras teorias vêm sendo difundidas, descrevendo o mecanismo de ligação, como ligações químicas e molhabilidade. Isso se deve ao fato de ser muito impreciso afirmar que este tipo de ligação depende unicamente de uma teoria (EBNESAJJAD, 2008 e DA SILVA, 2007).

Duas superfícies são unidas por forças interfaciais, as quais podem consistir de forças de valência ou forças de ancoramento mecânico ou ambas (ASTM D 907, 2015).

Como em qualquer tipo de junção, a adesão das juntas coladas pode sofrer falhas, que se dividem em dois tipos: adesiva ou coesiva, conforme mostrado na Figura 13a e 13b). Como característica marcante, a falha adesiva tem uma perfeita separação das duas fases da interface (embora isso não seja realmente possível), já na coesiva há a ruptura total do filme (substrato), sempre fora da região de interface da junta.

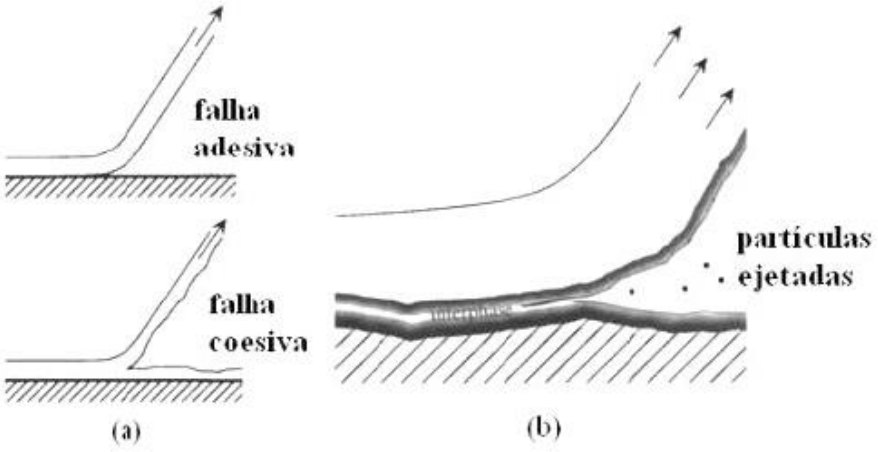


Figura 13 – (a) Falhas adesivas e coesivas e (b) ejeção de partículas.
Fonte: PONCIUS, (2002) - Adaptado

a) Teoria Mecânica

A adesão ocorre pela penetração do adesivo nos poros, cavidades, e outras irregularidades encontradas na superfície do substrato (EBNESAJJAD, 2008). O aumento da adesão através desse tipo de ligação pode ser adjudicado ao aumento da área interfacial devido à rugosidade da superfície e no quanto as características do substrato permitirão a penetração do adesivo nos poros e cavidades do substrato (SCHULTZ, 1994). A Figura 14, demonstra esse processo.



Figura 14 – Explicação esquemática da teoria da adesão mecânica
Fonte: DUNCAN, (1999)

b) Teoria de Adsorção

Dividida em duas escalas de ação, nível molecular (através da molhabilidade) e, nível atômico (ligação química), a teoria da adsorção já é muito difundida no meio científico.

A adsorção depende fundamentalmente do uso de forças de superfície, contanto que as moléculas do adesivo e do substrato fiquem próximas o bastante umas das outras com as forças de Van der Waals promovendo a adsorção física (DA SILVA, 2007). A adsorção química acontece pelas interações ácido-base e ligações de hidrogênio. Ambos aparecem na Figura 15 a seguir.



Figura 15 – Representação geral da Teoria da Adsorção;
Fonte: DUNCAN, (1999)

c) Teoria da difusão

Essa importante teoria de adesão de materiais poliméricos, não é aplicável para ligações de adesivos com metais, pois sugere que há uma interdifusão feita através de moléculas, entre o adesivo e o substrato, conforme Figura 16. Esse fenômeno envolve a resistência da junta e irá depender de diferentes fatores, como tempo de contato, temperatura, natureza e peso molecular dos polímeros (SCHULTZ, 1994).

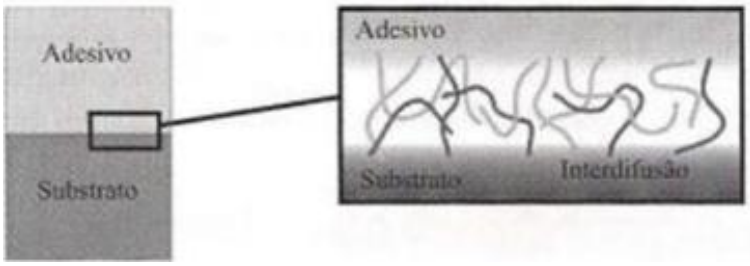


Figura 16 – Explicação esquemática da teoria da difusão
Fonte: Da SILVA, (2007)

d) Teoria eletrostática

A força eletrostática, é formada numa dupla camada elétrica formada pelas cargas negativas e positivas mutuamente atraídas, gerando forças que são responsáveis pela resistência à separação, conforme ilustrado pela Figura 17. Esta teoria é comprovada pelo fato de serem notadas descargas elétricas ao realizar a separação do adesivo ao substrato (EBNESAJJAD, 2008).

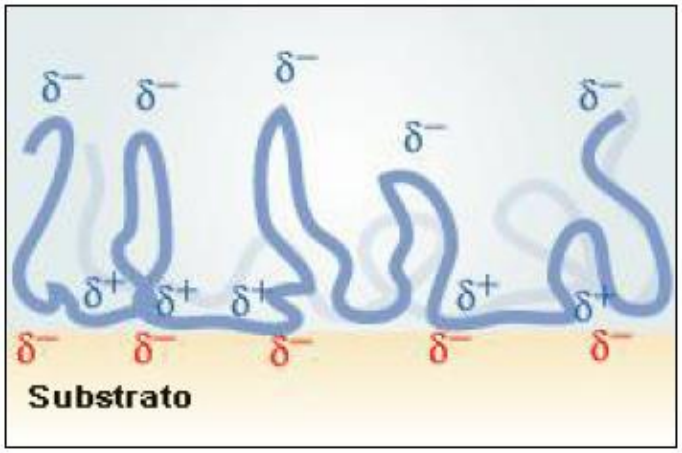


Figura 17 – Explicação esquemática da teoria eletrostática
Fonte: DUNCAN, (1999)

2.4.5. Medição da Adesão (Arrancamento)

As falhas na adesão, a formação de trincas no filme ou até mesmo no substrato pode ocorrer numa delaminação, mostrando a importância em se definir as tensões dispostas numa junta combinada por diferentes materiais, auxiliando assim na prevenção de falhas. Quando a distribuição das tensões é pré-determinada em uma estrutura composta, resultante de um esforço externo, a junta pode ser dimensionada a respeito de quais materiais escolher, assim como suas respectivas espessuras (EBNESAJJAD, 2008).

Ao ser submetida ao esforço de tração, uma junta pode ser considerada como uma estrutura composta de variados materiais em série. O que significa que cada material sofre o mesmo esforço, com cada um se deformando respeitando sua rigidez (HIBELLER, 2004). A variação da tensão será na proximidade da interface, pois obedecerá a diferença de rigidez entre o filme e o substrato. Nessa variação, podemos citar três tipos de rigidez: no substrato, na interface e no filme fino. Outro fator

complicador para determinação da adesão é a heterogeneidade em estruturas que exibem mais de uma fase.

Outro fator determinante para medir a adesão, independentemente do método direto, é separar as tensões normais das cisalhantes, medindo assim uma tensão de adesão após a outra. Entretanto, a norma descreve que o ensaio de medição da tensão normal de adesão (ASTM D5179, 2016) confere que o filme deve falhar por cisalhamento para que se delamine a interface. Ainda assim, a carga externa fica dividida entre as áreas do filme sobre o substrato (área de carregamento normal) e a do filme sobre o filme (área de carregamento tangencial).

É muito importante que se conheça a tensão normal no ensaio de resistência à adesão, pois sem ele é impossível utilizar os critérios de resistência de uma maneira convincente no projeto de um material.

O emprego de um polímero polar e um apolar pode ser uma maneira de validar um método proposto experimentalmente, partindo-se do pressuposto que a adesão em polímeros polares é comumente maior que nos apolares (NOVAK, 1999). Para atingir-se a tensão normal, é essencial que ocorra o arrancamento do filme sobre o substrato, pelo emprego de um pino de tração colado sobre o filme (ASTM D5179, 2016), conforme mostra a Figura 18.

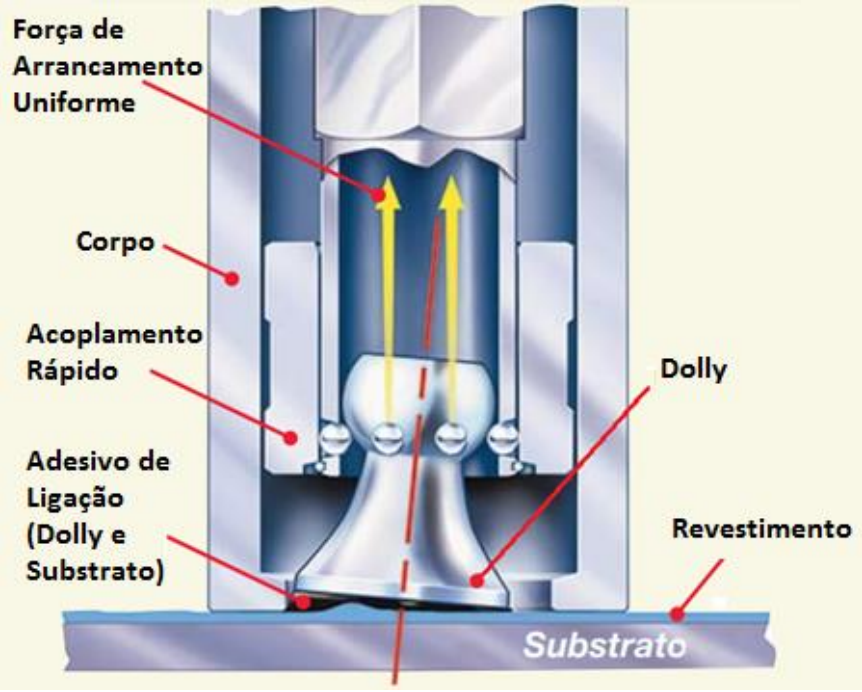


Figura 18 – Desenho esquemático de ensaio de arrancamento do filme fino do substrato, através do pino de tração. Adaptado
Fonte: Folha de Dados (PosiTest A)

A relação entre a dureza do filme e o substrato causa uma distribuição diferente de tensões cisalhantes no composto, já que o módulo de elasticidade tem relação direta com esta propriedade (HIBELLER, 2004). A partir da nanodureza, já é possível identificar a dureza de um filme fino (10 nm a 1800 nm de espessura), assim como o módulo de elasticidade e a comparação destas propriedades com as do substrato (LI, 2006). Obviamente, quanto maior a dureza, maior a capacidade de receber cargas, havendo uma proporcionalidade entre rigidez e tensão.

Como o fino filme metálico tem rigidez superior à dos polímeros aplicados, a interface obtém a maior grandeza de tensões. Já compósitos que tenham diferença considerável de módulo de elasticidade, devem ser projetados com uma camada suficiente para que o mais resistente alivie a interface das tensões de cisalhamento (HIBELLER, 2004). Como exemplo, podemos citar os metais e polímeros, que são objeto do nosso estudo, que têm muito pouca semelhança estrutural, pois a energia coesiva dos metais é geralmente duas ordens de grandeza maior que a dos polímeros, e por essa razão têm fraca interação entre ambos. Outro fator relevante é que a superfície dos polímeros é, geralmente, apolar e baixa energia superficial (V. BECHOTOLSHEIM, 1999) (KONG, 2001).

Contudo, mesmo com tantas diferenças estruturais, existem tratamentos superficiais para metais que modificam e aumentam a adesão, como: ataque químico (BAG, 1999), tratamento corona (BRIGGS, 1980), tratamento com plasma (LADIZESKY, 1983), (PIHAN, 2009), bem como por radiação gama, aplicação de luz ultravioleta (UV), feixe de elétrons ou de íons. Para polímeros, o tratamento de plasma, já bem difundido, forma compostos oxidados no substrato polimérico, aumentando a adesão do polímero no metal (V. BECHOTOLSHEIM, 1999).

Outros fatores que devem ser levados em consideração para a resistência e vida útil da adesão, são: umidade, tempo de cura e condições de exposição do reparo (MIKAMI, C. *et al*, 2015). A temperatura é um dos fatores com maior importância, dentre os citados, afetando diretamente a resistência da junta colada (SOUZA, 2012).

3. Materiais e Métodos

3.1. Materiais

3.1.1. DGEBA (Belzona® 1111)

Para o estudo em questão foi utilizado um compósito comercial, aplicado em reparos e reconstruções poliméricas de tubulações e outros equipamentos na indústria em geral e principalmente na do petróleo, denominado Belzona®. Também utilizado como um adesivo de alta resistência para simples adesão ou, por exemplo, para criação de calços de rolamento de carga irregular. Tem boas características de isolamento elétrico, fabricação de equipamentos originais ou situações de reparo.

Tem ótimos resultados para curva de fluência, resistência de junta e vida estática para longa duração, quando comparado a outros materiais semelhantes, como o Epidian® 57 (ROÉKOWICZ, 2011).

O DGEBA – Diglicidil-éter de Bisfenol A é uma resina epoxídica, produto da reação de sinterização bisfenol A com epicloridrina em presença de um catalisador básico. Na figura 19, podemos analisar a estrutura química desta substância. O bisfenol A é empregado como reagente hidroxilado (COSTA, 2009).

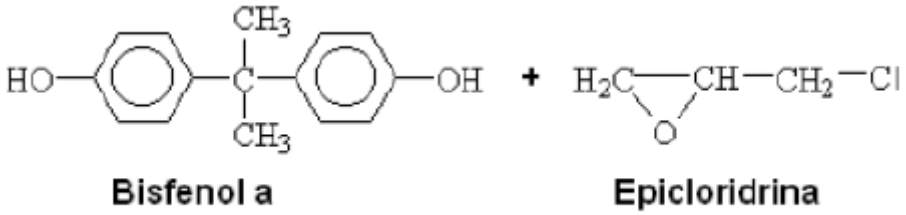


Figura 19 – Componentes que são originários da estrutura química da DGEBA
Fonte: Costa, (2009)

O DGEBA é um polímero termoplástico antes de passar pelo processo de cura (COSTA, 2009). Quando submetido a este, transforma-se em termorrígido, através ação dos agentes de cura ou, como são conhecidos, endurecedores. Este processo pode ser realizado tanto à temperatura ambiente como a altas temperaturas, dependendo dos produtos iniciais utilizados no processo ou das propriedades desejadas do produto final.

Depois de finalizado o processo de cura, o material apresentará ótima resistência aos ácidos inorgânicos e aos mais comuns álcalis com concentrações de até 10%. Também é resistente a óleos minerais, hidrocarbonetos, óleos lubrificantes e muitos

outros produtos de origens similares normalmente encontrados. Resinas fenólicas, aminas, poliamidas, anidridos, e polimercaptana são os endurecedores comumente usados para curar epóxi. A utilização de cada um, dependerá da aplicação do mesmo.

Abaixo a Tabela 4 mostra as características, como cada descritivo da Belzona® 1111.

Tabela 4 – Propriedades Características da Belzona® 1111
Fonte: Folha de Dados do Fabricante

Característica	Descritivo
Abrasão	Determinado de acordo com a ASTM D4060, com carga de 1kg é tipicamente de 852 mm³ de perda por 1000 ciclos, úmido e de 24 mm³, seco.
Adesão	Quando testado, segundo ASTM D1002 e usando tiras desengorduradas e jateadas para um perfil de 75-100 microns, tem uma tensão admissível de 11,4 MPa a 20,4 Mpa, para os metais de utilização mais comuns na indústria, ferrosos ou não.
Compressão	Seguindo procedimentos da ASTM D695, com peças de prova de 25,4 mm/1” de espessura, tem resistência máxima de 114,8 MPa.
Corrosão	Não mostra sinais de corrosão, para ensaios visuais, após 5000 horas de exposição a cabine de névoa salina, segundo previsto na ASTM B117.
Dureza	Se testado de acordo com a ASTM D2240 (Shore D), o valor típico obtido é 84.
Flexão	Obedecendo a ASTM D790 e a 100°C de temperatura de cura, tem resistência de até 98,6 MPa.
Impacto	De acordo com a ASTM D256, resiste (até 100°C de temperatura de cura) a até 39J/m.
Térmica	Testado de acordo com a ASTM D648 (tensão de fibras de 264 psi), resiste a até 91°C, quando a temperatura de cura é de 100°C.
Tração	A resistência à fadiga à tração de acordo com a ASTM D3166, à temperatura ambiente e com 30% de tensão estática aplicada é maior que 1.000.000 de ciclos.



Figura 20 – Belzona® 1111
Fonte: https://www.belzona.com/pt/

O produto em questão é fruto de uma mistura entre o elemento base (Figura 17) e o elemento solidificador (Figura 21). A proporção da mistura em peso é de 5 : 1 (base : solidificador), tendo a forma de pasta (Figura 22) e densidade aproximada de 2,41 g/cm³ a 2,61 g/cm³ (FOLHA DE DADOS BELZONA®).



Figura 21 – Elemento base da Belzona® 1111
Fonte: Foto de laboratório



Figura 22 – Elemento Solidificador Belzona® 1111
Fonte: Foto de laboratório

Abaixo, na Tabela 5, as propriedades mecânicas do produto, após o processo de cura ocorrer à 20ºC.

Tabela 5 – Propriedades Mecânicas da Belzona® 1111
Fonte – Folha de Dados do Fabricante

Resistência a Flexão (MPa)	63,0
Resistência a Tração (MPa)	34,3
Resistência a Compressão (MPa)	86,4
Módulo de Young (MPa)	8681
Módulo de Flexão (MPa)	7199
Módulo de Compressão (MPa)	1217
Resistência ao Cisalhamento (MPa)	19,2
Dureza (Shore D)	84

3.1.2. Aço ASTM A-283 Grau C

O aço carbono utilizado neste trabalho foi ASTM A-283 Gr. C, obtido através de cortes de chapas utilizadas na montagem de tanques de armazenamento de combustíveis, especificamente no terminal de distribuição da Ipiranga Produtos de Petróleo localizado na Cidade de Campo Grande, Mato Grosso do Sul.

Este tipo de aço tem finalidade

Estes corpos de prova, cujas dimensões são 140mm (largura) x 95mm (altura) x 7mm (espessura), estavam expostos as condições atmosféricas locais, onde gerou-se corrosão superficial nos mesmos.

O A-283 Gr. C é um aço Cromo-Molibdênio (C-Mn), com moderada resistência, excelente soldabilidade e definido como de tipo estrutural. Seu alongamento pode chegar a 20%, com limite de resistência a tração variando entre 380 MPa e 515 MPa e densidade de 7,8 g/cm³, conforme descrito na tabela 6.

Tabela 6 – Especificação Técnica Aço ASTM A283 GR. C
Fonte: Catálogo de Aços Usiminas

Especificação	**Grau**	**Faixa de Espessura (mm)**	**Composição Química (% em massa)**					**Propriedades Mecânicas**			
								LE (MPa) YP	**LR (MPa) TS**	**Alongamento**	
			C	**Sl**	**Mn**	**P**	**S**			**BM (mm)**	**%**
ASTM A283	C	6,00 ≤ E ≤ 38,10	0,24 (máx)	0,40 (máx)	0,90 (máx)	0,035 (máx)	0,040 (máx)	205 (mín)	380 - 515	200	20
		38,10 ≤ E ≤ 101,60		0,15 - 0,40							

3.2. Métodos

3.2.1. Preparações de Superfície

Os corpos de prova foram divididos conforme a preparação de superfície a qual foram submetidos, conforme Figura 23:

- Corpo de prova não submetido a reparo algum: “Como Recebido”;
- Corpo de prova submetido a técnica de lixamento (lixa 100): “Lixado”;
- Corpo de prova submetido a técnica de escovamento rotativo: “Escovado”;
- Corpo de prova submetido a técnica de jateamento: “Jateado”;

Os processos de lixamento e escovamento foram feitos no laboratório LAMAT do CEFET/RJ. Já o processo de jateamento foi feito no laboratório da UFF/RJ, utilizando granalhas de aço do tipo G.40.

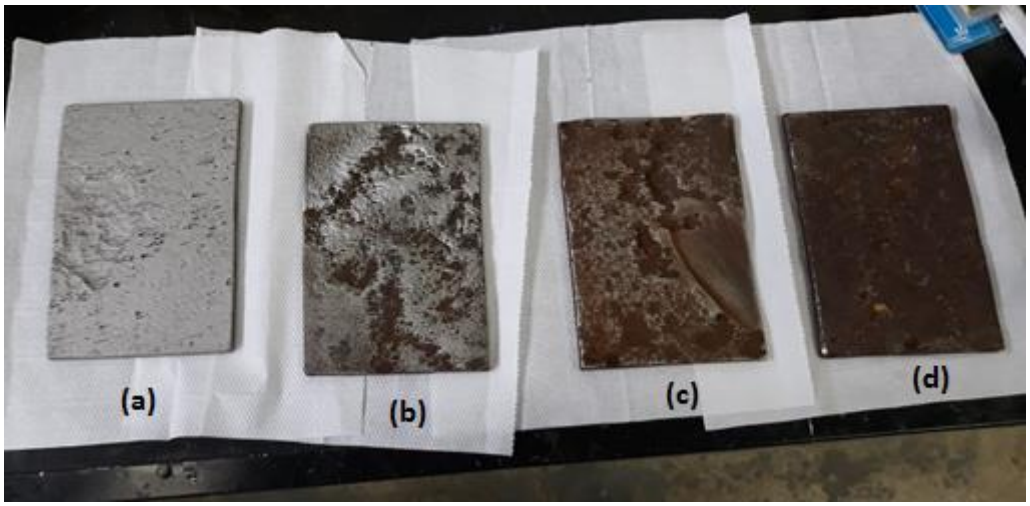


Figura 23 – Amostras após preparação de superfície:
Jateada (a), Escoava (b), Lixada (c) e Como Recebida (d)
Fonte: Foto de Laboratório

Além dos corpos de prova, foram utilizados dollys, elementos mecânicos que auxiliaram no processo de medição da adesão (*pull-off*), que será explanado mais a diante. A face inferior destes elementos, que ficam em contato direto com a Belzona®, também foram submetidas ao jateamento, com as mesmas especificações do corpo de prova homônimo, conforme Figura 24.



Figura 24 – Detalhe Dolly Jateado
Fonte: Foto de Laboratório

3.2.2. Medição de Perda de Espessura

Após tratamentos de superfície para os corpos de prova, foi feita a medição das perdas de espessuras. Para tal, utilizou-se um rugosímetro, cujo relógio apalpador é da marca EING TOOLS, conforme ilustrado na figura 25. Sua resolução é de 0,01 μm e a agulha do apalpador possui raio de ponta de 5 μm, com força de medição de 4 mN. De forma a ter maior precisão nos dados medidos, foram feitas 5 medições por corpo de prova.



Figura 25 – Medição de Perda de Espessura
Fonte: Foto de Laboratório

3.2.3. Aplicação de Reparo

Após a preparação de superfície das chapas e a mistura dos entre os elementos base e solidificador da Belzona® 1111, conforme especificação técnica do fabricante, o mesmo foi aplicado sobre os quatro corpos de prova, conforme Figura 26. O objetivo foi recompor a espessura das chapas com a camada adesiva.



Figura 26 – Mistura/Aplicação de Belzona® 1111 nos Corpos de Prova
Fonte: Foto de Laboratório

Após aplicação do reparo polimérico, os dollys que já haviam sido jateados anteriormente foram colados na superfície reparada. Para o método de união entre Dolly-Belzona® foi utilizada a resina ResinLab EP11HT Gray®, conforme instruções do fabricante.

3.3. Ensaios & Análises

3.3.1. Envelhecimento

O teste de envelhecimento dos corpos de prova analisados, foram realizados no Laboratório LABCORR da UFRJ. Nele, os corpos de prova foram expostos ao teste de envelhecimento em névoa salina, no qual foram simuladas condições de corrosão atmosférica/marítima, por imersão das amostras em água destilada (5% NaCl) à 35°C, sob pressão atmosférica. O Ph da solução (a 25°C) ficou na faixa de 6,5 a 7,5, pelo tempo máximo de 10 dias (240h) e vazão de 2 a 3 m³/h, respeitando aos procedimentos previstos na ASTM D5229 (2014).

O ensaio foi realizado em uma máquina Equilam, modelo SS 600E, conforme mostrado nas Figuras 27 e 28, de acordo com a metodologia descrita na norma ASTM B117 (2018).



Figura 27 – Câmara de Névoa Salina
Fonte: Foto de Laboratório



Figura 28 – Detalhe de Modelo da Câmara de Névoa Salina
Fonte: Foto de Laboratório

Os corpos de prova foram inseridos na câmara e feitas amostras visuais, com a seguinte periodicidade pré-definida: 48h, 72h, 168h, além das 240h, momento de finalização do ensaio, conforme as Figuras 26, 27, 28 e 29.

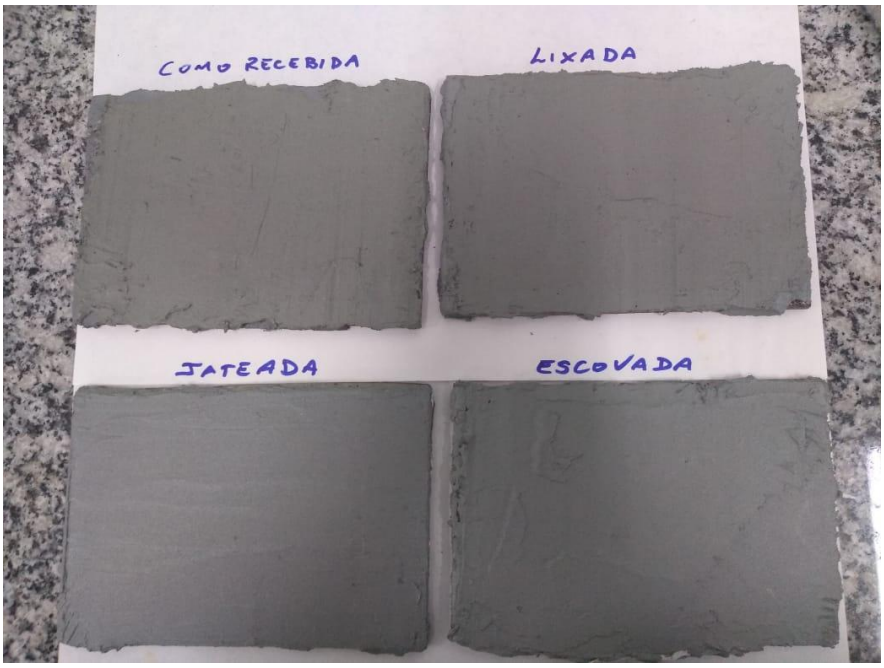


Figura 29 – Amostras Pré-Envelhecimento
Fonte: Foto de Laboratório

3.3.2. Arrancamento

O ensaio de arrancamento testou a qualidade da resistência do reparo e a adesão entre o substrato e o compósito Belzona® 1111. Assim sendo, esse tipo de ensaio será realizado com junta nas condições ambientes semelhantes às que estará exposta em trabalho real, para que os resultados obtidos sejam os mais fiéis possíveis. O mesmo ocorreu na máquina PosiTest AT-A, no Laboratório LADES, do CEFET/RJ, conforme Figuras 30 e 31.



Figura 30 – Detalhe de Modelo da Máquina de Teste de Adesão
Fonte: Foto de laboratório

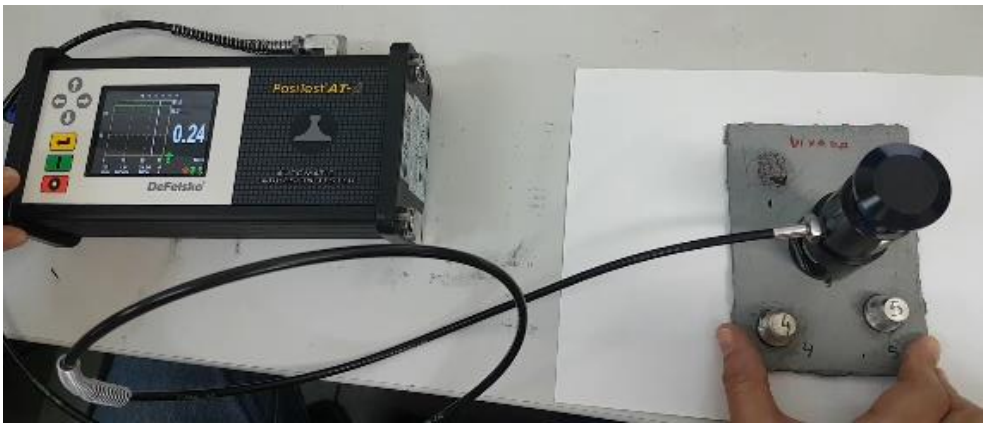


Figura 31 – Máquina de teste de Adesão PosiTest AT-A
Fonte: Foto de Laboratório

Foi utilizado um equipamento para aplicação de força trativa de 1.00 MPa/s a cada dolly (pino), cujo diâmetro é de 20mm. Após o comando de início dado, a máquina aplica a força, gerando um resultado que mostra o tipo de falha, seja ela coesiva ou adesiva, sempre respeitando os procedimentos previstos na norma ASTM D4541 (2017).

Os quatro corpos de prova foram preparados para o ensaio de adesão com cinco dollys colados em sua superfície, conforme Figuras 32, 33, 34 e 35.

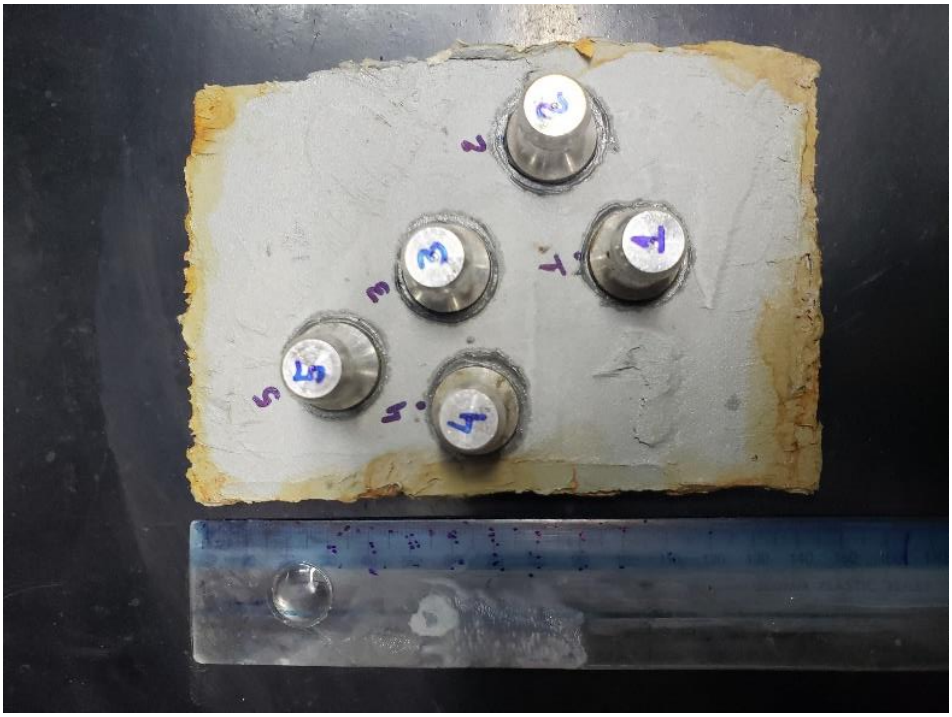


Figura 32 – Corpo de Prova Escovado
Fonte: Foto de Laboratório



Figura 33 – Corpo de Prova Lixado
Fonte: Foto de Laboratório



Figura 34 – Corpo de Prova Como Recebido
Fonte: Foto de Laboratório



Figura 35 – Corpo de Prova Jateado
Fonte: Foto de Laboratório

3.3.3. Microscopia Otica (MO) e Eletrônica por Varredura (MEV FEG)

Foram utilizadas as técnicas de microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) na avaliação das fraturas e nos aspectos das superfícies dos revestimentos.

A Microscopia Ótica teve o objetivo de identificar defeitos superficiais e defeitos como inclusões, porosidades, forma e aspecto dos quatro corpos de prova. O mesmo utilizou uma *Lupa Estereoscópica* PZO da marca Labimex e câmera Olympus UC50 modelo U-TV0.5XC-3, instalado no Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ, conforme ilustrado na Figura 36a.

Para fins de verificação da influência dos tratamentos de superfície na adesão do reparo ao metal e das superfícies de fratura após o ensaio de *pull-off*, foi também realizada a microscopia eletrônica de varredura com emissão de campo (MEV-FEG), com o modelo JSM – 7100 F – JEOL, do laboratório multiusuário de nano fabricação e caracterização de nano materiais, NANOFAB, Universidade Estadual do Rio de Janeiro – UERJ, conforme figura 36b.



Figura 36 – (a) Microscópio Ótico (b) Microscópio Eletrônico por Varredura
Fonte: Foto de Laboratório

4. Resultados e Discussão

4.1. Medição de Perda de Espessura

Após medição, os resultados indicaram que houve uma variação da média de rugosidade entre 2,914 µm e 4,430 µm, sendo estes extremos para as condições escovada e jateada, respectivamente, conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados da Medição de Perda de Espessura

Como recebido		Lixado		Escovado		Jateado	
Medição (ponto)	**Resultado (µm)**	**Medição (ponto)**	**Resultado (µm)**	**Medição (ponto)**	**Resultado (µm)**	**Medição (ponto)**	**Resultado (µm)**
1	4,33	1	4,08	1	3,19	1	5,14
2	3,16	2	3,24	2	3,18	2	4,55
3	3,7	3	2,57	3	3,17	3	4,52
4	3,48	4	3,68	4	2,28	4	4,27
5	3,23	5	3,85	5	2,75	5	3,67
Média	3,58	Média	3,484	Média	2,914	Média	4,430
Desvio Padrão	0,471	Desvio Padrão	0,596	Desvio Padrão	0,4	Desvio Padrão	0,531

Abaixo, na Figura 37, a representação gráfica do compilado das médias dos resultados descritos acima, para cada uma das 4 condições ensaiadas. Os resultados indicam que a condição jateada foi a mais efetiva na remoção da camada corroída.

O grau de rugosidade adquirido em um processo de preparação de superfície, é um dos parâmetros mais importantes a serem levados em consideração (GHUMATKAR *et al*, 2016), porém não pode ser dado como fator preponderante ao grau de aderência entre adesivo e metal. Outras características, tais como o tipo de interação química, ou adesão que terão, assim como a aplicabilidade do tipo de carga que sofrerão, devem ser levados em consideração.

Além de auxiliar na adesão, MELLO (2016) observou que o tratamento de superfície e o grau de rugosidade têm grande influência na troca de calor entre peças unidas pelo processo de colagem, ou seja, quanto maior a rugosidade, maior a transferência de calor entre ambas.

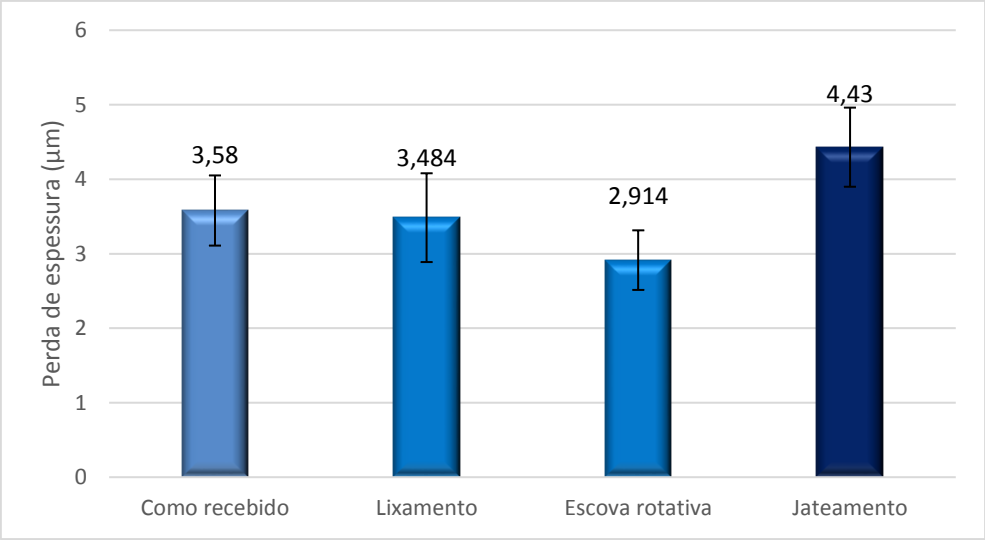


Figura 37 – Resultado Gráfico da Média de Perda de Espessura

4.2. Análise Visual do Ensaio de Envelhecimento por Névoa Salina (*Salt Spray Aging*)

Foi possível observar, através de ensaios visuais (Figuras 38 a 41), que os corpos de prova mostraram poucos pontos de corrosão, sobre o reparo polimérico. Este fenômeno ocorreu principalmente nas amostras “como recebida” e “lixada”.

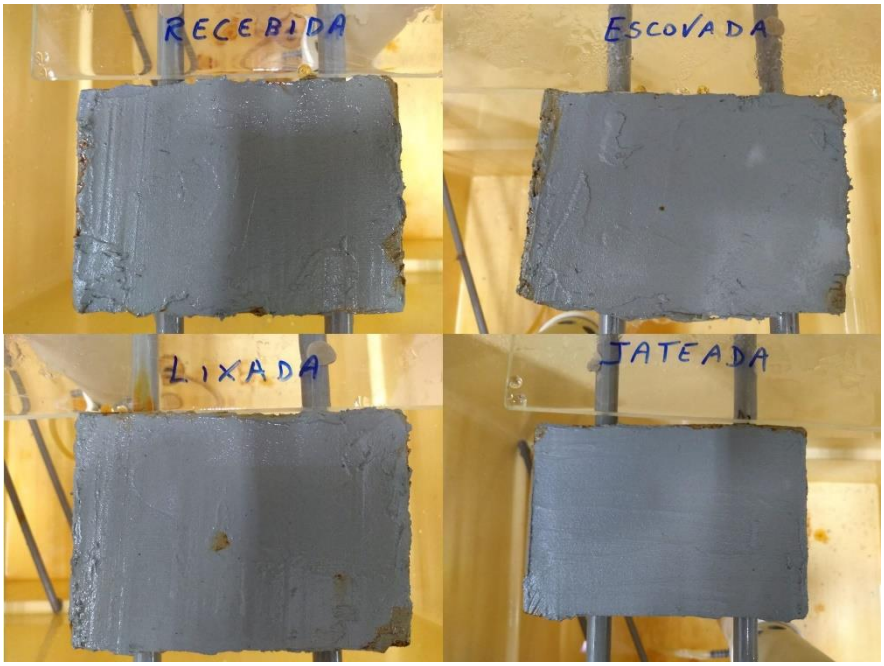


Figura 38 – Amostras após 48h

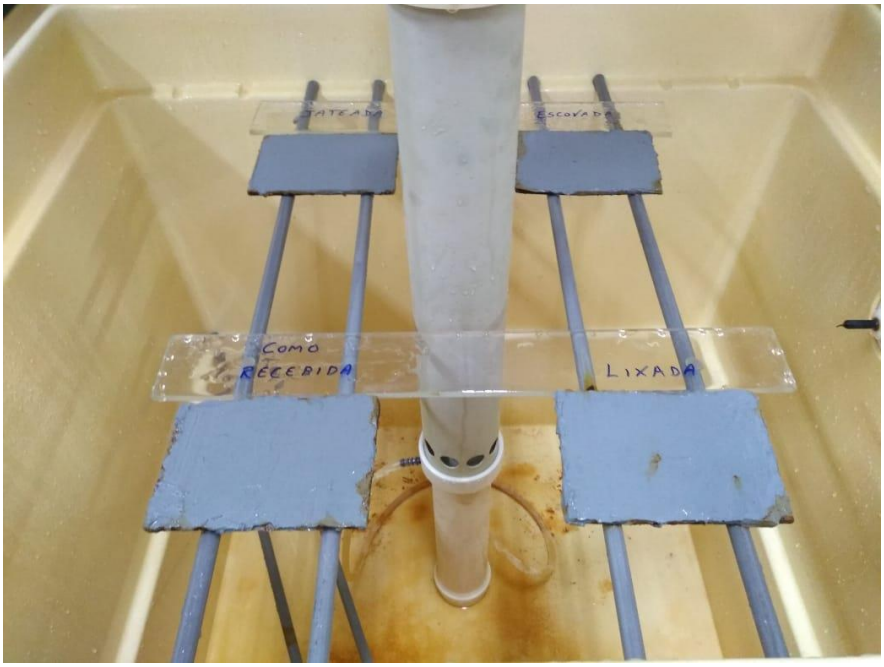


Figura 39 – Amostras após 72h

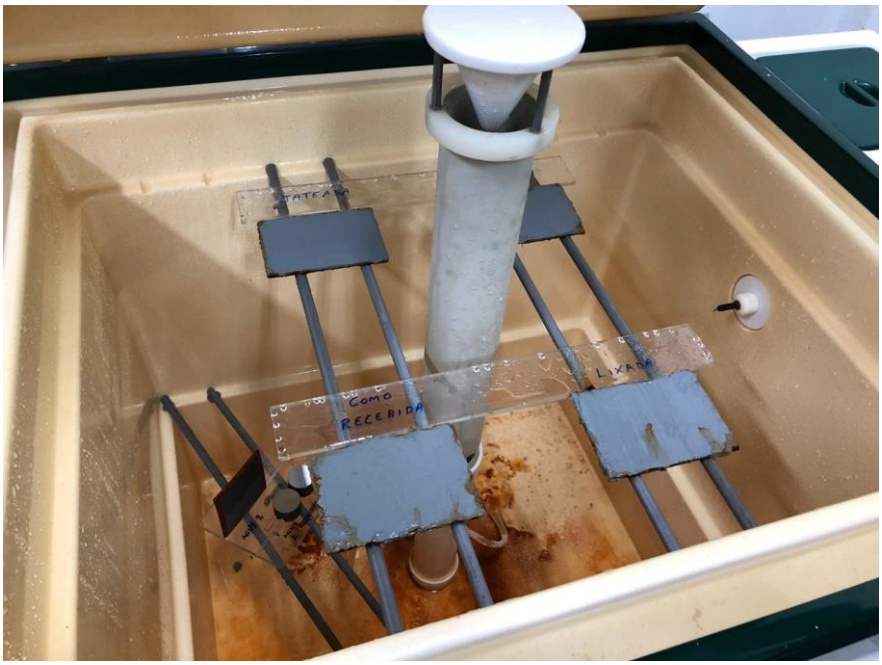


Figura 40 – Amostras após 168h



Figura 41 – Amostras após 240h

PAPANICOLAOU *et al,* (2016), em experimento com exposição em tempos semelhantes, para uma junta epóxi-metal, descreveram que a durabilidade da interação entre adesivo e substrato é diretamente afetada pelo teor de umidade pré e pós colagem, diminuindo com o aumento do tempo de exposição à câmara. A umidade pode afetar a junta adesiva, induzindo a plastificação do adesivo, atacando a interface aderente, causando tensões residuais internas. Portanto, o comportamento desses componentes ligados expostos a condições ambientes deve ser levado em consideração para o projeto de durabilidade.

FIORE *et al* (2017) testaram juntas híbridas de metal-compósito reforçado por fibra de vidro e concluiu que os desempenhos mecânicos vão diminuindo conforme o tempo de exposição a condições ambientes (ou reproduzidas em laboratório) de envelhecimento. Nesse caso particular, após 15 semanas de exposição houve uma diminuição de 46% da sua carga de estabilidade estrutural.

TEIXEIRA DE FREITAS *et al* (2017), observaram que existe uma redução limitada no desempenho da adesão após 30 dias de exposição à pulverização com sal, porém para períodos de exposição mais longos (90 dias), observa-se uma diminuição notável (23%) na força de descolamento em relação à amostra não envelhecida.

4.3. Ensaio de Adesão (*Pull-Off Test*)

Após o ensaio, os resultados indicaram que a resistência à tração de adesão média, variou de 7,08 MPa a 14,33 MPa para as 4 condições de preparação de superfície, conforme mostra a Tabela 7.

De acordo com a folha de dados do fabricante da Belzona® 1111, o valor máximo de resistência à tração é de 22,330 MPa, mostrando que os resultados estão dentro da faixa indicada. A condição escovada mostrou-se com maior valor, seguida pelas condições jateada, lixada e como recebida, para valores médios.

A Tabela 8 abaixo, mostra os descritivos para cada um dos 5 pontos analisados por condição de preparo de superfície de corpo de prova, seja para força de tração na ruptura, quanto para o tempo de duração do experimento.

Tabela 8 – Dados do ensaio de aderência para as quatro condições estudadas

Como recebido		**Lixado**		**Escovado**		**Jateado**	
Dolly	**Tração (MPa)**	**Dolly**	**Tração (MPa)**	**Dolly**	**Tração (MPa)**	**Dolly**	**Tração (MPa)**
11	6,77	6	10,06	1	15,79	16	13,96
12	4,76	7	8,83	~~2~~	~~18,81~~	17	14,53
13	6,74	8	11,00	3	11,27	~~18~~	~~7,35~~
14	9,08	9	12,63	4	14,28	19	12,81
15	8,03	10	13,63	5	15,98	20	13,26
Média	7,08	Média	11,23	Média	14,33	Média	13,64
Desvio Padrão	1,62	Desvio Padrão	1,93	Desvio Padrão	2,17	Desvio Padrão	0,66

Na Figura 42, são apresentadas as médias dos resultados da Tabela 8, para cada uma das 4 condições ensaiadas. Já as subsequentes Figuras 43 a 46 mostram os aspectos visuais pós ensaio.

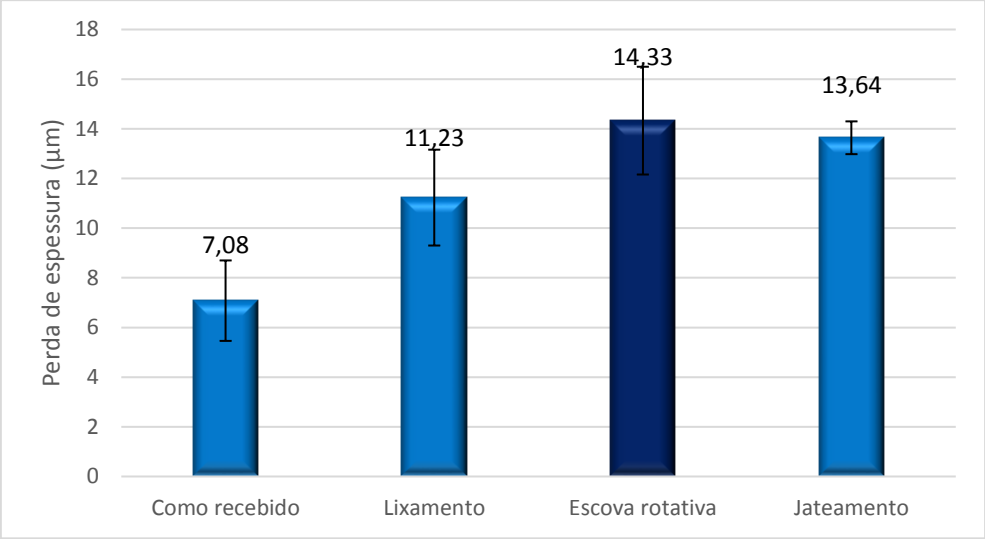


Figura 42 – Resultados do ensaio de adesão para as condições estudadas

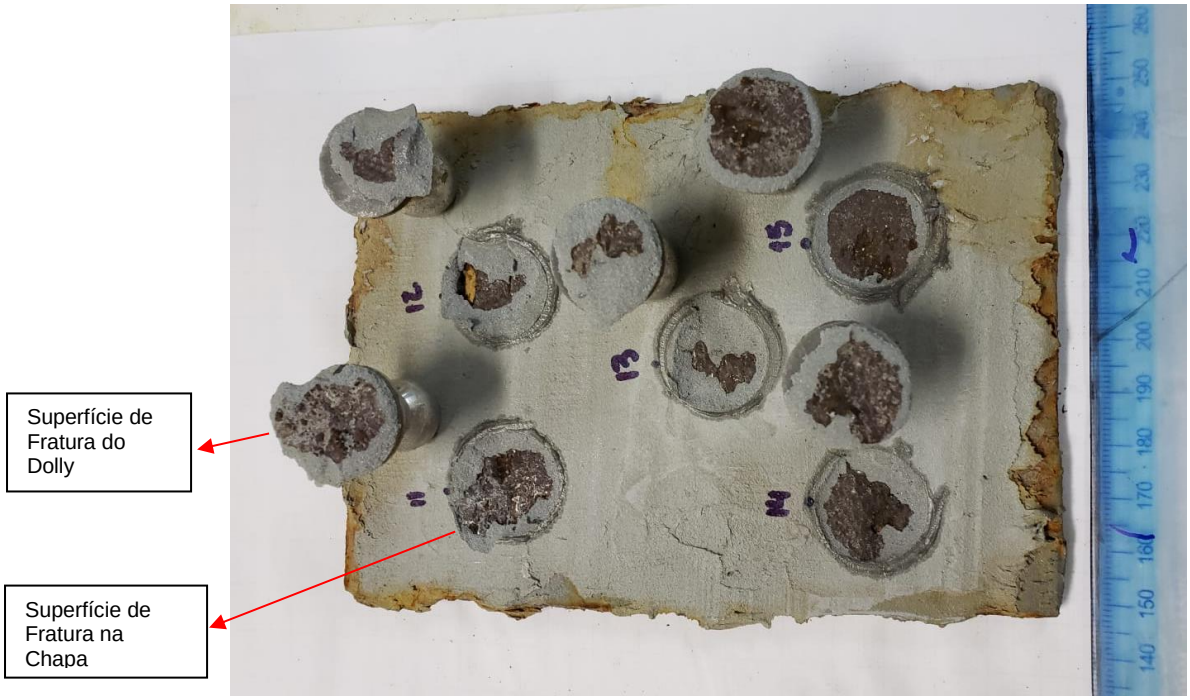


Figura 43 – Aspecto após o ensaio de aderência (como recebida)

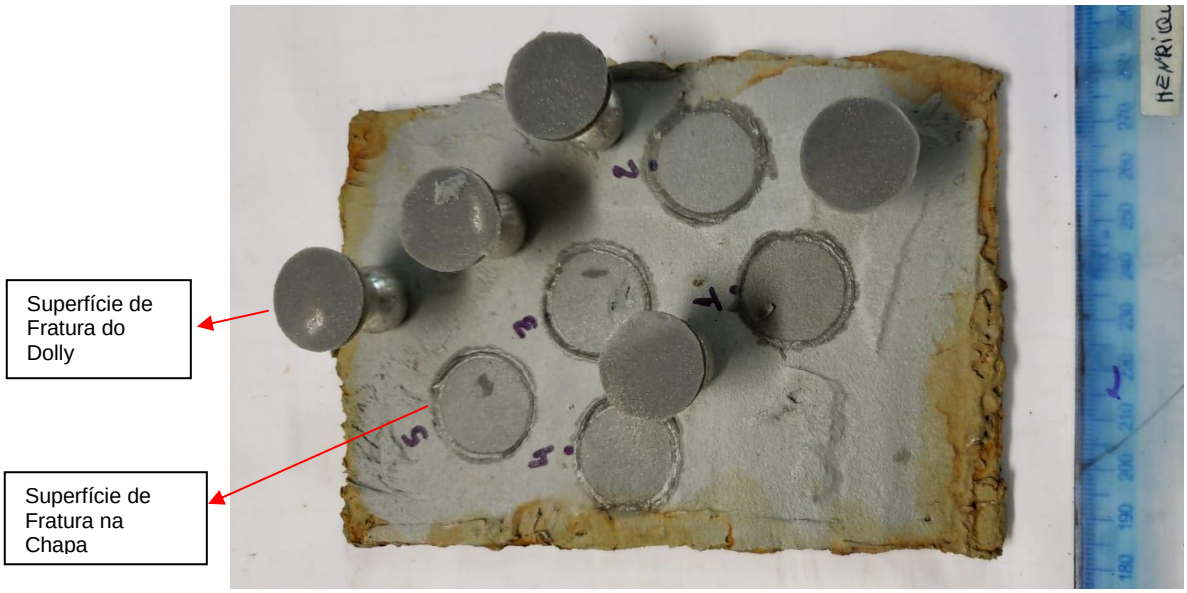


Figura 44 – Aspecto após o ensaio de aderência (escovada)

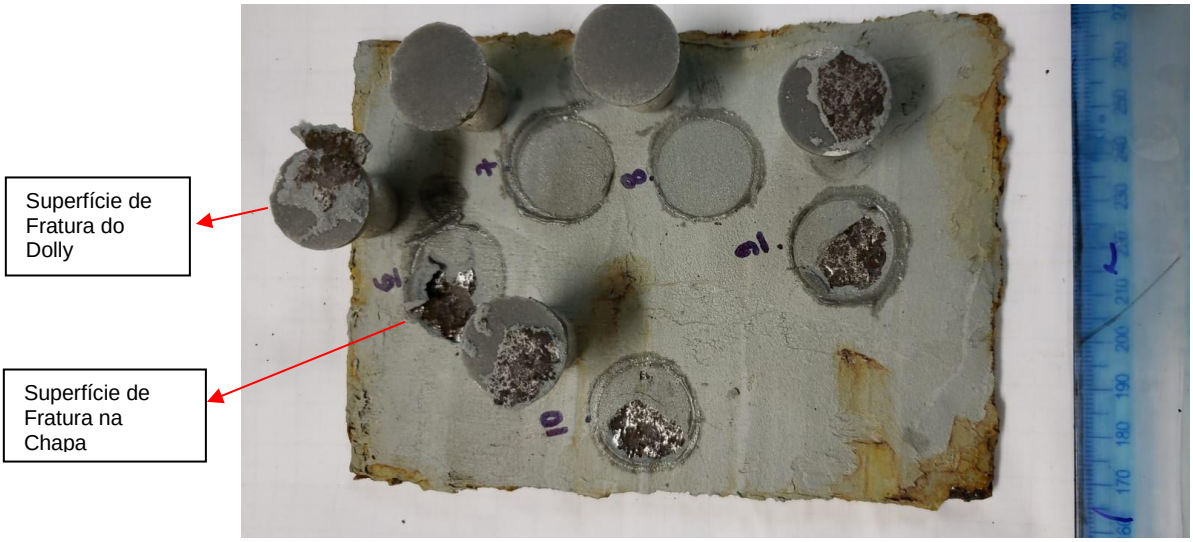


Figura 45 – Aspecto após o ensaio de aderência (lixada)

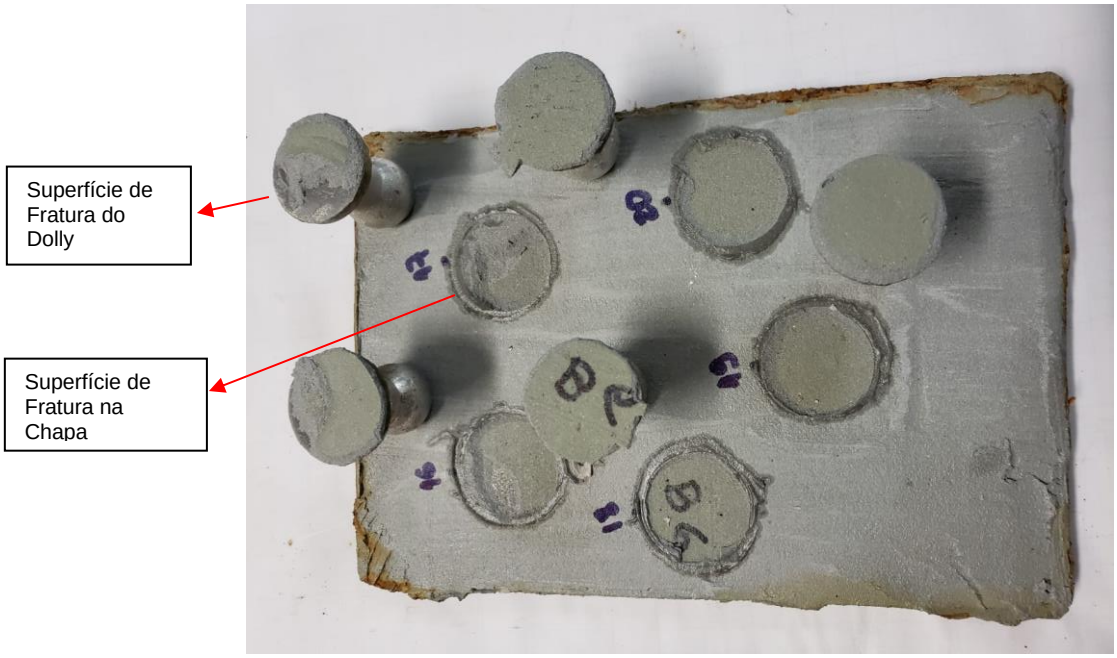


Figura 46 – Aspecto após o ensaio de aderência (jateada)

Analisando os resultados, verifica-se que a tração necessária para romper o dolly do substrato na condição “como recebido” é a menor, em comparação as demais condições, variando de 4,76 MPa a 9,08 MPa. Neste estado, observa-se que a fratura ocorreu quase que 100% no substrato (chapa de aço carbono), como pode ser observado na Figura 47.

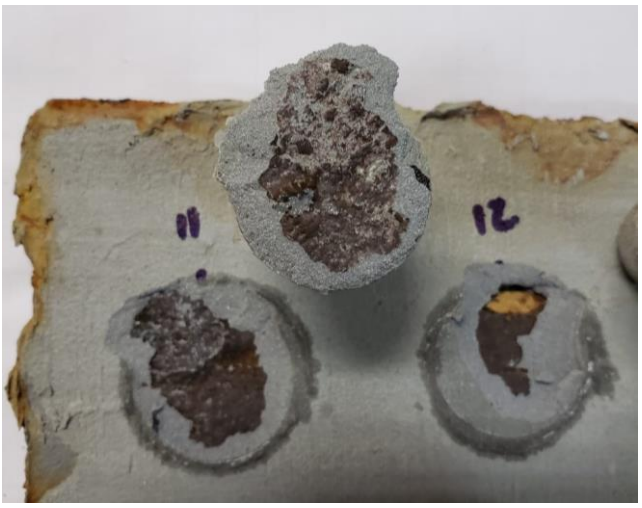


Figura 47 – Detalhe do corpo de prova após o ensaio de aderência, como recebido

Na condição “lixada”, os resultados indicaram valores maiores, em comparação a condição “como recebido”. A resistência a adesão média, foi de 11,23 MPa. Pode-se observar que a fratura ocorreu uniforme, variando em partes de adesivo e substrato, conforme Figura 48.



Figura 48 – Detalhe do corpo de prova após o ensaio de aderência, lixado

A condição “jateada”, apresentou resultados com valores muito próximos da condição “escoava”. A diferença da média de ambos, foi de apenas 0,69 MPa. Observa-se que a fratura não aconteceu uniforme, retirando grande parte do adesivo, sem influenciar no substrato, conforme Figura 49.



Figura 49 – Detalhe do corpo de prova após o ensaio de aderência, jateado

Os ensaios realizados no corpo de prova na condição “escovada”, apresentaram os melhores resultados, em comparação a todos feitos anteriormente. O valor médio foi de 14,33 MPa. Observa-se na Figura 50 que a fratura não afetou no substrato.



Figura 50 – Detalhe do corpo de prova após o ensaio de aderência, escovada

Os resultados das condições “escovada” e “jateada” tiveram, cada um, ensaios com um dos dollys tendo o valor muito discrepante em comparação aos demais. Por conta disso, eles não foram levados em consideração para cálculo das médias e desvios padrão.

É possível observar que os corpos de prova que obtiveram os maiores resultados de resistência a adesão (jateada e escovada) tiveram, na maior parte dos pontos testados, uma ruptura adesiva, quando a mesma ocorre integralmente entre o adesivo e o substrato. Já os corpos de prova como recebido e lixado, mostraram resultados menos resistentes e continham partes do próprio substrato ainda aderido ao dolly, junto com o adesivo.

TEIXEIRA DE FREITAS *et al* (2017), observaram que as amostras não envelhecidas apresentam 100% de falha coesiva, enquanto as amostras envelhecidas apresentaram falhas coesivas e adesivas. O percentual da área de falha coesiva depende do tempo exposto da amostra à pulverização de névoa salina.

Em comparação ao estudado por ALCANTARA (2018), não ocorreram grandes alterações substanciais nos resultados, de maneira geral. A única diferença foi a amostra escovada resultados equivalentes a condição jateada.

4.4. Análise por Microscopia Ótica (MO)

A microscopia ótica (MO) auxiliou na identificação de características superficiais, tais como inclusões, porosidades, e o aspecto da microestrutura das amostras. Para obtenção das macrografias a seguir, foram utilizadas lentes de aumento de 6.3x, como pode ser observado nas figuras 52 a 55, para os dollys 3 (escovada), 6 (lixada), 12 (como recebida) e 16 (jateada).

Na Figura 51, cuja condição é “como recebido”, é possível analisar na macrografia a área de transição entre o polímero e a face inferior do dolly, cuja superfície contém muitos pontos com rugosidade acentuada, assim como o substrato.

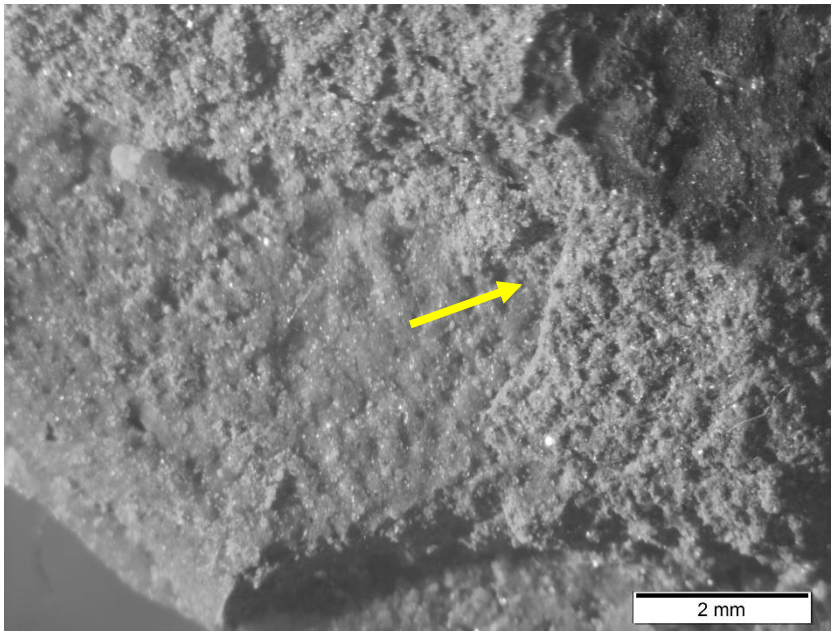


Figura 51 – Macrografia da superfície do dolly (como recebido). MO

Na Figura 52, cujo ensaio de adesão foi na condição “lixada”, analisa-se na macrografia uma área de transição entre o polímero e a face inferior do dolly, com a presença de uma parte do substrato.

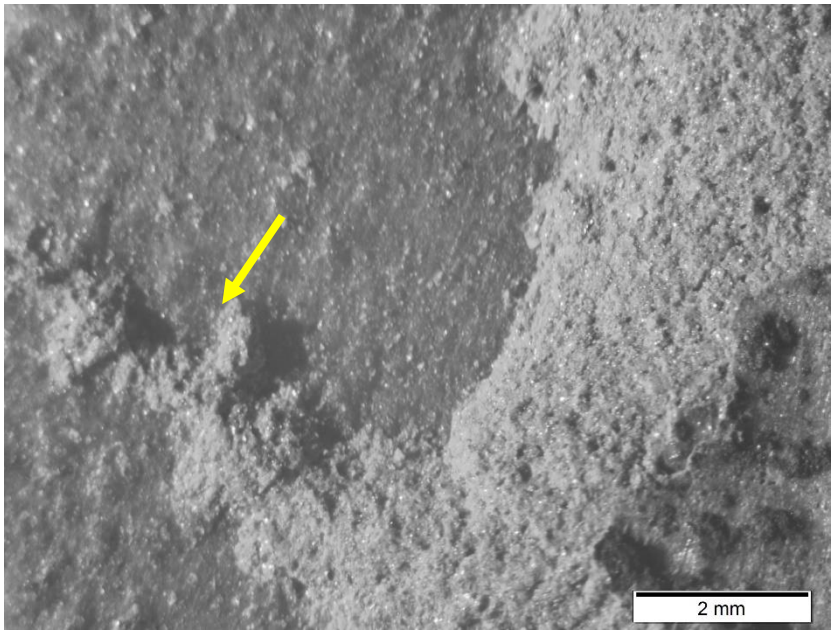


Figura 52 – Macrografia da superfície do dolly (lixado). MO

A Figura 53, mostra o ensaio da condição “escovada”, onde é possível observar na macrografia somente uma área de transição entre o polímero e a face inferior do dolly.

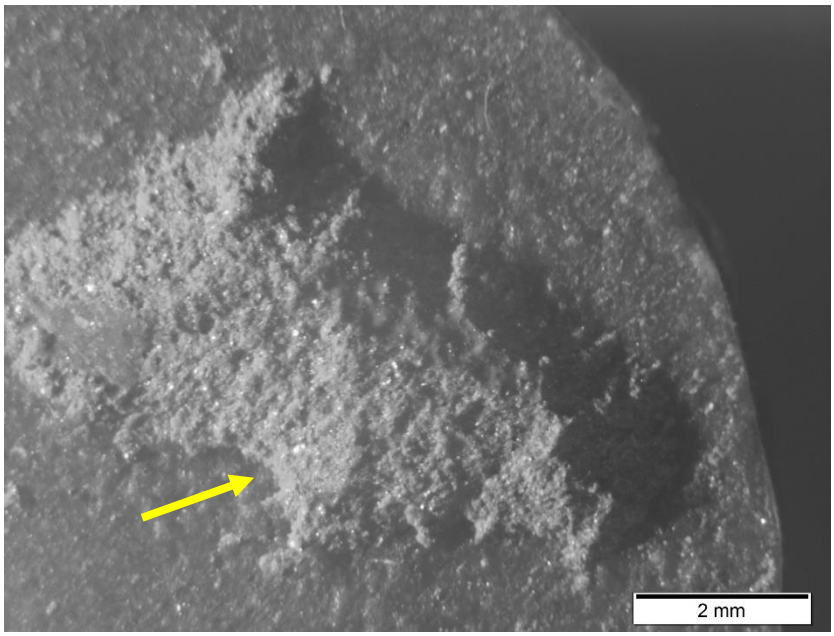


Figura 53 – Macrografia da superfície do dolly (escovada). MO

A Figura 54, apresenta um exemplo de macrografia de um dolly do ensaio na condição “jateada”. Observa-se na micrografia somente uma área de transição entre o polímero e a face inferior do dolly.

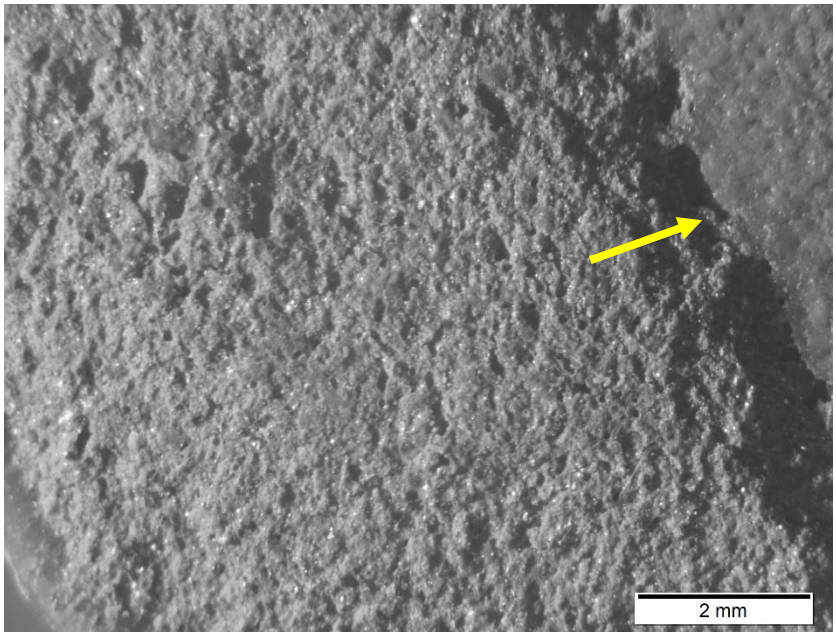


Figura 54 – Macrografia da superfície do dolly (jateada). MO

Pode-se afirmar que todas as macrografias mostraram alto grau de porosidade na face inferior do dolly, em virtude do jateamento feito nessa asuperfície. As Figuras 54 e 55 exemplificam as macrografias feitas nas condições “escovada” e “jateada”, não mostrando a presença do substrato metálico, assim como apresentaram também os melhores resultados alcançados no ensaio de adesão (*pull-off*).

Com essas análises é possível chegar à conclusão que, assim como Alcantara (2018) analisou em seus experimentos, que existe grande grau de porosidade e a uniformidade do aspecto visual da face inferior do dolly, mostrando uma área contínua com o adesivo. Estes são diretamente ligados a influência da adesão e resistência a tração.

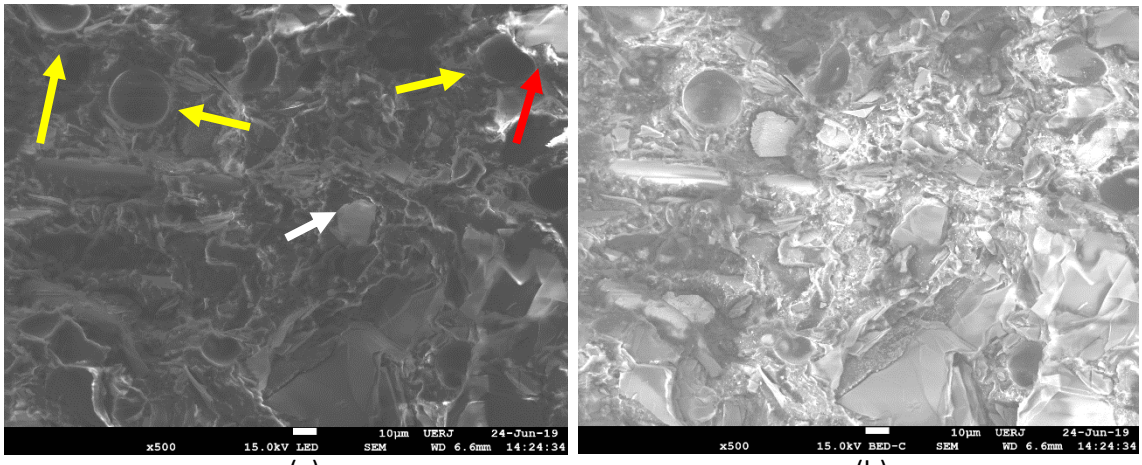
4.5. Análise por Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV-FEG)

A fractografia feita a partir da microscopia eletrônica por varredura, permitiu uma apreciação com maior grau de detalhamento da adesão do revestimento adesivo

Belzona® 1111 ao substrato, após as preparações de superfície. Na mesma houve variações de magnificação, dentre elas x150, x500, x1000 e x1500, utilizando em todas a voltagem de 15kV. Para este procedimento, foram utilizados os mesmos dollys da microscopia ótica.

A partir desses graus de majoramento microscópico, foram utilizados dois métodos de detecção de imagens: LED (Detector de elétrons secundários) e BED (Detector de elétrons retroespelhados). O primeiro é responsável por formar uma imagem comum da superfície analisada, com amostragem de informações morfológicas e topográficas da amostra, por conta dos elétrons de baixa energia (50 eV), formados a partir de um espelhamento inelástico. Já no segundo método, são utilizados elétrons de alta energia (>50 eV), surgidos a partir de um feixe primário incidente, ejetado para fora da amostra, dando como resultado uma imagem de contraste, facilitando a diferenciação de materiais contidos.

Na condição como recebida, observa-se nas fractografias das Figuras 55a e 55b a presença de vazios, como mostrado com as setas indicativas em amarelo, onde não é possível indicar se são depressões ou bolhas, mas que indica o impacto prejudicial a uma melhor adesão entre revestimento e substrato. A seta vermelha destaca a presença de impureza, e a seta indicativa branca, indica o local onde foi aplicado o maior grau de aproximação, mostrado na Figura 56.



(a) (b)

Figura 55 – Micrografias da superfície do dolly “Como Recebido“
(a) 500x LED (b) 500x BED. (MEV)

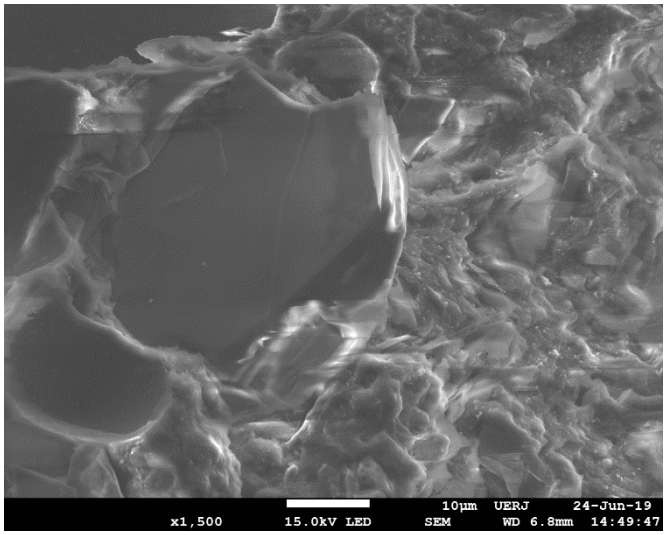
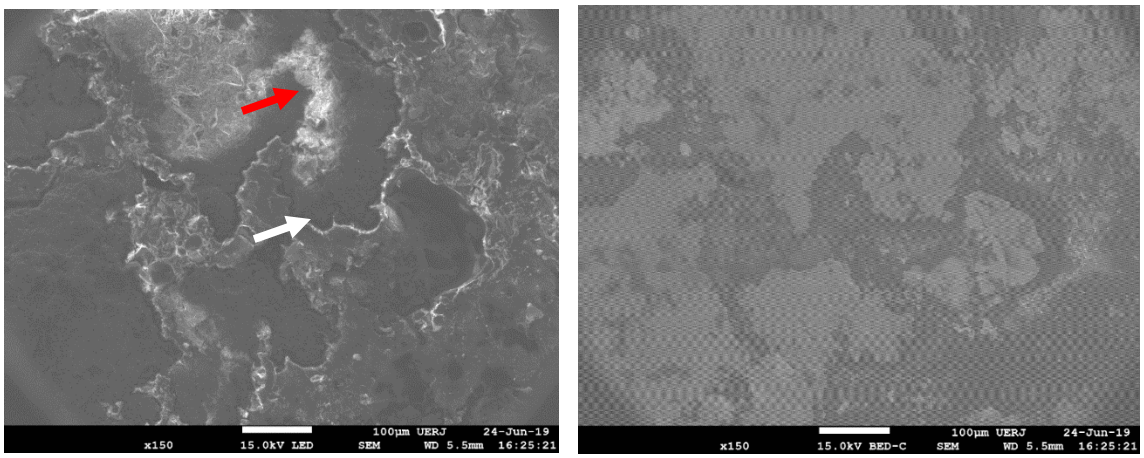


Figura 56 – Micrografia da superfície do dolly “Como Recebido” 1500x LED (MEV)

A condição lixada mostra, nas Figuras 57a e 57b, a pouca presença metálica, que é indicada pelo pouco volume de áreas claras. Esse indicativo mostra que a fratura ocorreu principalmente entre o adesivo e o substrato, porém sem fratura metálica. A seta branca, indica o local onde foi aplicado o maior grau de aproximação, Figura 58. As regiões mais claras são indicativas de presença de impurezas, destacadas pela seta em vermelho.



(a) (b)

Figura 57 – Micrografias da superfície do dolly “Lixado”
(a) 150x LED (b) 150x BED. (MEV)

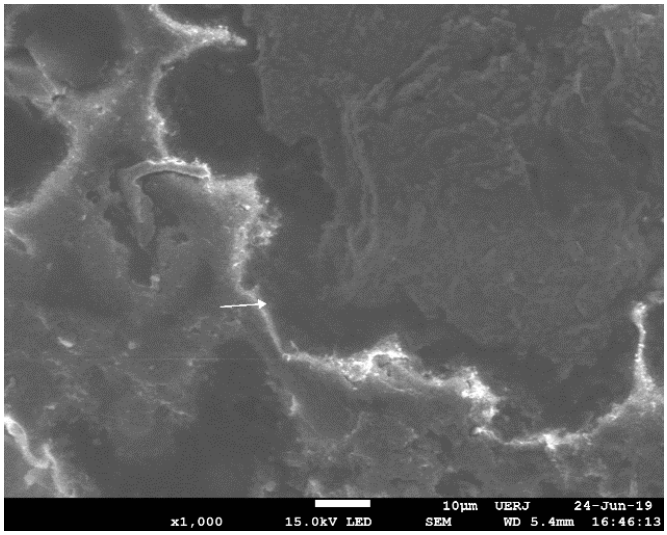
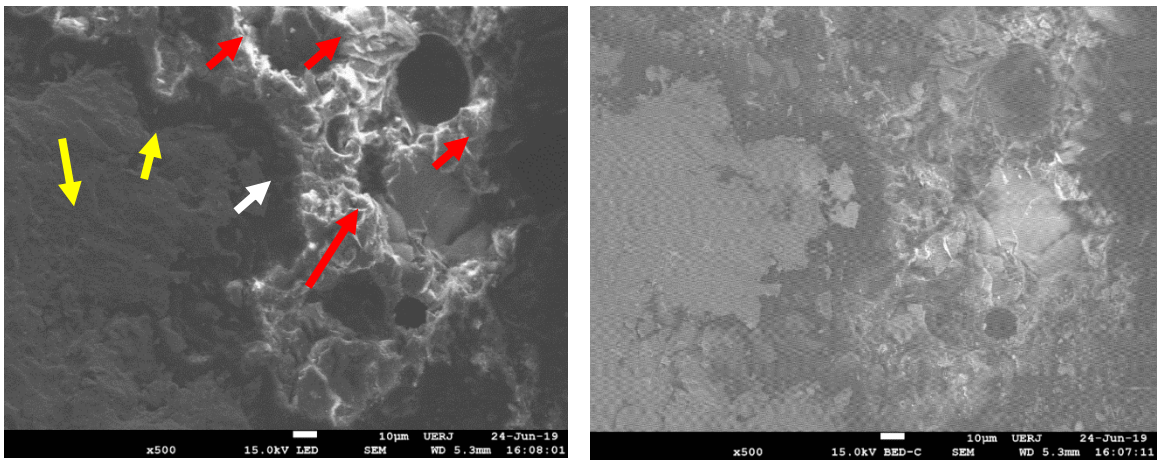


Figura 58 – Micrografia da superfície do dolly “Lixado” 1000x LED (MEV)

Com maior grau de visibilidade de superfície metálica em comparação a condição lixada, a condição escovada mostra nas Figuras 59a e 59b ainda pouca presença do substrato. Outro indicativo da baixa nitidez é a presença do Araudite e Belzona® na amostra, indicado por diferentes tonalidades escuras, conforme indicado pelas setas verdes. A figura 60 mostra maior aproximação, indicado pela seta branca, na Figura 59. As setas vermelhas destacam as impurezas.



(a) (b)

Figura 59 – Micrografias da superfície do dolly “Escovado”
(a) 500x LED (b) 500x BED. (MEV)

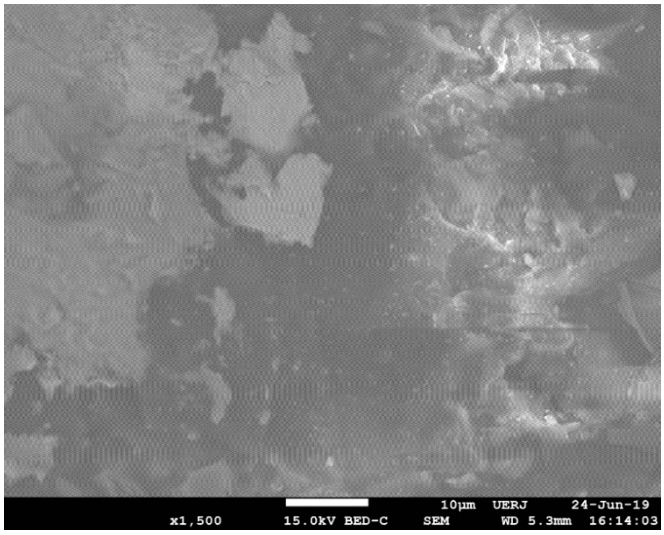
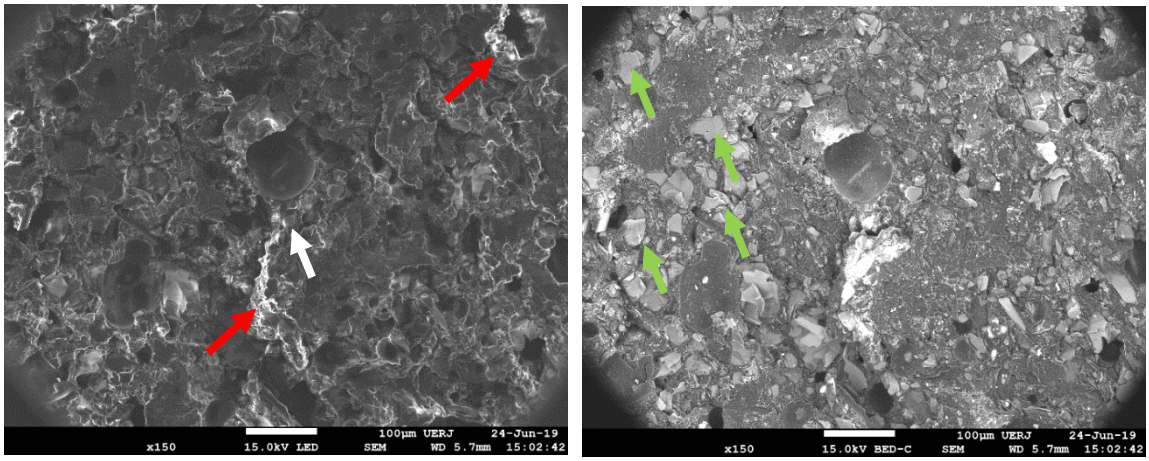


Figura 60 – Micrografia da superfície do dolly “Escovado” 1500x BED (MEV)

As Figuras 61a e 61b, mostra a condição jateada, onde uma série de pequenas áreas mais claras podem ser vistas, indicadas pelas setas em verde. As mesmas podem ser condicionadas ao jateamento feito na face inferior do dolly e posteriormente preenchida pelo Araudite. A figura 62 mostra a região com uma maior aproximação, indicado pela seta branca da figura 61a. As setas em vermelho indicam as impurezas.



(a) (b)

Figura 61 – Micrografias da superfície do dolly “Jateado”
(a) 150x LED (b) 150x BED. (MEV)



Figura 62 – Micrografia da superfície do dolly “Jateado” 1500x BED (MEV)

Analisando-se as microscopias citadas anteriormente, pode-se observar que tanto a macrografia (MO) quanto a fractografia (MEV FEG) trazem informações coerentes e complementares entre si, devido aos diferentes graus de aproximação e análise dos corpos de prova, quanto ao paralelo entre os maiores resultados de resistência a tração, aliados a não retirada de material substrato durante o experimento.

Outro fator de grande relevância foi o grau de porosidade das amostras (dollys) preparadas com processo de jateamento. Um exemplo claro desse fenômeno é a avaliação por MEV FEG da condição jateada.

5. Conclusão

Ao analisar os dados obtidos, para as quatro condições de preparação da superfície (como recebido, lixado, escovado e jateado) através do uso do polímero Belzona® 1111 para reparo, pode-se concluir que:

- ✓ Para as condições estudadas, pode-se observar que as preparações de superfícies lixadas, escovadas e jateadas, apresentaram melhores resultados para a aplicação de reparo polimérico ao metal, comparados a condição como recebida.
- ✓ Por conta de algumas limitações operacionais em terminais de distribuição de combustíveis, não há a possibilidade de retirada dos tanques para manutenção. Por vezes também, não há a possibilidade de utilização de equipamentos elétricos, tais como a escova rotativa. Uma vez que não é possível jatear uma chapa de um tanque em operação, o lixamento se mostra o método com a maior eficácia.
- ✓ Os maiores valores de aderência da Belzona® 1111 no substrato não estão diretamente relacionados a menor perda de espessura obtida. As condições de preparo de superfície, escovada e jateada obtiveram os maiores valores de resistência a tração e tiveram apontadas no MEV a presença de impurezas e fratura irregular, porém com o menor e maior valor de perda de espessura respectivamente.
- ✓ As simulações de envelhecimento não trouxeram impacto relevante a resistência da adesão entre Belzona® e substrato.

Como sugestões para futuros trabalhos, pode-se citar:

- ➢ Avaliação de outros polímeros da linha Belzona®, de forma a comparar os resultados de aderência;
- ➢ Avaliação de microdureza, através do tipo Knoop, por conta da espessura do revestimento;
- ➢ Estudo de outros reparos poliméricos, concorrentes comercialmente da Belzona® 1111, para comparação de indicativos de propriedades mecânicas;
- ➢ Estudo de adição de componentes químicos a Belzona® 1111 de forma a aumentar a vida útil e resistência a adesão;

6. Referências Bibliográficas

Adams, R. D. **Adhesive Bonding**, Cambridge, Woodhead Publishing, 2005.

ALCANTARA, Evandro de Almeira. *Reparo Polimérico de Superfícies Corroídas em Terminais de Distribuição de Combustíveis*. 87f. **Dissertação de Mestrado** – CEFET, Rio de Janeiro, 2018

API 650: 2016. *Welded Tanks for Oil Storage*. **American Petroleum Institute**. 12ª Edição. Washington, 2016.

ASM, **American Society for Microbiology**, 2010;

ASTM A283: 2018. *Standard Specification for Low and Intermediate Tensile Strength Carbon Steel Plates.* **American Society of Test and Materials**. Pennsylvania, 2018

ASTM B117: 2018. *Standard Practice for Operating Salt Spray*. **American Society of Test and Materials**. Pennsylvania, 2018

ASTM D907: 2015 Standard Terminology of Adhesives. **American Society of Test and Materials**. Pennsylvania, 2015

ASTM D4541: 2017 Standard Test for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers. **American Society of Test and Materials**. Pennsylvania, 2015

ASTM D5179: 2016. Standard Test Method for Measuring Adhesion of Organic Coatings to Plastic Substrates by Direct Tensile Testing. **American Society of Test and Materials**. Pennsylvania, 2016

ASTM D5229: 2014. Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Compostie Materials. **American Society of Test and Materials**. Pennsylvania, 2014

AWAJA, F. et al. Adhesion of polymers. **Progress in Polymer Science** (Oxford), v. 34, n. 9, p. 948–968, 2009.

BAG, D. S.; KUMAR, V. P.; MAITI, S. Chemical Modification of LDPE Film. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 71, n. 7, p. 1041–1048, 1999.

BARROS, S. M. de. Tanques de Armazenamento. **Universidade Petrobras**. Rio de Janeiro. 2014.

Belzona®, Folha De Especificações Do Produto – FN10132, www.belzona.com

BRIGGS, D. et al. Surface modification of poly(ethylene terephthalate) by electrical discharge treatment. **Polymer** (United Kingdom), v. 21, n. 8, p. 895–900, 1980.

BUSCH, Matheus Gutman. Análise experimental do comportamento mecânico de juntas híbridas metal-compósito. 44f. **Trabalho de Graduação** – CEFET, Rio de Janeiro, 2016

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e Engenharia de** Matérias - Uma Introdução, 8ª Ed. Rio de Janeiro, LTC, 2012.

COSTA, Zurel Siqueira, Influência do SiO2 nas Propriedades Mecânicas da DGEBA. 2009. 91p. **Dissertação de Mestrado** - Universidade Federal de Sergipe - UFS, São Cristóvão, 2009.

CRAWFORD, R. J. **Plastics Engineering**, 3rd Ed., Oxford, Butterworth-Heinemann, 1998

DA SILVA, L. F. M., MAGALHÃES, A. G. DE, MOURA, M. F. S. F. DE, **Juntas Adesivas Estruturais**. Porto, Publindústria, 2007.

DeFelkso, Folha De Dados, Positest® Pull-Off Adhesion Tester, 2019

DUNCAN, B.; ABBOTT, S.; ROBERTS, R. **Adhesive Tack. Measurement Good Practice Guide No. 26**, n. 26, 1999.

DUTRA, A. C.; NUNES, L. P. **Proteção Catódica: Técnica de Combate à Corrosão**. 5.ed. Rio de Janeiro, Interciência, 2011

EBNESAJJAD, S. **Adhesives Technology Handbook**, 2nd Ed., Nova York, Willian Andrew, 2008.

FIORE, V. et al. Salt spray fog ageing of hybrid composite/metal rivet joints for automotive applications. **Composites Part B: Engineering**, v. 108, p. 65–74, 2017.

FONSECA, Antonio Henrique Monteiro da, Proposta de um Critério de Resistência para Juntas Metálicas Coladas. 2007. 85p. **Dissertação de Mestrado** – UFF, Niterói, 2007

GASPARIN, André Luís, Adesão Metal-Polímero: Dispositivos de Medição e Correlações Físico-Químicas. 2011. 71f. **Tese de Doutorado** - UFRGS, Porto Alegre, 2011.

GENTIL, V. **Corrosão**, 5 ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 2008.

GHUMATKAR, A. et al. Influence of adherend surface roughness on the adhesive bond strength. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 13, n. 13, p. 2356–2370, 2016.

HER, S.-C. Stress analysis of adhesively-bonded lap joints. **Composite Structures**, v. 47, n. 1–4, p. 673–678, 1999

HIBELLER, R. C., **Resistência dos Materiais**. 5ª Ed., São Paulo, Prentice Hall, 2004.

JA'BAZ, I. et al. Effect of silica additive on the high-temperature fireside tube corrosion during the air-firing and oxy-firing of lignite (Xinjiang coal) – Characteristics of bulk and cross-sectional surfaces for the tubes. **Fuel**, v. 187, p. 68–83, 2017.

JAIN N. K.; JAIN, V. K. Modeling of material removal in mechanical type advanced machining processes: A state-of-art review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 41, n. 11, p. 1573–1635, 2001.

KLOCKE, F.; DAMBON, O.; FILHO, G. G. C. Influence of the polishing process on the near-surface zone of hardened and unhardened steel. **Wear**, v. 258, n. 11–12, p. 1794–1803, 2005.

KONG, J. S.; LEE, D. J.; KIM, H. DO. Surface modification of low-density polyethylene (LDPE) film and improvement of adhesion between evaporated copper metal film and LDPE. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 82, n. 7, p. 1677–1690, 2001.

KUMAR, A.; GUPTA, R. K. **Fundamentals of Polymer Engineering**, 2 th ed. New York, Marcel Dekker Inc., 2003.

LADIZESKY, N. H.; WARD, I. M. A study of the adhesion of drawn polyethylene fibre/polymeric resin systems. **Journal of Materials Science**, v. 18, n. 2, p. 533–544, 1983.

LEE, J. H. et al. Mechanism of adhesion of the diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA) to the Fe(100) surface. **Composites Science and Technology**, v. 126, p. 9–16, 2016.

LEMM **Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais** - www.urisan.tche.br. 2019

LI, J.; BERES, W. Three-dimensional finite element modelling of the scratch test for a TiN coated titanium alloy substrate. **Wear**, v. 260, n. 11–12, p. 1232–1242, 2006.

LI, K. et al. The change of thermal-mechanical properties and chemical structure of ambient cured DGEBA/TEPA under accelerated thermo-oxidative aging. **Polymer Degradation and Stability**, v. 98, n. 11, p. 2340–2346, 2013.

LYON, S. **Overview of Corrosion Engineering, Science and Technology**. 1st ed. Oxford: Woodhead Publishing, 2012.

MALLICK, P. K. Fiber-reinforced Composites - Materials, Manufacturing and Desing, 3rd ed. Florida, CRC Press, 2007.

MAY, C. A., **Epoxy Resins: Chemistry and Technology**, New York, Marcel Dekker Inc., 1988.

MCKENNA, G. B.; LETERRIER, Y.; SCHULTHEISZ, C. R. The evolution of material properties during physical aging. **Polymer Engineering & Science**, v. 35, n. 5, p. 403–410, 1995

MEIRA, G. R. et al. Measurements and modelling of marine salt transportation and deposition in a tropical region in Brazil. **Atmospheric Environment**, v. 40, n. 29, p. 5596–5607, 2006.

MELLO, Paula Vieira de, Influência do parâmetro rugosidade na transferência de calor em juntas coladas. 2016. 86p. **Dissertação de Mestrado** – CEFET, Rio de Janeiro, 2016

MIAO, X. et al. Synthesis and characterization of hyperbranched polyether/DGEBA hybrid coatings. **Reactive and Functional Polymers**, v. 122, July 2017, p. 116–122, 2018.

MIKAMI, C.; WU, H. C.; ELARBI, A. Effect of hot temperature on pull-off strength of FRP bonded concrete. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 180–186, 2015.

MORTENSEN, F.; THOMSEN, O. T. Analysis of adhesive bonded joints: A unified approach. **Composites Science and Technology**, v. 62, n. 7–8, p. 1011–1031, 2002.

N-270: 2010. **Norma Petrobras** - Projeto de Tanque Atmosférico. Revisão E. Rio de Janeiro, 2010.

NBR-7821: 1983. Tanques Soldados Para Armazenamento de Petróleo e Derivados. **Associação Brasileira De Normas Técnicas**. Rio de Janeiro, 1983

NBR-15239: 2005. Tratamento de superfícies de aço com ferramentas manuais e mecânicas. **Associação Brasileira De Normas Técnicas**. Rio de Janeiro, 2005

NBR-17505: 2013. Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis. **Associação Brasileira De Normas Técnicas**. Rio de Janeiro, 2013

NETO, F. L., PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais - Ciência e Tecnologia**. Edgard Bluncher, 2006.

NOVÁK, I.; FLORIÁN, S. Effect of aging on adhesion behavior of discharge plasma–treated biaxially oriented polypropylene. **Journal of Materials Science Letters**, v. 103, n. 3, p. 1055–1057, 1999.

OHTSUKA, T. Corrosion protection of steels by conducting polymer coating. **International Journal of Corrosion**, v. 2012, 2012.

PAPANICOLAOU, G. C. et al. Experimental and numerical investigation of balanced Boron/Epoxy single lap joints subjected to salt spray aging. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 68, p. 9–18, 2016.

PIHAN, S. A.; TSUKRUK, T.; FÖRCH, R. Plasma polymerized hexamethyl disiloxane in adhesion applications. **Surface and Coatings Technology**, v. 203, n. 13, p. 1856–1862, 2009.

PINTO, Juliano Ribeiro Aguiar, Determinação da Energia de Tack e da Melhor Condição de Adesão dos Revestimentos Poliuretânicos para Propelente Sólido Compósito Utilizado em Motores-Foguete. 2007. 80f. **Dissertação de Mestrado** – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2007

PONCIUS, A. V. **Adhesion Science and Engineering**: 1st Ed., Saint Paul, Elsevier; 2002.

REN, R. et al. Isothermal curing kinetics and mechanism of DGEBA epoxy resin with phthalide-containing aromatic diamine. **Thermochimica Acta**, v. 623, p. 15–21, 2016.

ROBERGE, P. R.; **Handbook of Corrosion Engineering**. 3rd ed. New York, McGraw-Hill, 1999

RODRIGUEZ, Carlos Julio Cortés. Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing. 2009. 205 p. **Tese de Doutorado**. Universidade de Kassel, Alemanha. 2009.

ROÉKOWICZ, M.; SMAL, T. Durability of Belzona 1111 and Belzona 1812 adhesive composites. **Polimery/Polymers**, v. 56, n. 6, p. 471–477, 2011.

SATO, Armando Kenzo, Projeto de um Tanque de Armazenamento Atmosférico com Teto Flutuante para Estocagem de Gasolina. 2015. 69f. **Trabalho de Graduação** – UNESP, Guaratinguetá, 2015.

SCHULTZ, J.; NARDIN, M. Theories and Mechanisms of Adhesion. Em: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology**. New York: M. Dekker, 1994. p. 19-32.

SCHWEITZER, P. A. **Metallic Materials Physical, Mechanical, and Corrosion Properties**. 1st ed. New York: Marcel Dekker Inc, 2003.

SOUZA, Juliana Primo Basílio de, Análise Térmica De Polímero Dgeba (Diglicidil Éter De Bisfenol A) e Sua Influência Na Resistência De Juntas Coladas. 2012. 79f. **Dissertação de Mestrado** - UFF, Niterói, 2012

STANGO, R. J. P. K. Fundamentals of Bristle Blasting Process for Removing Corrosive Layer. **Nace International Corrosion Conference & Expo**, n. 09191, p. 1–13, 2009

STRUIK, L. C. E. **Physical Aging in Amorphous Polymers and Other Materials**, Amsterdam, Elsevier, 1978.

STRUIK, L. C. E. **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering. Aging, Physical**, John Wiley & Sons, New York 1986.

TEIXEIRA DE FREITAS, S.; BANEA, M. D.; BARROS, S. de. Interface adhesion assessment of composite-to-metal bonded joints under salt spray conditions using peel tests. **Composite Structures**, p. 1–23, 2016

TOGNANA, S.; SALGUEIRO, W.; SILVA, L. Spherulitic growth and crystallization kinetics in PHB/DGEBA blends. **Thermochimica Acta**, v. 623, p. 1–8, 2016

Usiminas®, Catálogo de Aços, 2019

V. BECHTOLSHEIM, C.; ZAPOROJTCHENKO, V.; FAUPEL, F. Influence of thermal treatment on the morphology and adhesion of gold films on trimethylcyclohexane-polycarbonate. **Applied Surface Science**, v. 151, n. 1, p. 119–128, 1999.

VAN DER VEGT, A.K. **From polymers to plastic**. Internet Ed. Delft, DUP Blue Print, 2002.

WALCZAK, M. et al. Materials corrosion for thermal energy storage systems in concentrated solar power plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 86, n. September 2017, p. 22–44, 2018.