

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ALINE BENITTES DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DO PRÉ-TRATAMENTO MECÂNICO DE JATEAMENTO NA
ADERÊNCIA E NA RESISTÊNCIA ANTICORROSIVA DE UM PROCESSO DE
PINTURA *E-COATE* E *TOP-COAT***

CAXIAS DO SUL

2020

ALINE BENITTES DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DO PRÉ-TRATAMENTO MECÂNICO DE JATEAMENTO NA
ADERÊNCIA E NA RESISTÊNCIA ANTICORROSIVA DE UM PROCESSO DE
PINTURA *E-COATE* E *TOP-COAT***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador Prof. Me. Roberto Itacyr Mandelli

CAXIAS DO SUL

ALINE BENITTES DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DO PRÉ-TRATAMENTO MECÂNICO DE JATEAMENTO NA
ADERÊNCIA E NA RESISTÊNCIA ANTICORROSIVA DE UM PROCESSO DE
PINTURA *E-COATE* E *TOP-COAT***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em 02/12/2020

Banca Examinadora

Orientador
Prof. Me. Roberto Itacyr Mandelli
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Profa. Dra. Eliena Jonko
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Profa. Me. Rejane Rech
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Dedico este trabalho à minha mãe Silvana pelo apoio durante toda a trajetória de graduação e pelo exemplo de vida que foi pra mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, autor de meu destino, que me presenteou com esta graduação, me dando força e sabedoria para concluir mais esta etapa.

A minha mãe por todo amor, compreensão, força e apoio durante todos estes anos de estudo, sem ela essa conquista não existiria.

A toda a minha família, em especial minha avó Gladis e minha tia Isabel por toda ajuda durante todos os anos da minha vida. Todos foram importantes durante a realização deste sonho.

Ao meu orientador, professor Roberto Mandelli, pela dedicação, incentivo e orientação indispensável.

À empresa Randon Implementos e Participações S/A e Universidade de Caxias de Sul, pela oportunidade de realização dos testes, fundamental para a conclusão deste trabalho.

A todos os professores que ajudaram e me incentivaram a buscar mais conhecimento.

A todos os colegas e amigos que contribuíram para a realização deste trabalho, em especial ao Ronaldo Andrade por todo conhecimento transmitido e por toda ajuda. Agradeço também a Giovana Zardo e a Jordana Bortoluz pela amizade construída durante todos esses anos.

RESUMO

O aço-carbono é considerado um dos materiais mais aplicados na engenharia e na indústria, mas possuem algumas restrições, principalmente quando são necessárias propriedades como resistência à corrosão, ao desgaste e a temperaturas. O controle do processo de corrosão tem sido amplamente estudado ao longo dos anos por vários pesquisadores, devido ao maior uso de equipamentos e estruturas baseadas em materiais metálicos. Um dos métodos de inibir a corrosão é o uso de revestimentos orgânicos por pintura. O pré-tratamento e/ou preparação da superfície é uma das etapas de maior importância na obtenção de um desempenho satisfatório dos revestimentos por pintura. O processo mecânico de jateamento com granalhas de aço carbono sobre a superfície de peças também conhecido como *shot peening* é o procedimento mais completo para remoção de óxidos. Apresenta resultados eficazes tanto em rendimento como rapidez e principalmente em qualidade de limpeza. O jateamento além de deixar a superfície limpa do metal, também produz nela uma rugosidade do substrato bastante propícia para uma melhor “ancoragem”, aderência do *primer* ou primeira demão de tinta. Antes de realizar o processo de pintura nas peças, o pré-tratamento químico também é essencial para depositar na superfície do substrato uma camada de conversão. Essa etapa também proporciona uma maior aderência da tinta, aumentando a resistência à corrosão e ao empolamento. Os revestimentos por pintura devem ser capazes de formar uma barreira para romper a conexão metal-eletrólito a fim de retardar a reação de corrosão do substrato metálico. Na durabilidade dos revestimentos por pintura, tem-se como uma propriedade essencial a aderência da tinta. Neste contexto, este presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência do pré-tratamento mecânico de jateamento na resistência anticorrosiva de um processo de pintura *e-coat* e *top-coat*. As amostras foram submetidas aos seguintes testes: rugosidade, aderência, brilho, espessura da camada de tinta, névoa salina, flexibilidade, microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (MEV-FEG) e espectroscopia por dispersão em energia (EDS). Dentre as velocidades do transportador processadas pelo processo de jateamento (3000 mm/min, 2000 mm/min e 1000 mm/min), estudadas percebeu-se que as velocidades de 1000 mm/min e 2000 mm/min apresentaram os melhores resultados quanto à resistência à corrosão, pois o perfil de rugosidade gerado promoveu a ancoragem ideal para uma boa proteção contra a corrosão. O tempo de exposição do substrato em frente às turbinas de jateamento e a preparação do substrato antes do recebimento da tinta tem influência direta no resultado final do produto. Os demais ensaios realizados neste trabalho corroboram com os resultados obtidos nos testes de resistência à corrosão.

Palavras-chave: aço, corrosão, pré-tratamento, revestimento orgânico, *e-coat*, *top-coat*.

ABSTRACT

Carbon steel is considered one of the most applied materials in engineering and in the industry, but it has some restrictions, especially when some properties are needed, such as resistance to corrosion, wear and weather. Corrosion control has been widely studied over the years by several researchers, due to the increased use of equipment and structures based on metallic materials. One of the methods of inhibiting corrosion is the use of coatings by painting. Pre-treatment and/or surface preparation is one of the stages of greater importance in obtaining satisfactory performance of coatings. The mechanical blasting process with shot blasting on the surface of parts, also known as shot peening, is the most complete procedure for removal of scales and rust. It shows effective results both in performance as speed, and mainly, in cleaning quality. Blasting, in addition to cleaning the metal surface, it produces a quite propitious roughness to a better “anchoring”, adhesion of the primer or first coat of ink. Before accomplishing the painting process on the pieces, the chemical pre-treatment is also essential to deposit a layer of conversion. This stage provides the cleaning of the metallic parts, providing a greater adhesion of the paint, increasing resistance to corrosion and blistering. Paint coatings must be able to form a barrier to break the metal-electrolyte connection in order to delay or stop the reaction of corrosion of the metal substrate. In the durability of painting coats, the adhesion is an essential property. In this context, the goal of this essay is to evaluate the influence of mechanical pre-treatment of blasting in the anticorrosive resistance of an e-coat and top-coat painting process. The samples were subjected to the following tests: roughness, adhesion, brightness, paint layer thickness, salt spray, flexibility, electron microscopy of field emission scanning (MEV-FEG) and energy spectroscopy dispersive (EDS). Among the blasting speeds studied (3000 mm/min, 2000 mm/min and 1000 mm/min), it was noticed that the speed of 1000 mm/min and 2000 mm/min presented the best results in terms of corrosion resistance, since the profile of generated roughness promoted the ideal anchorage for a good protection against corrosion. The exposure time of the substrate in front of the blasting turbines and preparation of the substrate before receiving the paint has a direct influence on the final product result. The other tests performed on this essay corroborate with the results obtained in the corrosion resistance tests.

Key-words: steel, corrosion, pre-treatment, organic coating, *e-coat*, *top-coat*.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Ciclo dos metais..... | 13 |
| Figura 2 - Formas de corrosão | 17 |
| Figura 3 - Equipamento de jateamento | 20 |
| Figura 4 - Granalha esférica e angular..... | 21 |
| Figura 5 - Perfil obtido com cada formato de granalha..... | 21 |
| Figura 6 - Aderência mecânica de um revestimento ao substrato de aço..... | 22 |
| Figura 7 - Aspectos superficiais de substratos de aço | 22 |
| Figura 8 - Medidas do perfil de rugosidade (Ra e Rz)..... | 23 |
| Figura 9 - Mecanismo de remoção de óleo da superfície do substrato | 25 |
| Figura 10 - Componentes básicos das tintas e vernizes | 29 |
| Figura 11 - Processo por eletrodeposição..... | 31 |
| Figura 12 - Sistema de ultrafiltração (UF) da pintura <i>e-coat</i> | 32 |
| Figura 13 - Processo de pintura <i>top-coat</i> pó | 33 |
| Figura 14 - Aplicação tinta em pó..... | 34 |
| Figura 15 - Equipamento de pintura pó..... | 35 |
| Figura 16 - Metodologia para preparação dos corpos de prova..... | 42 |
| Figura 17 - Resultados do teste de aderência para os sistemas antes do ensaio em névoa salina | 47 |
| Figura 18 - Resultados do teste de aderência para os sistemas após o ensaio em névoa salina | 47 |
| Figura 19 - Após 576 horas de ensaio em névoa salina dos sistemas estudados | 50 |
| Figura 20 - Após a realização do deslocamento para verificação de migração subcutânea..... | 51 |
| Figura 21 - Representação visual da flexibilidade das amostras submetidas ao teste com mandril cônico | 53 |
| Figura 22 - Representação da análise de microscopia eletrônica de varredura com emissão de campo (MEV-FEG)..... | 55 |
| Figura 23 - Imagem de MEV do local analisado por EDS com os espectros gerados de cada imagem: (A): Sem jateamento, (B): Velocidade de 3000 mm/min | 56 |
| Figura 24 - Imagem de MEV do local analisado por EDS com os espectros gerados de cada imagem: (C): Velocidade de 2000 mm/min, (D): Velocidade de 1000 mm/min | 57 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Desenvolvimento de polímeros | 29 |
| Tabela 2 - Composição química do aço carbono LN-RAND-250 | 37 |
| Tabela 3 - Estrutura da granalha G40C | 38 |
| Tabela 4 - Composição química da granalha G40C..... | 38 |
| Tabela 5 - Análise do perfil de rugosidade das amostras..... | 46 |
| Tabela 6 - Resultados do teste de aderência para os sistemas..... | 47 |
| Tabela 7 - Valores obtidos no ensaio de brilho | 48 |
| Tabela 8 - Espessura de camada da tinta seca <i>e-coat</i> + <i>top coat</i> pó..... | 49 |
| Tabela 9 - Média do deslocamento dos sistemas estudados | 52 |
| Tabela 10 - Elementos químicos obtidos através da análise de EDS | 58 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | OBJETIVO GERAL..... | 12 |
| 1.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 12 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 13 |
| 2.1 | CORROSÃO..... | 13 |
| 2.1.1 | Custos da corrosão | 14 |
| 2.1.2 | Formas de corrosão | 15 |
| 2.2 | PRÉ-TRATAMENTO DA SUPERFÍCIE | 17 |
| 2.3 | PRÉ-TRATAMENTO MECÂNICO DE JATEAMENTO | 18 |
| 2.3.1 | Granalha de aço-carbono..... | 20 |
| 2.3.2 | Perfil de rugosidade | 21 |
| 2.4 | PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO POR IMERSÃO..... | 23 |
| 2.4.1 | Desengraxe | 24 |
| 2.4.2 | Fosfatização | 25 |
| 2.5 | REVESTIMENTOS POR PINTURA..... | 27 |
| 2.5.1 | Pintura e-coat..... | 30 |
| 2.5.2 | Pintura top-coat..... | 32 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 37 |
| 3.1 | MATERIAIS | 37 |
| 3.1.1 | Corpos de prova | 37 |
| 3.1.2 | Granalha angular de aço carbono..... | 37 |
| 3.1.3 | Pré-desengraxe | 38 |
| 3.1.4 | Desengraxe | 38 |
| 3.1.5 | Enxague I..... | 39 |
| 3.1.6 | Fosfato de ferro | 39 |
| 3.1.7 | Enxague II..... | 39 |
| 3.1.8 | Enxague III..... | 39 |
| 3.1.9 | Pintura e-coat..... | 39 |
| 3.1.10 | Enxague IV e enxague V (UF I e UFII)..... | 40 |
| 3.1.11 | Estufa pós e-coat..... | 40 |

| | | |
|---------------|--|-----------|
| 3.1.12 | Pintura <i>top-coat</i> | 41 |
| 3.2 | MÉTODOS | 41 |
| 3.2.1 | Ensaio de rugosidade | 42 |
| 3.2.2 | Aderência | 42 |
| 3.2.3 | Brilho | 43 |
| 3.2.4 | Espessura da camada de tinta | 43 |
| 3.2.5 | Ensaio em névoa salina | 43 |
| 3.2.6 | Ensaio de flexibilidade | 44 |
| 3.2.7 | Microscopia eletrônica de varredura com emissão de campo (MEV-FEG) 44 | |
| 3.2.8 | Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) | 45 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 46 |
| 4.1 | ENSAIO DE RUGOSIDADE | 46 |
| 4.2 | ADERÊNCIA | 46 |
| 4.3 | BRILHO | 48 |
| 4.4 | ESPESSURA DA CAMADA DE TINTA | 48 |
| 4.5 | ENSAIO EM NÉVOA SALINA | 49 |
| 4.6 | ENSAIO DE FLEXIBILIDADE | 52 |
| 4.7 | MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA COM EMISSÃO DE CAMPO (MEV-FEG) | 53 |
| 4.8 | ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EDS) | 55 |
| 5 | CONCLUSÃO | 59 |
| | REFERÊNCIAS | 61 |

1 INTRODUÇÃO

O aço é composto por uma liga de ferro-carbono que geralmente contém cerca de 0,008 % - 2,11 % de carbono, além de outros elementos residuais resultantes do processo de fabricação. O aço-carbono é considerado um dos materiais mais aplicados na engenharia e na indústria, mas possui algumas restrições, principalmente quando são necessárias propriedades como resistência à corrosão, ao desgaste e a temperaturas (GOMES, 2013). O controle de corrosão tem sido amplamente estudado ao longo dos anos por vários pesquisadores, devido ao maior uso de equipamentos e estruturas baseadas em materiais metálicos. Um dos métodos de inibir a corrosão é o uso de revestimentos por pintura (SILVA, 2019).

Deve ser criteriosa e resistir à agressividade do ambiente na escolha da tinta. Os revestimentos por pintura devem ser capazes de formar uma barreira para romper a conexão metal-eletrólito a fim de atrasar ou parar a reação de corrosão do substrato metálico. A pintura por meio de eletrodeposição catódica (*e-coat*) é um processo por imersão e sua formulação permite a polarização. A pintura *e-coat* epóxi não possui resistência à radiação ultravioleta (UV), por esse motivo caso a peça for exposta a atmosfera, se faz uso de uma pintura *top-coat* sobre o *e-coat*. A pintura *top-coat* pó oferece excelente resistência à corrosão, impacto e abrasão, assim como retenção de brilho (SANTÁGATA *et al.*, 1998, p. 44; SANTOS, 2016; SOARES, 2013).

Antes de receber o revestimento o substrato deve passar por um processo de pré-tratamento com intuito de eliminar os contaminantes existentes na superfície que possam prejudicar a aderência da nova tinta (GNECCO, 2006).

O jateamento abrasivo é um dos métodos de limpeza de superfície mais eficientes, que consiste basicamente em colisão de partículas de abrasivo á alta velocidade contra a superfície a ser limpa. A projeção pode ser feita por meio de força centrífuga ou através de ar comprimido (GENTIL, 2011). O tempo de jateamento de uma peça depende da geometria, tamanho, ou seja, da estrutura geral do item a ser preparado. Existem sistemas de movimentação, no qual as peças são penduradas em ganchos e se movimentam através de transportadores automáticos, passando em frente às turbinas com uma velocidade especificada, expondo suas superfícies ao jato abrasivo.

Neste contexto, este presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência do pré-tratamento mecânico de jateamento na resistência anticorrosiva de um processo de pintura *e-coat* e *top-coat*.

Estes estudos colaboraram com o entendimento do processo de jateamento empregado em uma empresa do setor metal-mecânico, localizada na cidade de Caxias do Sul (RS) que realiza imersão dos produtos em tanques de tinta *e-coat* com acabamento *top-coat*, proporcionando uma excelente proteção anticorrosiva ao aço carbono.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência do pré-tratamento mecânico de jateamento na aderência e na resistência anticorrosiva de um processo de pintura *e-coat* e *top-coat*.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- a) avaliar a rugosidade superficial com e sem preparação mecânica de jateamento na performance anticorrosiva de um processo de pintura *e-coat* e *top-coat*;
- b) verificar a adesão do processo de pintura no substrato através de ensaios mecânicos;
- c) avaliar a resistência química à corrosão dos revestimentos *e-coat* e *top-coat* através de ensaios acelerados de corrosão;
- d) analisar a morfologia da superfície dos filmes de tintas e da secção transversal dos corpos de prova (com e sem preparação mecânica de jateamento) através de ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura por Emissão de Campo (MEV-FEG).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica serão apresentados e discutidos conceitualmente os tópicos fundamentais para a estruturação deste trabalho.

2.1 CORROSÃO

De acordo com Vaz, Acciari e Codaro (2011, p. 1288), “A corrosão pode ser explicada como a deterioração do material metálico que se inicia na sua superfície por ação química ou eletroquímica de um meio oxidante, agravada geralmente por esforços mecânicos.” O processo de corrosão é caracterizado de acordo com o “ciclo dos metais”, representado pela Figura 1, no qual um processo metalúrgico para obtenção do metal adiciona-se energia ao meio, já o processo de corrosão é o inverso do processo metalúrgico, ou seja, o metal retorna de forma espontânea aos óxidos que lhe deram origem, com conseqüente liberação de energia (NUNES; LOBO, 2014).

Figura 1 - Ciclo dos metais



Fonte: Adaptado de Nunes e Lobo (2014).

A corrosão é uma reação espontânea, no qual os materiais metálicos estão em constante transformação de modo que suas propriedades se modificam deixando

de satisfazer os fins a que se destinam. Na natureza os metais são encontrados geralmente sob a forma de compostos, dentre os mais comuns estão as ocorrências de óxidos e sulfetos metálicos. Pode-se dizer que o oxigênio e a água são alimentos básicos da corrosão, pois ao entrar em contato com os gases ou líquidos do meio ambiente onde os metais são expostos, o ferro se “enferruja” ao ar atmosférico e na água tanto na forma líquida ou vapor (GENTIL, 2011).

2.1.1 Custos da corrosão

Os principais problemas ocasionados pela corrosão no mundo inteiro no setor industrial estão sendo, o alto custo de projetos e redução da segurança operacional, redução da eficiência de processos, aumento do custo de manutenção, paradas completas de plantas industriais, perdas e contaminações de produção (ROBERGE¹, 1999 *apud* SERENÁRIO, 2018). As perdas econômicas que atingem as mais variadas áreas de atividade podem ser classificadas em diretas e indiretas. São perdas diretas: os custos de substituição das peças ou equipamentos que sofreram corrosão, incluindo-se energia e mão-de-obra; os custos e a manutenção dos processos de proteção (proteção catódica, recobrimentos, pinturas, etc.). Já as perdas indiretas são: atrasos; litígios; multas; indenizações; desgaste da imagem do produto e/ou serviço; danos compensatórios; paralisações acidentais; perda de produto; perda de eficiência. As perdas indiretas são mais difíceis de avaliar, pois nem sempre podem ser quantificados e pode ter um custo mais elevado comparado com a perda direta (GENTIL, 2011; AMORIM, 2020).

Um estudo inovador sobre os custos associados à corrosão metálica divulgada pela *US Federal Highway Administration* (FHWA) em 2002, estimou o custo total (direto e indireto) da corrosão na ordem de US\$ 276 bilhões por ano, o que representa 3,1 % do Produto Interno Bruto (PIB) dos Estados Unidos em 1998. No caso do Brasil, considerado o PIB na ordem de US\$ 880 bilhões (em 2005), podemos estimar o custo anual da corrosão em US\$ 26,4 bilhões (3,0 % do PIB) e o custo direto anual dos meios de combate à corrosão de US\$ 12 bilhões (1,38 % do PIB). Adotando-se as práticas já conhecidas de combate à corrosão, a economia anual pode chegar a US\$ 8 bilhões (1,0 % do PIB). O custo global atual da corrosão

¹ ROBERGE, P. **Handbook of corrosion engineering**. New York: McGraw-Hill, 1999.

é estimado em US\$ 2,5 trilhões, o que equivale 3,4 % do PIB global (2013). Usando as práticas de controle de corrosão disponíveis, estima-se que economias entre 15 % e 35 % do custo da corrosão possam ser realizadas, ou seja, entre US\$375 e US\$875 bilhões anualmente, em nível global (KOCH, 2017; AMORIM, 2020).

A resistência à corrosão é um parâmetro que fornece uma informação meramente comparativa da estabilidade de dois ou mais materiais num mesmo meio ou em dois ou mais meios, já a velocidade ou taxa de corrosão apresenta a informação da rapidez com que a reação de corrosão ocorre (VAZ *et al.*, 2011). Para análise da corrosão deve-se considerar o metal, meio corrosivo e o mecanismo na ocorrência do processo corrosivo (SILVA², 1981 *apud* RIBEIRO, 2018).

2.1.2 Formas de corrosão

Os tipos (ou formas) de corrosão (Figura 2), especialmente ocorridas em estruturas em aço, podem ser definidas considerando principalmente o aspecto visual da superfície corroída, podendo ser classificadas como: corrosão uniforme, por placas, alveolar, puntiforme ou por pite, intergranular (ou intercrystalina), intragranular (ou transgranular ou transcristalina), filiforme, por esfoliação, gráfitica, por esfoliação, gráfitica, dezincificação, empoamento pelo hidrogênio, em torno de cordão de solda (GENTIL, 2011).

- Corrosão uniforme: resulta em uma penetração bastante uniforme em toda a superfície metálica exposta, ocorrendo perda uniforme de espessura com formação de escamas de ferrugem. A corrosão uniforme geralmente resulta da exposição atmosférica (especialmente ambientes industriais poluídos) sofrendo ação do oxigênio e da umidade.
- Corrosão por placas: localiza-se em regiões da superfície metálica e não em toda sua extensão, formando placas com escavações.
- Corrosão alveolar: ocorre produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos, apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente menor do que o seu diâmetro.

² SILVA, P. F. D. Introdução à corrosão e proteção de superfícies metálicas. Belo Horizonte: Imprensa Universitária da UFMG, 1981.

- Corrosão por pites ou puntiforme: ocorre em pequenas áreas ou em pontos localizados na superfície metálica produzindo cavidades que apresentam profundidade geralmente maior o que seu diâmetro. Estas cavidades são chamadas em inglês de “*pitting*” e traduzidas para o português ficaram pites. O problema maior deste tipo de corrosão é que dependendo da espessura da chapa, podem apresentar perfurações que atravessam a espessura.
- Corrosão intergranular: a corrosão se processa entre os grãos da rede cristalina do material metálico.
- Corrosão transgranular: a corrosão se processa nos grãos da rede cristalina do material metálico.
- Filiforme: a corrosão se processa sob a forma de finos filamentos, mas não profundos, que se propagam em diferentes direções e que não se ultrapassam.
- Esfoliação: a corrosão se processa de forma paralela à superfície metálica, ocorre em chapas ou componentes extrudados que tiveram seus grãos alongados e achatados.
- Corrosão gráfitica: a corrosão se processa no ferro fundido cinzento em temperatura ambiente e o ferro metálico é convertido em produtos de corrosão, restando a grafite intacta.
- Dezincificação: é a corrosão que ocorre em ligas de cobre-zinco (latões), observando-se o aparecimento de regiões em coloração avermelhada contrastando com a característica coloração amarela dos latões.
- Empolamento pelo hidrogênio: penetração do hidrogênio atômico no material metálico, com rápida difusão, transformando-se em regiões com descontinuidade, em hidrogênio molecular, exercendo pressão e formando bolhas.
- Em torno do cordão de solda: forma de corrosão que se observa em torno de cordão de solda. Ocorre em aços inoxidáveis não-estabilizados ou com teores de carbono maiores que 0,03 %, e a corrosão se processa intergranularmente.

Figura 2 - Formas de corrosão



Fonte: Gentil (2011).

2.2 PRÉ-TRATAMENTO DA SUPERFÍCIE

O aço é composto por uma liga de ferro-carbono contendo também elementos como o manganês, silício, fósforo e enxofre, seja porque houve integração nas matérias primas (minérios e coque) na fabricação, ou porque foram adicionados para se obterem determinadas propriedades. Um contaminante pode ser considerado qualquer material diferente destes, mesmo se tratando de óxidos ou sais do ferro sobre a superfície do aço. De acordo com sua natureza os contaminantes são classificados em óleos ou graxas, suor e compostos solúveis (GNECCO, 2006).

O pré-tratamento e/ou preparação da superfície é uma das etapas de maior importância na obtenção de um desempenho satisfatório dos revestimentos. É

particularmente crítico para condições de imersão ou alta umidade, que não perdoam erros na preparação da superfície e aplicação de revestimento (SANTÁGATA *et al.*, 1998, p. 44).

Em alguns casos, conhecidos na literatura sobre aplicação de tintas sobre a superfície metálica, foram obtidos bons resultados, tendo como fator fundamental a limpeza das camadas oxidadas para se ter uma superfície metálica compacta e bem aderente. Não existe apenas um único pré-tratamento universal para as superfícies metálicas, pois são diversas as variáveis encontradas como o tipo do metal, o destino do mesmo, condições econômicas, além da qualidade e quantidade das impurezas ou sujidades, a serem removidas (GENTIL, 2011).

Segundo Gnecco (2006) preparar a superfície do aço significa executar operações que permitam obter limpeza e rugosidade. A limpeza elimina os materiais estranhos, como contaminantes, oxidações e tintas mal aderidas, que poderiam prejudicar a aderência da nova tinta. A rugosidade aumenta a superfície de contato e também ajuda a melhorar esta aderência. Existem processos manuais, químicos e mecânicos que podem ser utilizados para limpeza de superfície metálica como:

- lixamento manual;
- limpeza química;
- aplicação de nanocerâmico;
- ferramentas mecânicas (elétricas ou ar comprimido);
- jateamento abrasivo;
- jateamento a úmido;
- fosfatização.

2.3 PRÉ-TRATAMENTO MECÂNICO DE JATEAMENTO

O processo mecânico de jateamento com granalhas sobre a superfície de peças também conhecido como *shot peening* é o procedimento mais completo para remoção de escamas e ferrugem. Apresenta resultados eficazes tanto em rendimento como rapidez e principalmente em qualidade de limpeza. O jateamento deixa a superfície diretamente no metal, nela produzindo uma rugosidade bastante propícia para uma melhor “ancoragem”, aderência do *primer* ou primeira demão de tinta (GENTIL, 2011; SERIZAWA, 2005).

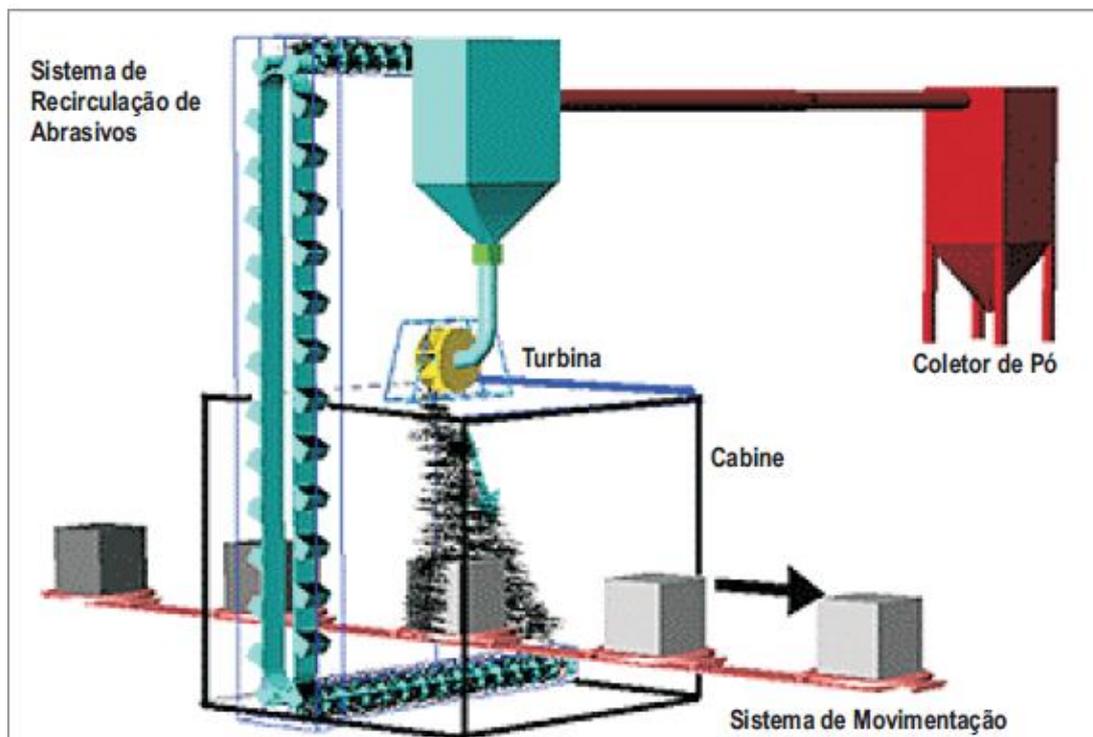
O jateamento com abrasivo é um processo de trabalho a frio no qual a superfície de uma peça é bombardeada com partículas, a elevadas velocidades. As tensões compressivas são benéficas no aumento da resistência a falhas por fadiga, fadiga por corrosão, tensão por trincas por corrosão, trincas assistidas por hidrogênio, desgaste e erosão causada por cavitação. Os benefícios obtidos devido ao trabalho a frio incluem endurecimento, resistência à corrosão, texturização da superfície, fechamento da porosidade e teste da ligação dos revestimentos (NIOSH, 1976).

A limpeza por jateamento abrasivo geralmente é considerada um processo econômico. É mais rápido que os processos competitivos de decapagem, limpeza eletroquímica ou acabamento manual e, portanto, reduz as horas de trabalho necessárias. Além disso, o investimento em equipamentos não é substancialmente influenciado por mudanças de modelo, procedimentos operacionais, ou rotatividade de pessoal, o treinamento dos operadores ocorre em um período mínimo de tempo e, em muitos casos os meios abrasivos, ou partes substanciais deles, podem ser reciclados para uso posterior (NIOSH, 1976).

Segundo Sinto (2020), os equipamentos para jateamento têm como função arremessar o abrasivo sobre superfícies das peças a serem processadas, impedir o escape do abrasivo, reaproveitá-lo e movimentar as peças de maneira a garantir a eficiência do processo. Na Figura 3 consta uma representação de um equipamento de jateamento. O coração do equipamento é a turbina, responsável pelo arremesso do abrasivo sobre as peças que serão processadas. A quantidade de abrasivo arremessado e sua velocidade são responsáveis pela eficiência do processo. Seus principais componentes são: palhetas, roda, impulsor e caixa de controle (SINTO, 2020).

Em 1904 teve início o processo de jateamento com a utilização de areia, porém, o excesso de poeira ao inalar pelas vias respiratórias ocasiona uma doença pneumoconiose provinda da sílica (SiO_2) denominada silicose (câncer de pulmão). No Brasil e, em vários lugares do mundo, é proibida a utilização da areia em jateamento, no entanto são permitidos apenas o uso de outros tipos de abrasivos tais como: granalhas de aço-carbono, aço inoxidável, escória de alumínio, esferas de vidro, cascas de nozes entre outros (MENEGHEL, 2017).

Figura 3 - Equipamento de jateamento



Fonte: Sinto (2020).

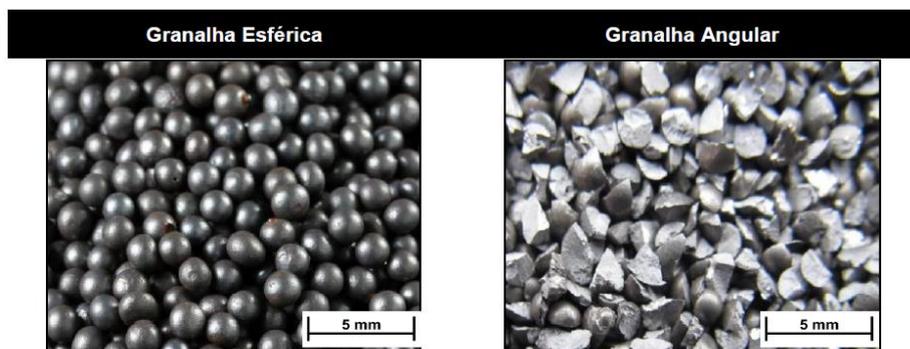
2.3.1 Granalha de aço-carbono

Um dos materiais mais importantes de jateamento disponíveis no mercado são as granalhas de aço. A fabricação da granalha passa por diversos procedimentos tais como: fundição de sucata e ligas; atomização por gravidade com jatos de água direcionais; remoção dos formatos irregulares; têmpera; britagem; revenimento; classificação por peneiramento e embalagem. Após o procedimento são obtidas partículas de diferentes tamanhos, morfologias e durezas. Em geral são produzidas duas estruturas de granalha de aço-carbono, a angular (*grit*) e a esférica (*shot*), conforme apresentado na Figura 4 (MENEGHEL, 2017).

No processo de jateamento da empresa em estudo se faz uso de granalhas de aço onde são tratadas termicamente, a angular tem varias angulosidades com um grande poder de abrasão, sendo utilizado para decapagem, *etching*, preparação de superfície e remoção de areias, através de jateamento e também, para o corte de granitos. A granalha esférica tem seu formato definido na atomização e é utilizada para limpeza de superfícies e *shot peening*. Devido a sua característica de uso,

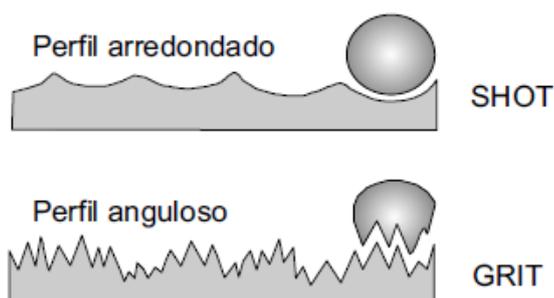
geralmente a dureza da granalha esférica é menor do que a granalha angular (IKK, 2016). Na Figura 5 está representado o perfil obtido com cada formato de granalha.

Figura 4 - Granalha esférica e angular



Fonte: Meneghel (2017).

Figura 5 - Perfil obtido com cada formato de granalha



Fonte: Gnecco (2006).

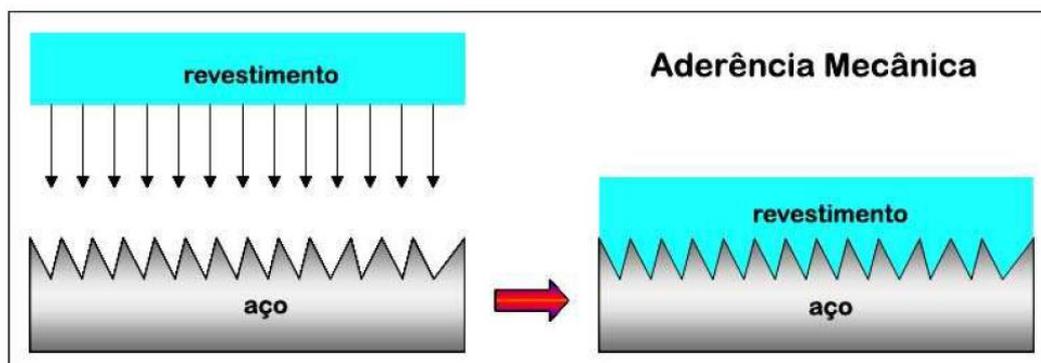
2.3.2 Perfil de rugosidade

É denominado perfil de rugosidade ou perfil de ancoragem a rugosidade gerada pelo abrasivo na superfície; esse perfil deve ser controlado porque, se for muito alto, podem ficar picos fora da camada de tinta e, por esse motivo, a corrosão se iniciará a partir destas áreas e, se for muito baixo, a tinta pode não aderir satisfatoriamente (GNECCO, 2006).

A Figura 6 representa esquematicamente a aderência mecânica de um revestimento ao substrato de aço. Na Figura 7 demonstra a diferença de uma superfície sem realizar jateamento mecânico (B), ou seja, uma superfície de aço polida, mesmo que totalmente limpa, pode não propiciar boas condições de aderência para determinados esquemas de pintura. A ilustração C da Figura 7,

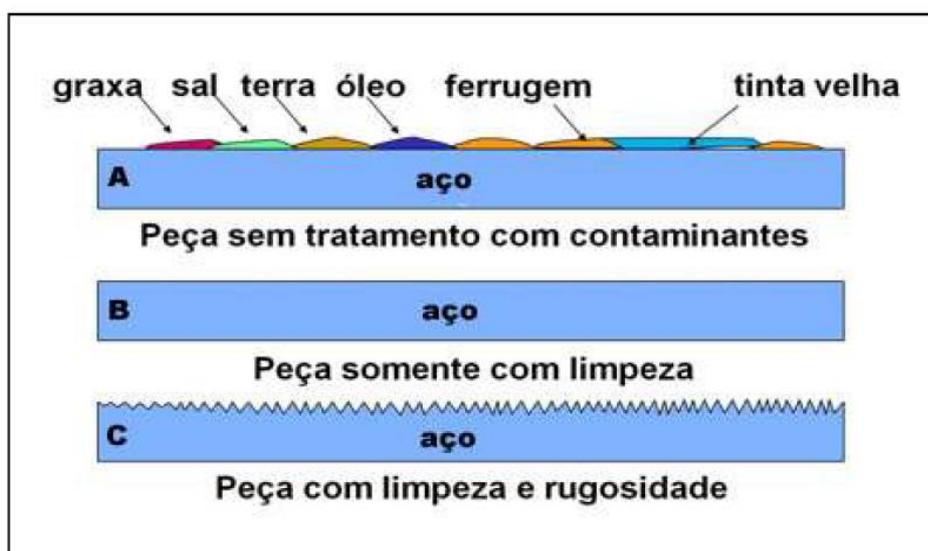
representa a superfície livre de contaminantes e com a rugosidade adequada, ou seja, encontrando-se na condição ideal (GNECCO; FRAGATA, 2014).

Figura 6 - Aderência mecânica de um revestimento ao substrato de aço



Fonte: Gnecco e Fragata (2014).

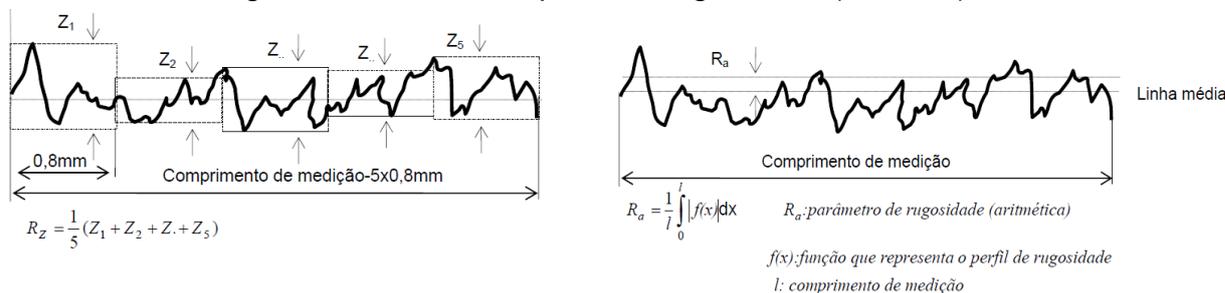
Figura 7 - Aspectos superficiais de substratos de aço



Fonte: Gnecco e Fragata (2014).

Conforme ilustrado na Figura 8, a determinação do perfil de rugosidade (R_z) no substrato metálico é realizado através da média aritmética de 5 valores de rugosidade parcial. A medida (R_z) permite avaliar a homogeneidade do perfil da superfície. A medição pode ser realizada por equipamento manual ou digital (rugosímetro) conforme descrito na norma NBR 15488/2007 (CASER, 2008; IKK, 2016).

Figura 8 - Medidas do perfil de rugosidade (Ra e Rz)



Fonte: Caser (2008).

A distribuição granulométrica adequada do abrasivo permite a isenção de oxidação rugosa e visível do substrato, proporcionando uma excelente aderência de revestimentos anticorrosivos. Alguns dos fatores determinantes para a obtenção de películas anticorrosivas são avaliados de acordo com a topografia do substrato, sua rugosidade e o grau de contaminantes. As películas anticorrosivas de alto desempenho podem ser afetadas negativamente pelos íons cloretos, sulfatos, etc, que podem permanecer na superfície preparada (CASER, 2008).

2.4 PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO POR IMERSÃO

Antes de realizar o processo de pintura nas peças o pré-tratamento químico também é essencial para depositar na superfície do substrato uma camada de conversão. Essa etapa proporciona a limpeza das peças metálicas proporcionando uma maior aderência da tinta, aumentando a resistência à corrosão e ao empolamento (SOARES, 2013). Segundo Weg (2018), as vantagens do sistema de pré-tratamento por imersão são: baixo custo de instalação; pode ser fora da monovia; melhor proteção em áreas difíceis de limpar (partes internas) e peças pequenas são facilmente limpas e manutenção simples. Já as desvantagens citadas são: dificuldade de automatizar, processo lento, tanques grandes requerem longo tempo de aquecimento; consome mais energia e a qualidade pode variar conforme a realização do controle do banho.

2.4.1 Desengraxe

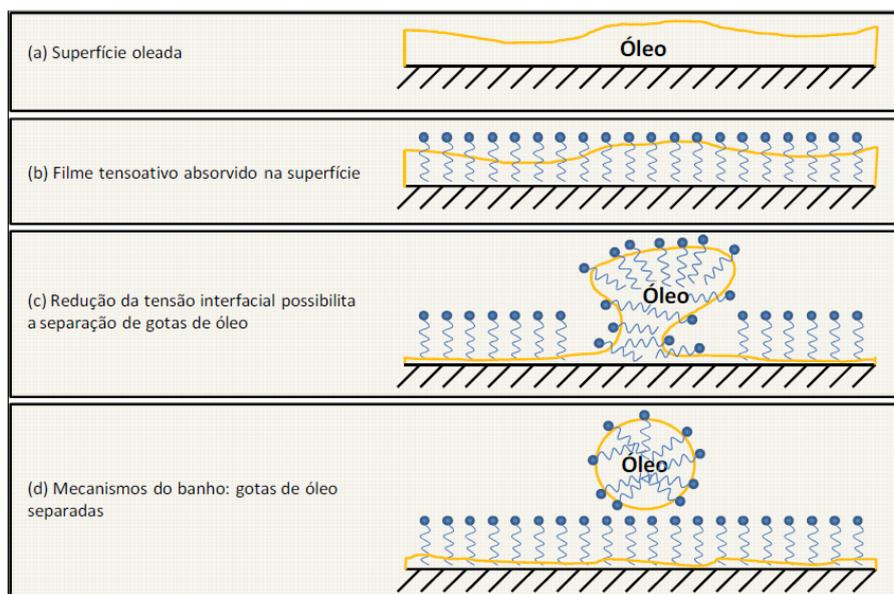
Um dos primeiros processos do pré-tratamento é o desengraxe. É considerado um dos estágios mais importantes, pois a limpeza da superfície afeta todos os processos decorrentes para a preparação ao recebimento do revestimento (UTECH³, 2002 *apud* SOARES, 2013).

Na maioria dos casos o processo de desengraxe é executado por meio de desengraxantes químicos em solução aquosa. A aplicação pode ocorrer por meio de *spray* ou por imersão. O processo de *spray*, além da ação química, oferece uma ação mecânica derivada da pressão impelida pelos bicos de *spray*. Já o processo de imersão oferece uma maior capacidade de atingir regiões internas das peças, de difícil acesso. Para o tanque é necessário um volume superior de líquido (uma vez que as peças precisam estar completamente submersas), e a ação mecânica praticamente inexistente (SOARES, 2013).

A Figura 9 ilustra o mecanismo de remoção de óleo da superfície do substrato, demonstrando que os desengraxantes possuem partículas tensoativas tendo uma parte solúvel em óleo e outra solúvel em água. Segundo Weg (2018), “Esta solubilidade faz com que o tensoativo atue na interface do meio aquoso/não aquoso.” Os tipos de tensoativos existentes são os aniônicos, catiônicos e não iônicos. Uma vez que as partículas tensoativas são absorvidas pelo óleo na superfície das peças, agem de maneira a reduzir as tensões de ligação do óleo com a peça, separando e removendo gotas contendo este óleo (WEG, 2018; SOARES 2013).

³ UTECH, B. **A guide to high performance powder coating**. Dearborn, Michigan: SME – Society of Manufacturing Engineers. 2002. 376p.

Figura 9 - Mecanismo de remoção de óleo da superfície do substrato



Fonte: Soares (2013).

A próxima etapa é o enxague com água industrial a temperatura ambiente. O objetivo dessa etapa é remover os resíduos do desengraxe que permaneceram sobre a superfície metálica, impedindo a contaminação das próximas etapas do pré-tratamento. Todos os estágios de enxague são responsáveis pela eliminação do arraste de produtos químicos provenientes dos processos antecedentes (SANTOS, 2016).

2.4.2 Fosfatização

O processo de fosfatização consiste em se recobrir peças metálicas com fosfato de zinco, ferro ou manganês insolúvel do íon metálico. A fosfatização é outro processo eficaz antes da aderência da camada do revestimento no metal. A fosfatização cria na superfície metálica, cristais pequenos e insolúveis de fosfato do metal, convertendo-a de metálico a não metálica. A finalidade da fosfatização é melhorar a aderência de tintas e tornar a superfície mais resistente à corrosão. Por reação química, os cristais se formam, o que resulta em uma ótima ligação com o metal e praticamente cobrem toda a superfície, isolando-a dos eletrólitos que venham a permear a camada de tinta (NUNES; LOBO, 2014).

A fosfatização é o revestimento de conversão, mais utilizado na proteção do aço carbono. Consiste em um banho composto, por ácido fosfórico diluído e fosfato de metal solúvel que com auxílio de metais pesados (cobre e níquel) que atuam como catalizadores, durante o processo químico, converte a superfície metálica em um óxido aderente (FERRO; LIMA, 2016). As reações que ocorrem durante a fosfatização estão demonstradas através das Equações 1, 2, 3, e 4.



Segundo Cape⁴ (1992 *apud* CAMILO, 2011), os fosfatos podem ser classificados em duas classes, os inorgânicos e os orgânicos. Os fosfatos inorgânicos (mais utilizados) podem ser citados como: fosfato de ferro [(Fe₅H₂(PO₄)₄.4H₂O)], fosfato de zinco (Zn₃(PO₄)₂.4H₂O), fosfato de manganês [(Mn-Fe)₅H₂(PO₄)₄.4H₂O], fosfato tricatiônico (Zn, Ni, Mn) e fosfato de zinco e nióbio (Zn, Nb).

Na empresa em estudo é utilizado o fosfato de ferro o qual possui as seguintes características (SOARES, 2013):

- tecnologia de conversão gerando uma camada amorfa;
- formação de borra 1,0-2,0 g/m²;
- controle analítico fácil;
- pior desempenho em testes anticorrosivos em relação aos outros fosfatos;
- baixo custo com tratamento efluentes;
- opera em temperatura ambiente;
- passível de alta contaminação nos estágios subsequentes devido a alta carga de ferro nos enxágues;
- baixa geração de resíduos classe I (perigosos);
- contém metais pesados.

⁴ CAPE, Thomas W. Phosphate conversion coatings. *In: Corrosion. ASM Handbook. V. 13. 1992. P-869-881.*

Os métodos de fosfatização aplicados podem ser por imersão ou pulverização. Quando a peça passa por uma sequência de banhos em tanques, com controle de tempo, de temperatura, controle na concentração de produtos químicos e controle na contaminação desses banhos, o método é por imersão (NUNES; LOBO, 2014).

De acordo com Santos (2016), após a etapa de fosfatização é realizado outro enxágue com água industrial visando remover os resíduos e a acidez oriunda da etapa anterior, evitando assim a contaminação dos próximos estágios.

Ao final de todo processo é efetuado um enxágue com água desmineralizada (DI) por imersão e à temperatura ambiente, pois tem-se a necessidade de uma água com condutividade elétrica $\leq 10 \mu\text{S}/\text{cm}$ em virtude da eficiência de remoção da acidez excessiva e os sais residuais oriundos do estágio anterior (SANTOS, 2016). A água desmineralizada ou deionizada é a mais adequada para processos industriais, pois não contém em sua composição sais minerais (MIERZWA, 2002).

2.5 REVESTIMENTOS POR PINTURA

Os revestimentos por pintura devem ser capazes de formar uma barreira para romper a conexão metal-eletrólito a fim de retardar a reação de corrosão do substrato metálico. Como nenhuma tinta é indestrutível, todos os revestimentos orgânicos sofrerão deterioração normal com o tempo, no entanto, sua taxa pode ser significativamente reduzida, escolhendo um revestimento de alta qualidade e/ou utilizando a técnica de preparação e aplicação de superfície apropriada (SANTÁGATA *et al.*, 1998, p. 44).

Na durabilidade dos revestimentos por pintura, tem-se como uma propriedade essencial a aderência. Quando o substrato fica exposto sob condições de imersão ou meios com alta umidade relativa, um dos primeiros sintomas é o aparecimento de bolhas e, posteriormente, descascamento e/ou corrosão significando uma fraca aderência inicial no revestimento. A preparação da superfície é um dos fatores mais importantes no qual se obtêm uma excelente aderência dos revestimentos por pintura nos substratos (GNECCO; FRAGATA, 2014).

A pintura então é considerada um processo de revestimento de uma superfície por meio de tintas onde estende-se a três ramos da atividade humana:

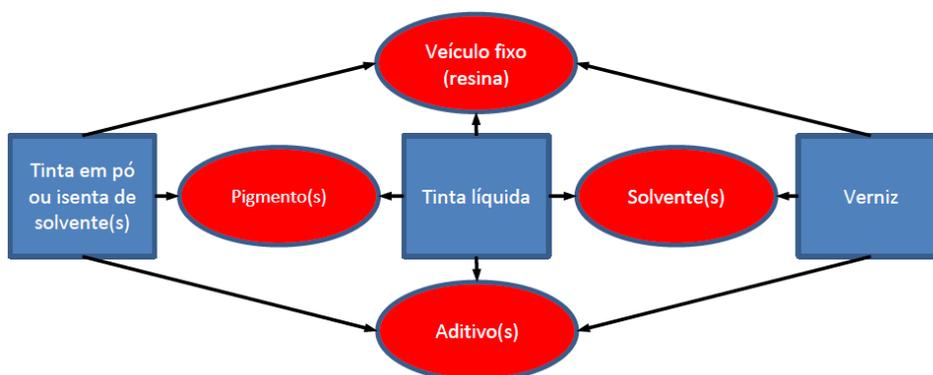
pintura arquitetônica, pintura artística e pintura industrial. Por possuir a função mais importante a pintura industrial serve como proteção anticorrosiva de estruturas metálicas e de equipamentos (NUNES, 2014).

Os esquemas de pintura ou aplicação de tintas é o método de proteção anticorrosiva existente mais empregado, apresentando um leque de propriedades importantes, como facilidade de aplicação e de manutenção, relação custo-benefício atraente, e pode proporcionar, além disso, outras propriedades como (GENTIL, 2011):

- finalidade estética;
- auxílio na segurança industrial;
- sinalização;
- identificação de fluido em tubulações ou reservatórios;
- impedir a incrustação de microrganismos marinhos em cascos de embarcações;
- impermeabilidade;
- permitir maior ou menor absorção de calor, através do uso correto das cores;
- diminuição da rugosidade superficial;

Segundo Nunes (2014) “As tintas industriais são composições químicas líquidas ou em pó capazes de formar uma película durante a aplicação e após a secagem e/ou cura”. Conforme demonstrado na Figura 10, em uma tinta líquida os componentes fundamentais são considerados os veículos fixos (resinas), pigmentos, solventes (veículo volátil) e aditivos. Nas tintas em pó contêm todos os componentes menos os solventes, o mesmo ocorre nas tintas sem solventes. Os vernizes possuem todos os componentes de uma tinta, menos os pigmentos. Na fabricação e formulação de uma tinta, esses componentes são precisamente selecionados, qualitativa e quantitativamente, sempre atendendo os requisitos técnicos desejados ao produto final (GENTIL, 2011).

Figura 10 - Componentes básicos das tintas e vernizes



Fonte: Cardoso (2013).

Conforme mostrado na Tabela 1, apesar de ser um método bastante antigo a pintura teve um grande avanço tecnológico das tintas no decorrer do século XX, em decorrência do desenvolvimento de novos polímeros (resinas). O desenvolvimento tecnológico nos últimos anos neste setor tem sido intenso, não só em relação a novos tipos de resina e de outras matérias-primas empregadas na fabricação das tintas, mas, também, em relação a novos métodos de aplicação das mesmas (GENTIL, 2011).

Tabela 1 - Desenvolvimento de polímeros

| RESINA | PERÍODO (DÉCADA) |
|------------------|------------------|
| Alquídica | 1920 |
| Vinílica | 1920 |
| Acrílica | 1930 |
| Borracha clorada | 1930 |
| Epóxi | 1940 |
| Poliuretana | 1940 |
| Silicone | 1940 |

Fonte: Gentil (2011).

As principais características fundamentais das tintas são (FAZENDA, 2006; CAVALCANTE, 2010):

- **coesão:** consiste na coesão entre diversos constituintes do revestimento, de forma a apresentar uma película contínua, isenta o máximo possível de falhas, como poros, bolhas, trincas;
- **adesão ao substrato:** consiste na perfeita e permanente aderência à superfície a ser protegida. A aderência ao substrato é obtida em maior ou menor grau pela ancoragem mecânica da tinta nas irregularidades da superfície e, em parte, pelas forças de atração de natureza molecular.

As propriedades gerais das tintas podem ser citadas como (FAZENDA, 2006; CAVALCANTE, 2010):

- **absorção e transferência de umidade:** há duas situações a serem consideradas quanto à presença de umidade na película. Em primeiro lugar, a simples absorção de água, ou seja, a penetração de água nas moléculas ou por entre as moléculas. Neste caso, a água contribui para a diminuição da resistividade elétrica, devido à maior passagem do eletrólito. Em segundo lugar, a penetração de água através da película, que dependerá, entre outros fatores, da permeabilidade, da aderência e dos fenômenos de osmose e eletrólise;
- **resistência química:** consiste na capacidade da película de resistir ao ataque de agentes químicos existentes no meio corrosivo;
- **resistência à abrasão:** consiste na resistência ao desgaste provocado pela ação mecânica do meio;
- **resistência ao intemperismo:** diz respeito à capacidade da película de resistir à ação dos agentes naturais, como sais, chuvas e ventos, com reduzida perda de brilho, de cor e de espessura;
- **resistência à temperatura:** refere-se à ação de temperaturas sem amolecer ou mesmo sofrer outros processos de degradação, como escurecimento e queima.

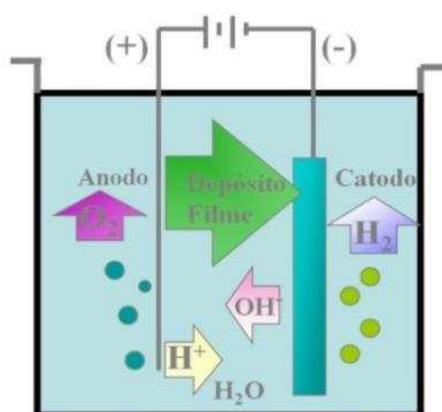
2.5.1 Pintura e-coat

No início dos anos 60 na Ford a pintura por eletrodeposição foi utilizada pela primeira vez, onde era usada para pintar rodas e em seguida para pintar carros, pelo

processo Anódico. Foi realizado no começo da década de 70 o processo Catódico, onde atualmente domina o mercado de pintura por eletrodeposição. A pintura por meio de eletrodeposição catódica é conhecida como: *E-coat*, *Elpo*, *Electrocoating*, *ETL*, *Electropaint* entre outros. O termo mais popular usado no Brasil é o de “KTL” que tem origem alemã “*Katho-dische Tauch Lackierung*” (Pintura Catódica por Imersão) (VITOR *et al.*, 2018).

A Figura 11 demonstra como ocorre o processo de eletrodeposição catódica, onde a peça recebe cargas negativas e as partículas sólidas em suspensão no banho são mantidas com cargas positivas, desta forma ocorre a atração destas partículas pela peça, sendo que este processo só é encerrado quando a superfície metálica da peça estiver isolada eletricamente, ou seja, quando toda a superfície estiver coberta com o filme de tinta. A composição do banho de *e-coat* é composto por 80 a 90 % de água desmineralizada (DI), 0 a 5 % de pigmento, 10 a 20 % de pasta e resina polimérica e 0 a 5 % de solventes orgânicos (SOARES, 2013; SANTOS, 2016).

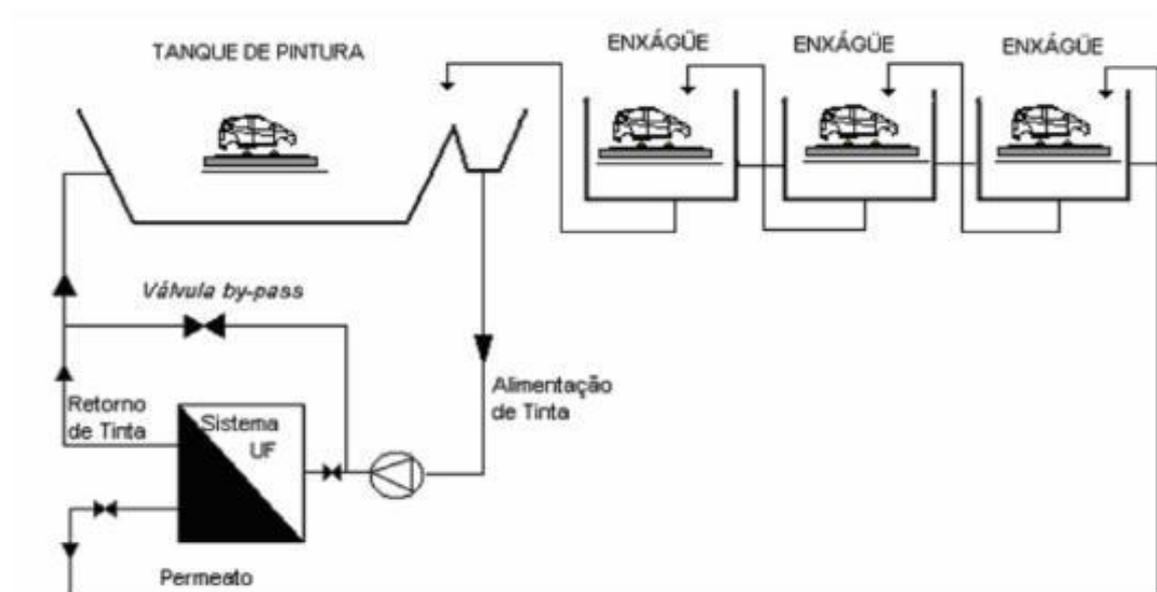
Figura 11 - Processo por eletrodeposição



Fonte: Soares (2013).

A ultrafiltração é um sistema utilizado com a finalidade de originar o permeado que será empregado no enxágue das peças após a pintura *e-coat*, o qual permite a regeneração da tinta que foi sendo arrastada pela peça, ao invés de ser aderida a superfície da mesma (SILVA, 2012). Na Figura 12 está representado o desenho esquemático do sistema de ultrafiltração do processo de pintura *e-coat*.

Figura 12 - Sistema de ultrafiltração (UF) da pintura *e-coat*



Fonte: Villas (2005).

Dentre as vantagens da pintura *e-coat* podem ser observadas: economia de material e custos, automatização, proteção ao meio ambiente, confiabilidade do processo, cobertura uniforme da camada, redução dos riscos de incêndios explosões (tintas à base d'água) e economia de energia. Após a pintura *e-coat* é realizado a cura da pintura em estufa (VILLAS, 2005).

2.5.2 Pintura *top-coat*

Como estágio posterior ao *e-coat*, pode ser aplicado o *top-coat* (pintura de acabamento), podendo ser executada com uma tinta líquida ou pó, por meio de sistemas de aplicação automáticos ou manuais. A Figura 13 mostra um exemplo de pintura *top-coat* pó com aplicadores manuais. A pintura pó envolve a aplicação de pequenas partículas de resina e pigmento (pó), na superfície de um substrato, submetendo este pó ao calor para que derreta e funda-se na superfície da peça, criando uma pintura contínua e uniforme. A pintura pó oferece excelente resistência à corrosão, impacto e abrasão, assim como retenção de brilho (SOARES, 2013).

Figura 13 - Processo de pintura *top-coat* pó



Fonte: A Autora (2020).

As tintas em pó são definidas como partículas finamente divididas de polímero orgânico, termoplástico ou termorrígido. Esses dois tipos principais possuem as seguintes características (WEG, 2018):

Termoplásticas (Nylon, Vinil, PVC, etc):

- não reagem quimicamente durante a aplicação ou cura;
- após aplicada, volta a fundir com aquecimento;
- aplicada em altas camadas, têm baixa aderência.

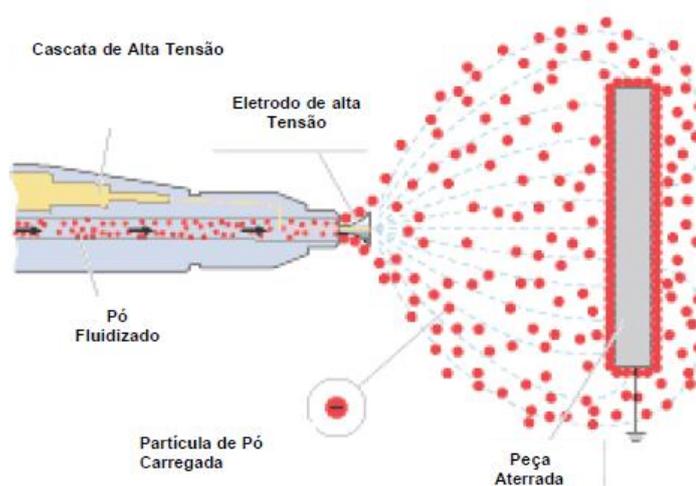
Termofixas (Epóxi, Poliéster, Acrílico, PU, etc):

- mais comumente utilizadas hoje em dia;
- reagem quimicamente durante a cura;
- forma uma rede de polímeros (cross-link);
- não volta a fundir se aquecida após curada;
- podem ser funcionais e/ou decorativas;
- podem ser aplicadas em camadas mais baixas.

Como mostrado na Figura 14, os processos de pintura pó são geralmente executados por meio de aplicação eletrostática, sendo que o pó passa por um sistema que o carrega eletrostaticamente com cargas positivas e negativas. Uma

vez que a peça a ser pintada encontra-se aterrada, ocorre a atração das partículas para a superfície da peça (SOARES, 2013).

Figura 14 - Aplicação tinta em pó



Fonte: Weg (2018).

Em geral, as películas das tintas em pó, adequadamente curadas, apresentam excelentes propriedades mecânicas, como, por exemplo, dureza levada e boa resistência ao impacto e à abrasão, e estéticas. No caso ao aspecto da proteção anticorrosiva, é importante destacar que as películas das tintas em pó, adequadamente curadas, podem apresentar um grau de impermeabilidade muito superior ao das tintas líquidas convencionais, mesmo com espessuras mais baixas que estas últimas. Como a maioria dos revestimentos, a tinta em pó apresenta 3 componentes básicos: resina, pigmento e aditivo. Os pigmentos são responsáveis por dar a cor ao produto podendo ser orgânicos ou inorgânicos e os aditivos que são responsáveis por vários aspectos do produto como: brilho, textura, cura, etc. As resinas são responsáveis pelas características das tintas, dentre as mais utilizadas no Brasil estão (GENTIL, 2011; WEG, 2018):

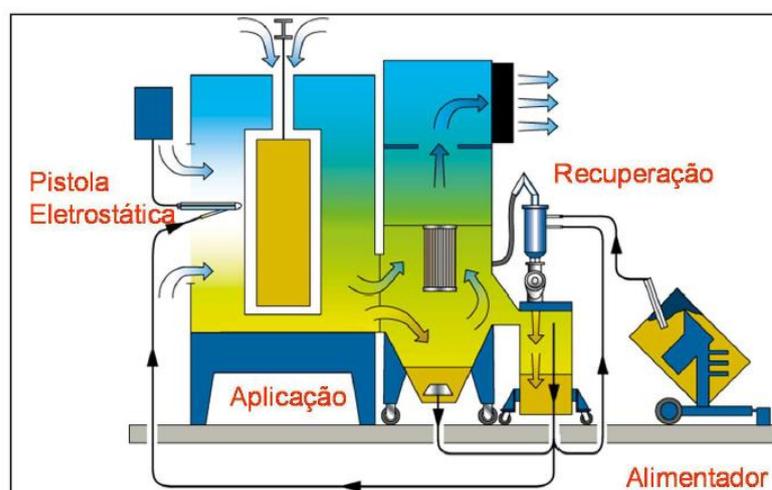
- Tintas à base de resinas epoxídicas (epóxi): além de suas notáveis propriedades mecânicas, estas tintas apresentam excelente resistência química e à corrosão. Porém possuem baixa resistência à radiação ultravioleta (UV).
- Tintas à base de resinas poliéster-epóxi (híbridas): atualmente são as tintas em pó mais utilizadas nos diversos segmentos da indústria.

Possuem baixa resistência à radiação ultravioleta (UV) e boa resistência química.

- Tinta à base de resinas de poliéster puro: estas tintas são indicadas para equipamentos ou estrutura que vão ficar expostas ao intemperismo, em função de possuírem excelente resistência aos raios ultravioleta. Portanto, quando expostas ao intemperismo natural apresentam boa retenção de cor e brilho. Possuem também uma boa resistência química.

A Figura 15 demonstra o esquema de funcionamento de um equipamento de aplicação de pintura pó. Pode ser notado onde ocorre a aplicação do pó por meio da pistola eletrostática, bem como o fluxo de recuperação do pó que não é aderido à peça pintada. Esse pó retorna à pistola e é complementado com uma alimentação externa paralela. Após a aplicação do *top-coat* (pó), a reação de fusão do pó é iniciada em fornos de cura denominados de estufas. Estas estufas são responsáveis por produzir e manter o calor necessário para a reação química da pintura pó. As peças devem ser expostas ao calor para que a camada de pó, que reage na superfície das peças, alcance as propriedades especificadas. A quantidade exata de calor e o tempo de permanência da peça na estufa propiciam a obtenção das propriedades químicas e mecânicas requeridas (SOARES, 2013).

Figura 15 - Equipamento de pintura pó



Fonte: Soares (2013).

Neste estudo as etapas a seguir foram realizadas em uma empresa do setor metal-mecânico, localizada na cidade de Caxias do Sul (RS), no setor de pintura *e-coat*, com objetivo de avaliar a influência do pré-tratamento de jateamento na aderência e na resistência anticorrosiva de um processo de pintura *e-coat* e *top-coat*.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste Capítulo serão descritos os materiais utilizados, bem como os métodos para a realização deste trabalho.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Corpos de prova

Foram avaliadas chapas de aço carbono LN-RAND-250 laminadas a quente, com as dimensões de 200 mm x 100 mm x 3 mm, conforme sua composição química especificada na Tabela 2. Para o ensaio de flexibilidade utilizaram-se chapas ACT (material padrão para ensaio de flexibilidade).

Tabela 2 - Composição química do aço carbono LN-RAND-250

| Elemento | C | Mn | P | S |
|-----------------|----------|-----------|----------|----------|
| % | 0,22 | 2 | 0,03 | 0,015 |

Fonte: Santos (2015).

3.1.2 Granalha angular de aço carbono

Para o pré-tratamento mecânico de jateamento, foram utilizadas granalhas de aço angulares G-40C, com sua estrutura descrita na Tabela 3, de acordo com a norma internacional SAE J-444. A densidade da granalha é de 7,3 g/cm³ e sua dureza Vickers é 392 – 528 HV 1,0 kg (40 – 51 HRc). A composição química do abrasivo está demonstrada na Tabela 4 (IKK, 2015).

Tabela 3 - Estrutura da granalha G40C

| Tamanho da peneira (mm) | Número da peneira ASTM | Acúmulo (%) |
|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 1,18 | 16 | 0 |
| 0,425 | 40 | 70 min. |
| 0,300 | 50 | 80 min. |

Fonte: IKK (2015).

Tabela 4 - Composição química da granalha G40C

| Carbono - C (%) | Manganês - Mn (%) | Silício - Si (%) | Enxofre - S (%) | Fósforo - P (%) |
|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 0,80 - 1,20 | 0,6 - 1,2 | 0,4 min. | 0,05 max. | 0,05 max. |

Fonte: IKK (2015).

3.1.3 Pré-desengraxe

O pré-desengraxe é composto por desengraxante na concentração de 1,5 - 2,5 % (v/v), com alcalinidade livre de 3,3 - 5,5 ml, alcalinidade total deve ser \leq Livre x 3,0 e o teor de óleo deverá ser \leq 1,0 ml. A composição química do banho contém hidróxido de potássio, álcool etoxilado C9-11, álcool etoxilado e propoxilado C12-18, ácido octenilsuccínio, 2-etilhexaoato de potássio, poloxaleno e ácido etidronico. A temperatura de operação entre 50 – 60 °C, com tempo de imersão de 120 segundos.

3.1.4 Desengraxe

O desengraxe é composto por desengraxante na concentração de 4,0 – 5,0 % (v/v), com alcalinidade livre de 8,8 – 9,9 ml, alcalinidade total deve ser \leq Livre x 2,5 e o teor de óleo deverá ser \leq 0,5 ml. A composição química do banho contém hidróxido de potássio, álcool etoxilado C9-11, álcool etoxilado e propoxilado C12-18, ácido octenilsuccínio, 2-etilhexaoato de potássio, poloxaleno e ácido etidronico. A temperatura de operação entre 65 – 75 °C, com tempo de imersão de 180 segundos.

3.1.5 Enxague I

O enxague I é composto por água recuperada com alcalinidade total $\leq 1,0$ ml e o pH entre 7,0 – 9,50. A temperatura de operação deve ser a ambiente, com tempo de imersão de 45 segundos.

3.1.6 Fosfato de ferro

É composto por fosfatização com banho de fosfato de ferro com concentração de 3,5 – 4,5 % (v/v), com alcalinidade total entre 7,0 – 9,0 ml, pH de 4,4 – 5 e deve formar uma camada de 0,4 – 1,1 g/m² de fosfato de ferro. A composição química do banho contém 3-nitrobenzenossulfonato de sódio e ácido fosfórico. A temperatura de operação deve estar entre 30 – 50 °C, com tempo de imersão de 180 segundos.

3.1.7 Enxague II

O enxague II é composto por água industrial com acidez total $\leq 1,0$ ml, com pH entre 5,50 – 7,50. O banho deve trabalhar a uma temperatura ambiente com tempo de imersão de 45 segundos.

3.1.8 Enxague III

O enxague III é composto por água desmineralizada (DI), com pH entre 5,5 - 7,5 mantendo sempre uma condutividade < 50 μ S/cm. O banho deve trabalhar a uma temperatura ambiente com tempo de imersão de 30 segundos.

3.1.9 Pintura e-coat

É composta por 80 a 90 % de água desmineralizada (DI), 0 a 5 % de pigmento, 10 a 20 % de pasta e resina polimérica e 0 a 5 % de solventes orgânicos. O banho deve manter de 19,5 – 21,5 % de sólidos, condutividade entre 1000 – 1700 μ S/cm, com relação de pigmentos (P/B) entre 0,08 – 0,12 e pH de 5,7 - 6,1. A

composição química do banho é composto por uma resina epóxi uretano, bis(2-(2-butoxi)etóxi)metano, aminas, alquil de coco, etoxiladas, 4-metilpentano-2-ona. A pasta é composta por caulim, butil cellosolve, óxido de dibutilestanho, negro de fumo, 4-metilpentano-2-ona e dióxido de titânio. O solvente orgânico utilizado é o butil cellosolve. A água DI utilizada é água purificada através do processo de osmose reversa, quimicamente pura e isenta de sais solúveis. A temperatura de operação deve estar entre 28 – 32 °C com tempo de imersão de 240 segundos com um nível de tensão de 240 volts.

3.1.10 Enxague IV e enxague V (UF I e UFII)

O enxague pós *e-coat* é um banho de ultrafiltrado (UF) que promove a remoção dos resíduos de tinta eletroforética aderida mecanicamente nas peças, após a aplicação (pintura), conferindo melhor aparência às peças, além de gerar economia de tinta. O sistema de ultrafiltração é composto por membranas especiais, as quais geram, por filtração, a solução de “permeato”. Esta solução serve para lavar as peças após a aplicação, alimentando os estágios de pós enxágue. Remove contaminantes que podem ser arrastados do fosfato para o banho. Em circuito fechado, o “permeato” recupera a tinta não eletrodepositada arrastada pelas peças.

Os parâmetros de trabalho do banho de UF I deverá ser < 0,6 % de sólidos, com condutividade < 1400 μ S/cm e pH entre 5,0 – 6,0, trabalhando com temperatura ambiente, com tempo de imersão de 60 segundos. Já para o banho de UF II a quantidade de sólidos deve ser < 0,8 %, com uma condutividade < 1400 μ S/cm e pH entre 5,0 – 6,0, também com operação a temperatura ambiente, com tempo de imersão de 60 segundos.

3.1.11 Estufa pós *e-coat*

O tempo e temperatura da estufa pós *e-coat* influenciam no grau de cura, cor e aspecto do filme. A temperatura da estufa será de 210 °C por 1 hora.

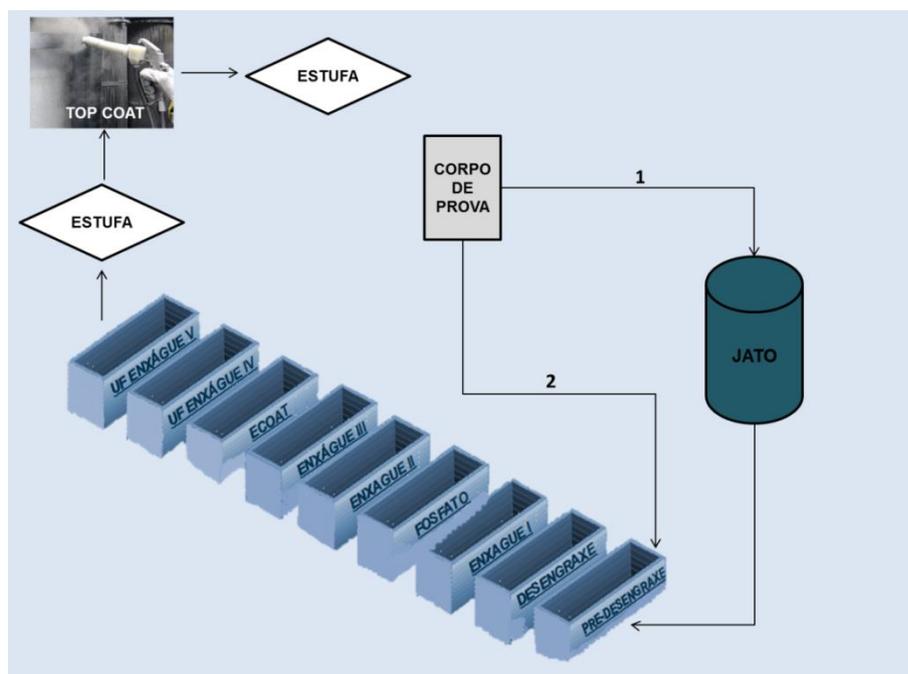
3.1.12 Pintura *top-coat*

A aplicação da tinta pó foi com utilização de uma pistola eletrostática com regulagem do equipamento com uma tensão de 60 – 80 KV, corrente de 20 – 30 μ A, vazão de tinta pó de 80 – 100 e vazão de ar de 3 – 5. A composição da tinta utilizada é um poliéster branco semi brilho contendo dióxido de titânio, sulfato de bário e 1,3,5-tris(oxiranilmetil)-1,3,5-triazina-2,4,6(1H, 3H, 5H)-triona. Após a aplicação da tinta foi realizada a cura da mesma em estufa com uma velocidade de 2 m/min a uma temperatura de 200 °C.

3.2 MÉTODOS

O método de preparação dos corpos de prova seguiu o procedimento apresentado na Figura 16. No procedimento 1 será realizado o pré-tratamento mecânico de jateamento no corpo de prova, em diferentes velocidades do transportador (1000 mm/min, 2000 mm/min e 3000 mm/min), já no procedimento 2 o corpo de prova não receberá a preparação mecânica do jato para o recebimento da pintura *e-coat* e *top-coat* pó. Após o pré-tratamento e pintura dos corpos de prova, estes foram encaminhados para as análises químicas, mecânicas e morfológicas para avaliação dos resultados.

Figura 16 - Metodologia para preparação dos corpos de prova



Fonte: A Autora (2020).

3.2.1 Ensaio de rugosidade

Utilizou-se um rugosímetro digital, marca mitutoyo SJ-210 para o ensaio de rugosidade. O ensaio foi realizado conforme norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 15488 (2007). A determinação da rugosidade foi realizada antes do processo de pintura em três pontos de cada corpo de prova, considerando as medidas de Rz que representa a altura entre o ponto máximo e mínimo dos picos e vales da superfície.

3.2.2 Aderência

O ensaio de aderência avalia o deslocamento da tinta, ou seja, consiste em avaliar a aderência da tinta sobre a superfície do metal, assim como as camadas entre si. O espaçamento entre cada linha é estabelecido conforme Norma, no caso NBR 11003 (2009). Após foi feito os cortes, e friccionada uma fita do tipo filamentosa 3M Scotch e avaliado o quanto de tinta é destacada do substrato após remoção da fita. Nos resultados obtidos foi realizada uma análise visual, comparando com a

classificação fornecida pela norma. A análise de aderência foi avaliada também após realização do ensaio em névoa salina.

3.2.3 Brilho

O teste de brilho nos corpos de prova foi realizada com base na norma ASTM D523-08 (2008), em um medidor de brilho MultiGloss 268 Plus da marca BYK Gardner com calibração do equipamento para ângulo de 60° e 96,5 UB.

3.2.4 Espessura da camada de tinta

A determinação da espessura da camada de tinta foi realizada com a utilização de um medidor de camada da marca elcometer, modelo 456C-standard, com sonda para substrato de bases metálicas ferrosas. A leitura da espessura foi diretamente na escala do aparelho, em micrômetros. Todos os corpos de prova tiveram suas espessuras de tinta medidas em cinco pontos com o aparelho.

3.2.5 Ensaio em névoa salina

O ensaio em névoa salina foi realizado no Laboratório de Corrosão e Proteção Superficial (LCOR) da Universidade de Caxias do Sul.

A durabilidade anticorrosiva da pintura foi avaliada pelo ensaio de névoa salina, também conhecido por *salt spray*, conduzido em uma câmara fechada da marca Bass, modelo USX-6000/2009, identificada como CC, conforme a norma ASTM B117 (2011). Os corpos de prova foram submetidos a uma solução de 5 % \pm 1 % de NaCl com uma faixa de pH de 6,5 a 7,2, com controle de temperatura da câmara de 35 °C \pm 2 °C e com uma pressão (constante) do ejetor de 0,7 kgf/cm² a 1,7 kgf/cm². O volume da névoa e a massa específica coletada estavam de 1 mL/h a 2 mL/h e 1,0243 g/cm³ a 1,0373 g/cm³ respectivamente. As amostras foram posicionadas na câmara em um ângulo entre 15° e 30° em relação à vertical, assim permite a condensação da névoa sobre as amostras, onde as amostras ficaram no ensaio em um período de 576 horas. A preparação das amostras (limpeza) foi

realizada com água deionizada e a proteção de bordas foi procedida com cera de abelha.

O grau de empolamento das amostras foi avaliado conforme a norma ASTM D714-02 (2017) e NBR-5841 (2015), para avaliar o grau de formação de bolhas que podem se desenvolver na superfície. Para a determinação da Migração Subcutânea foi avaliada conforme a norma ASTM D 1654-08 (2008) – Procedimento A – Método Deslocamento (raspagem) e também segundo a NBR-8754 (1985), após término do ensaio de névoa salina.

3.2.6 Ensaio de flexibilidade

O ensaio de flexibilidade visa avaliar a resistência à flexibilidade da tinta quanto a formação de rachaduras e perda de aderência da tinta. O procedimento adotado obedeceu a norma ASTM D522-1 (2017), na qual utilizou-se um mandril cônico BYK-Gardner modelo Smg 1416.

3.2.7 Microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (MEV-FEG)

A morfologia do material foi avaliada por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (MEV-FEG) no Laboratório Central de Microscopia Professor Israel Baumvol (LCMIC) da UCS. Nesta análise foi avaliada a morfologia dos filmes de tintas e da secção transversal dos corpos de prova (com e sem preparação mecânica), bem como o perfil de rugosidade gerado pelo jateamento mecânico. Foi realizado embutimento com resina acrílica condutora em todas as amostras e recobertas por uma fina camada de ouro para melhorar a condutividade eletrônica.

Na técnica de microscopia eletrônica de varredura, utiliza-se um feixe de elétrons que incide sobre a amostra. Para a obtenção das imagens, esses elétrons precisam ser coletados e exibidos sobre um tubo de raio catódico. O feixe pode ser refletido ou retro espalhado, o que difere nas imagens obtidas. É possível obter uma análise das características superficiais do material analisado com ampliações entre 10 a 1 milhão de vezes de aumento, permitindo uma análise qualitativa e semi

quantitativa da morfologia, microestrutura e composição elementar da amostra analisada (SERENÁRIO, 2018).

3.2.8 Espectroscopia por dispersão em energia (EDS)

A composição química da superfície do material foi avaliada por meio da técnica de espectroscopia por dispersão em energia (EDS) no Laboratório Central de Microscopia Professor Israel Baumvol (LCMIC) da UCS. Nesta técnica a energia do fóton de raios X emitido é uma função dos níveis de energia do átomo. Como o nível de energia dos átomos são bem definidos e característicos de cada tipo de átomo, a energia do fóton de raios X é específica de cada elemento e contém as informações sobre a composição química de cada espécie (CAVALCANTE, 2010).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ENSAIO DE RUGOSIDADE

Na Tabela 5 são apresentados os resultados referentes ao ensaio de rugosidade, com o desvio padrão, obtidos antes do processo de pintura, referente às amostras sem jateamento (sem jat.) e com velocidades de jateamento de 3000 mm/min, 2000 mm/min e 1000 mm/min em cada corpo de prova (CP). Todos os substratos obtiveram um jateamento entre Sa 2 e Sa 2 ½, com uma rugosidade de 20 – 38 Rz.

Nos resultados obtidos observa-se que o perfil de rugosidade tende a aumentar conforme a velocidade de jateamento diminui, ou seja, quanto maior é o tempo de exposição das peças em frente às turbinas, maior será o perfil de rugosidade gerado no substrato, ocorrendo em média 16,25 % de aumento do perfil de rugosidade para cada diminuição de 1000 mm/min de velocidade.

Tabela 5 - Análise do perfil de rugosidade das amostras

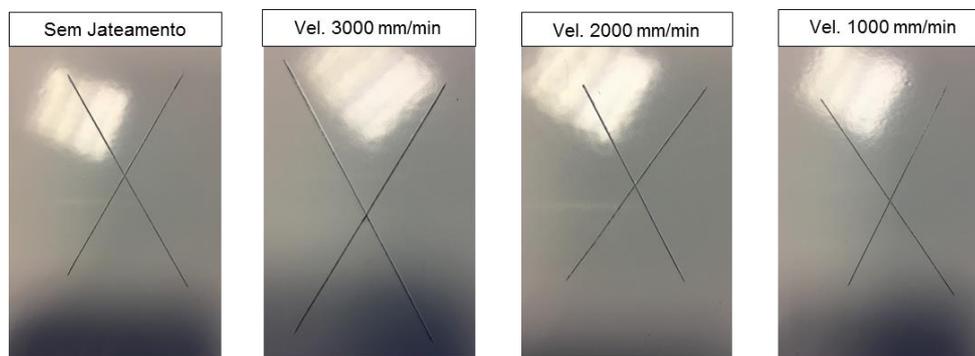
| | Sem jat. | 3000 mm/min | 2000 mm/min | 1000 mm/min |
|-----------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| CP | Rug. (Rz) | Rug. (Rz) | Rug. (Rz) | Rug. (Rz) |
| 1 | 3,65 ± 0,93 | 22,56 ± 2,57 | 25,65 ± 4,06 | 29,68 ± 1,93 |
| 2 | 3,83 ± 0,13 | 22,36 ± 0,84 | 26,75 ± 2,88 | 31,99 ± 3,48 |
| 3 | 3,6 ± 0,35 | 22,26 ± 3,21 | 25,07 ± 3,44 | 29,13 ± 3,80 |
| Rz geral médio | 3,70 | 22,40 | 25,82 | 30,27 |

Fonte: A Autora (2020).

4.2 ADERÊNCIA

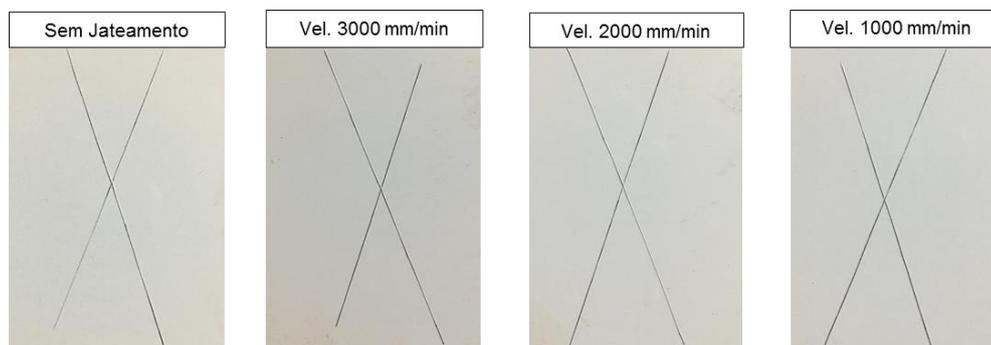
As Figuras 17, 18 e a Tabela 6 contemplam os resultados obtidos referentes ao ensaio de aderência, realizado antes e após o ensaio em névoa salina para os quatro sistemas estudados: sem jateamento, velocidades de 1000 mm/min, 2000 mm/min e 3000 mm/min.

Figura 17 - Resultados do teste de aderência para os sistemas antes do ensaio em névoa salina



Fonte: A Autora (2020).

Figura 18 - Resultados do teste de aderência para os sistemas após o ensaio em névoa salina



Fonte: A Autora (2020).

Tabela 6 - Resultados do teste de aderência para os sistemas

| Descrição | Aderência antes ensaio névoa salina | Aderência após ensaio névoa salina |
|-------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Sem jateamento | Y_0X_0 | Y_0X_0 |
| Vel. 3000 mm/min | Y_0X_0 | Y_0X_0 |
| Vel. 2000 mm/min | Y_0X_0 | Y_0X_0 |
| Vel. 1000 mm/min | Y_0X_0 | Y_0X_0 |

Fonte: A Autora (2020).

De acordo com a norma do ensaio de aderência pode ser observado que, todas as amostras não apresentaram nenhum destacamento na intersecção. Os quatro sistemas estudados proporcionaram uma limpeza adequada, promovendo uma excelente aderência do revestimento no substrato. Uma boa aderência significa

uma propriedade essencial à durabilidade dos revestimentos por pintura, especialmente aqueles utilizados na proteção anticorrosiva de substratos metálicos (FRAGATA, 2008).

4.3 BRILHO

Na Tabela 7 podemos ver a média dos resultados obtidos no ensaio de brilho realizado nos corpos de prova. Foram medidos em seis pontos aleatórios de cada corpo de prova. O brilho atendeu a especificação do fornecedor, de 70 – 80 UB, independente das condições do pré-tratamento realizado.

Observa-se que, quanto menor a velocidade de jateamento menor será o brilho da tinta, isso se deve ao fato que os picos e vales geram uma espécie de “sombra”, induzindo a afirmação da diferença de brilho. A dispersão da luz provocada pelos raios refletidos nos picos e vales faz com que diminua o brilho. Quanto menor o perfil de rugosidade ou sem preparação mecânica (sem jateamento e vel. 3000 mm/min), maior será o brilho da tinta e, quanto maior o perfil de rugosidade (vel. 2000 mm/min e 1000 mm/min) menor será o brilho da tinta, tendendo a um valor constante (XAVIER, 2016).

Tabela 7 - Valores obtidos no ensaio de brilho

| Descrição | Média (UB) | Desvio Padrão (UB) |
|-------------------------|-------------------|---------------------------|
| Sem jateamento | 79,63 | 0,22 |
| Vel. 3000 mm/min | 72,72 | 0,60 |
| Vel. 2000 mm/min | 70,35 | 0,12 |
| Vel. 1000 mm/min | 70,44 | 0,79 |

Fonte: A Autora (2020).

4.4 ESPESSURA DA CAMADA DE TINTA

A Tabela 2 apresenta a média relacionada aos resultados obtidos da espessura de camada de tinta (*e-coat* + *top coat* pó), para os sistemas sem jateamento e velocidades de 3000 mm/min, 2000 mm/min e 1000 mm/min.

De acordo com o boletim técnico do fornecedor, a especificação da camada seca da tinta *top coat* é de 50 a 70 μm , mas deve-se levar em consideração mais a camada de tinta *e-coat* que foi aplicada entre 20 a 30 μm , totalizando então uma camada seca final ideal de 100 μm . Os resultados encontrados ficaram próximos à especificação do fornecedor, mas foram obtidas variações de camadas entre os pré-tratamentos realizados nas amostras, que podem estar associadas à aplicação do revestimento realizado manualmente. Devido a estas diferenças de picos e vales, é necessária maior quantidade de tinta para que haja a cobertura completa, oferecendo a resistência esperada contra a corrosão (XAVIER, 2016).

A rugosidade muito elevada pode resultar na presença de picos com espessura de tinta muito baixa, ou até mesmo descobertos. Já uma rugosidade muito baixa pode prejudicar a aderência dos revestimentos aos substratos. O perfil de rugosidade ideal é aquele em que o Rz deverá ter o valor entre 1/4 e 1/3 da espessura total da camada de tinta seca, conforme valores obtidos neste trabalho no item 4.1 (GNECCO, 2014).

Tabela 8 - Espessura de camada da tinta seca *e-coat* + *top coat* pó

| Descrição | Média de camada de tinta seca (μm) | Desvio Padrão (μm) |
|-------------------------|---|---------------------------------|
| Sem jateamento | 110,13 | 3,26 |
| Vel. 3000 mm/min | 110,46 | 12,04 |
| Vel. 2000 mm/min | 117,87 | 2,44 |
| Vel. 1000 mm/min | 108,78 | 11,83 |

Fonte: A Autora (2020).

4.5 ENSAIO EM NÉVOA SALINA

Na Figura 19 é apresentado o resultado do ensaio em névoa salina (*salt spray*) após 576 horas de exposição, para as amostras dos quatro sistemas estudados: sem jateamento, velocidades de 3000 mm/min, 2000 mm/min e 1000 mm/min. As amostras não apresentaram grau de empolamento visíveis e isso repetiu-se nas amostras em triplicata, comprovando a preparação realizada satisfatória. Tal fato pode ser atribuído ao pré-tratamento realizado na superfície satisfatória,

promovendo uma boa adesão da tinta ao substrato, dificultando seu descolamento da superfície metálica pela formação da bolha. Essa formação inicia quando há uma espécie solúvel em água na interface metal/tinta, que é dissolvida pela água que permeia o revestimento (XAVIER, 2016).

As amostras dos quatro sistemas estudados apresentaram comportamentos semelhantes até o término do ensaio, sendo visível a corrosão vermelha abundante, com acúmulo e escorrimento apreciável de produto de corrosão vermelha das incisões das três peças. Após término da exposição à névoa salina, foi verificada a aderência da película da região próxima à incisão.

Figura 19 - Após 576 horas de ensaio em névoa salina dos sistemas estudados

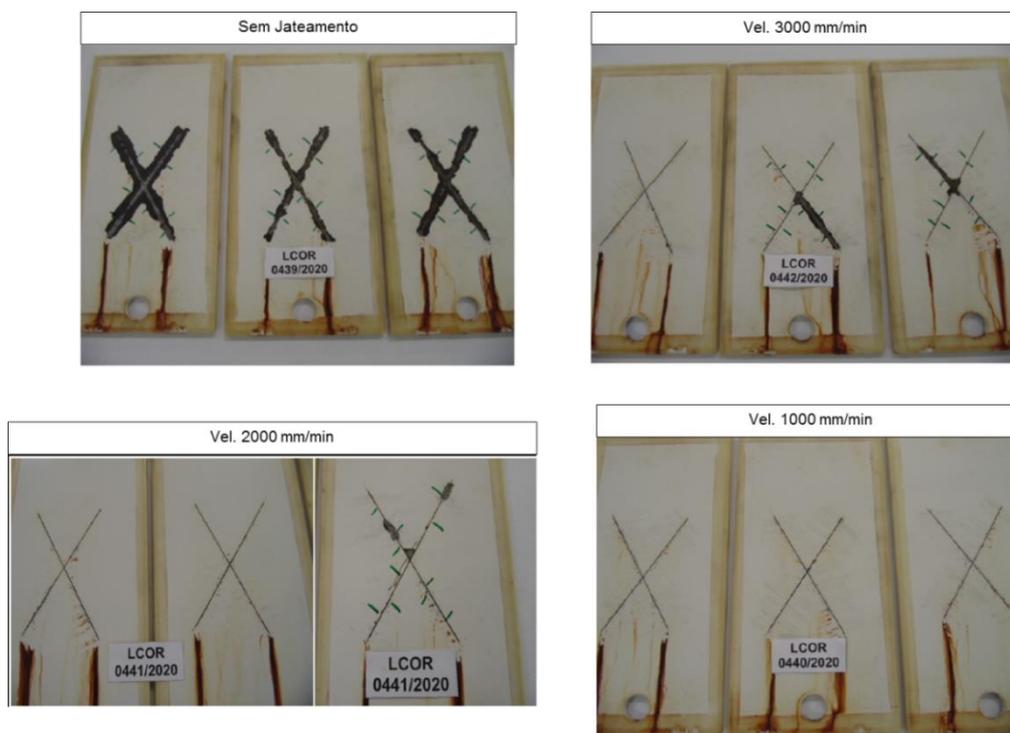


Fonte: A Autora (2020).

Na Figura 20 apresenta o aspecto da incisão das amostras depois da realização do deslocamento para verificação de migração subcutânea. Nos quatro sistemas estudados, foram consideradas dez medidas ao longo da incisão da

amostra, com um paquímetro digital (P 01). Estas medidas foram realizadas a partir da incisão, até a região onde o revestimento perdeu a aderência (um lado da raspagem) e perpendicularmente à incisão (Tabela 9). Para a amostra sem jateamento as três peças apresentaram deslocamento obtendo uma média de 3,73 mm. Para as amostras com velocidade de jateamento de 3000 mm/min, uma das peças da amostra não apresentou deslocamento do revestimento em torno das incisões, portanto obteve classificação 10. As outras duas peças da amostra apresentaram deslocamento do revestimento ao longo da incisão, encontrando-se a média do deslocamento de 0,65 mm. Para as amostras com velocidade de jateamento de 2000 mm/min, duas peças da amostra não apresentaram deslocamento do revestimento em torno das incisões, portanto obtiveram classificação 10. A outra peça da amostra apresentou deslocamento do revestimento em algumas regiões ao longo da incisão em torno de 0,31 mm. E, para as amostras com velocidade de jateamento de 1000 mm/min, obteve-se classificação 10, ou seja, 0 mm de deslocamento do revestimento em torno das incisões.

Figura 20 - Após a realização do deslocamento para verificação de migração subcutânea



Fonte: A Autora (2020).

Tabela 9 - Média do deslocamento dos sistemas estudados

| Item de Avaliação | Sem jateamento | Vel. 3000 (mm/min) | Vel. 2000 (mm/min) | Vel. 1000 (mm/min) |
|--------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Deslocamento (mm) | 3,73 | 0,65 | 0 | 0 |

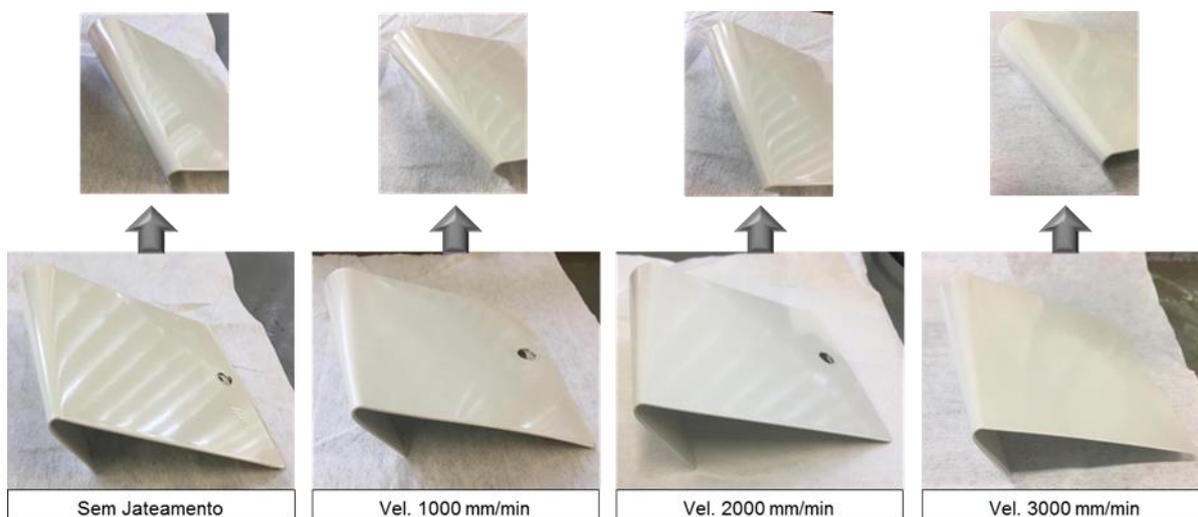
Fonte: A Autora (2020).

As amostras sem jateamento possuem menor perfil de rugosidade para ancoragem da tinta, quando comparada com os demais sistemas analisados. Portanto, esses sistemas de pré-tratamento (sem jateamento), possuem menor adesão ao substrato, permitindo a passagem de umidade ao substrato em relação às amostras que receberam o pré-tratamento mecânico por jateamento, que desenvolve com a aplicação do revestimento aplicado, uma espécie de barreira em seus picos e vales, diminuindo o impacto à passagem de umidade. Quando se tem a formação de um perfil de rugosidade, maior será a ancoragem da tinta na superfície metálica, sendo assim menos suscetível à corrosão. No ensaio de aderência após o ensaio em névoa salina, não foi evidenciado o destacamento de tinta, conforme descrito no item 4.2 (SANTOS, 2018).

4.6 ENSAIO DE FLEXIBILIDADE

A Figura 21 apresenta visualmente os corpos de provas dos quatro sistemas estudados (sem jateamento, velocidade de jateamento de 3000 mm/min, 2000 mm/in e 1000 mm/min) que foram submetidas ao ensaio de flexibilidade.

Figura 21 - Representação visual da flexibilidade das amostras submetidas ao teste com mandril cônico



Fonte: A Autora (2020).

Não foram observadas trincas, fissuras e/ou deslocamento de tinta, comprovando os resultados obtidos dos testes de aderência. Desta forma, os quatro sistemas estudados apresentaram boa resistência à flexibilidade em relação aos aspectos visuais. Os resultados apresentados se mostraram satisfatórios, uma vez que não comprometeu o revestimento (ZÜNDLER, 2016).

Os resultados da tinta *e-coat + top coat* pó foram aprovados neste ensaio, não apresentando alterações, devido às características das tintas em proporcionar uma boa flexibilidade, caracterizada no processo de polimerização na cura da tinta e compatibilidade dos sistemas de pintura aplicados (SCARABOTTO, 2014).

4.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA POR EMISSÃO DE CAMPO (MEV-FEG)

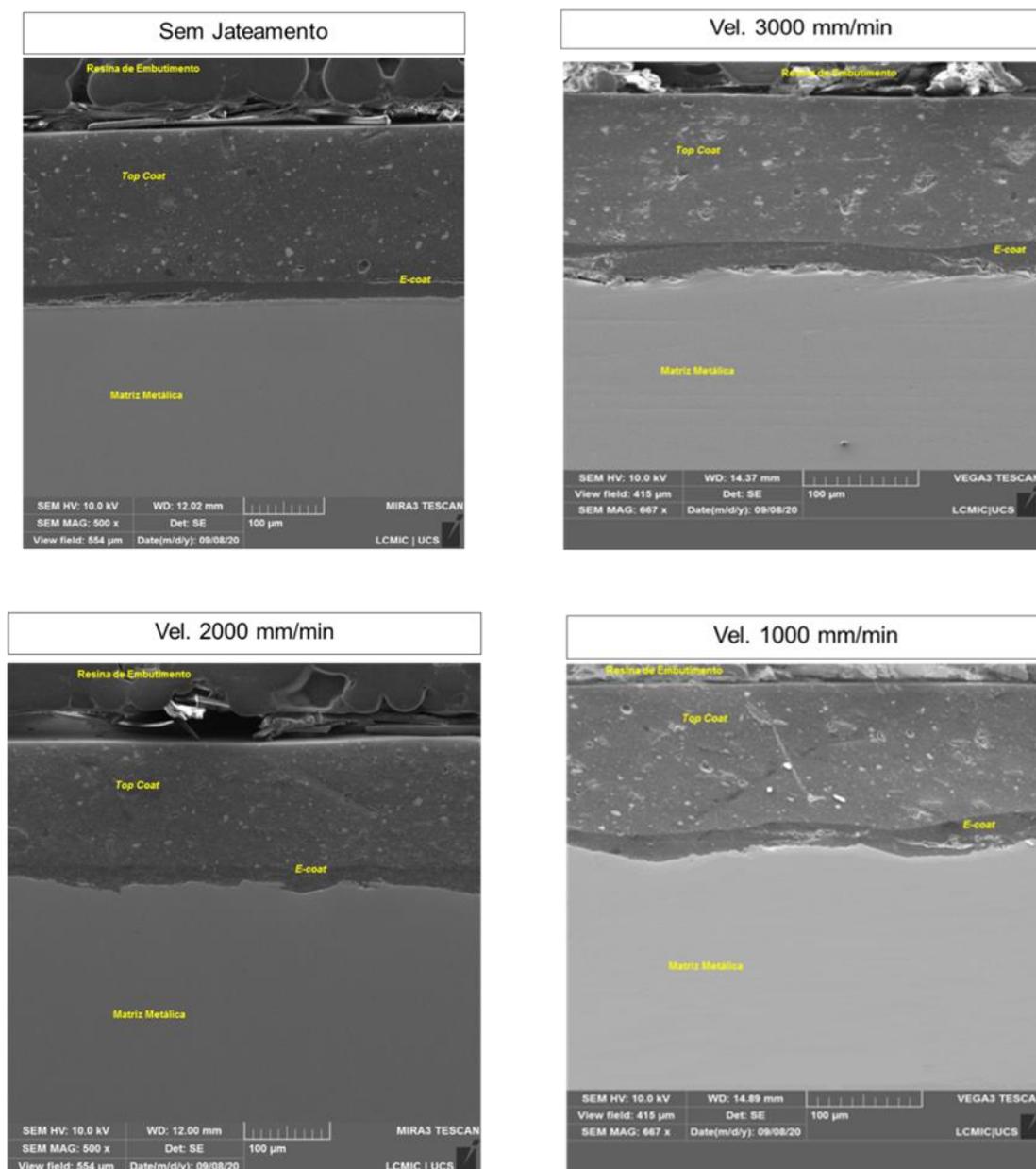
As imagens de MEV-FEG dos quatro sistemas estudados: sem jateamento, velocidades de 1000 mm/min, 2000 mm/min e 3000 mm/min encontram-se na Figura 22. As amostras realizadas tiveram um aumento de 500x e 667x.

Analisando as imagens pode ser percebida a formação do perfil de rugosidade nas amostras que receberam o pré-tratamento mecânico de jateamento. Percebe-se também, que dependendo a velocidade utilizada para realizar o jateamento, o perfil

de rugosidade é mais alto, ou seja, velocidades mais demoradas gera um perfil de rugosidade maior comparado com as velocidades mais rápidas. Essa análise comprova os resultados obtidos na análise de rugosidade. Pode-se perceber também que ocorre um nivelamento da tinta *e-coat* nas amostras sem jateamento, velocidades de 3000 mm/min e 2000 mm/min, e isso se deve ao fato de possuir vales menos profundos em comparação com a velocidade de 1000 mm/min.

As imagens obtidas também corroboram com os testes de aderência e flexibilidade realizados, comprovando que houve aderência da tinta na matriz metálica, principalmente nas amostras que receberam o pré-tratamento mecânico de jateamento, o que contribui para uma melhor ancoragem da tinta, devido ao componente mecânico na aderência e à criação de mais sítios ativos, em decorrência do processo que cria rugosidade. Em termos de preparação da superfície do substrato, percebe-se que não é possível identificar a presença de contaminantes/sujidades ou camadas de óxidos sob o metal e tinta *e-coat + top coat* pó; isso se deve ao fato dos sistemas apresentarem uma limpeza eficiente para o recebimento dos revestimentos (SANTOS, 2018).

Figura 22 - Representação da análise de microscopia eletrônica de varredura com emissão de campo (MEV-FEG)



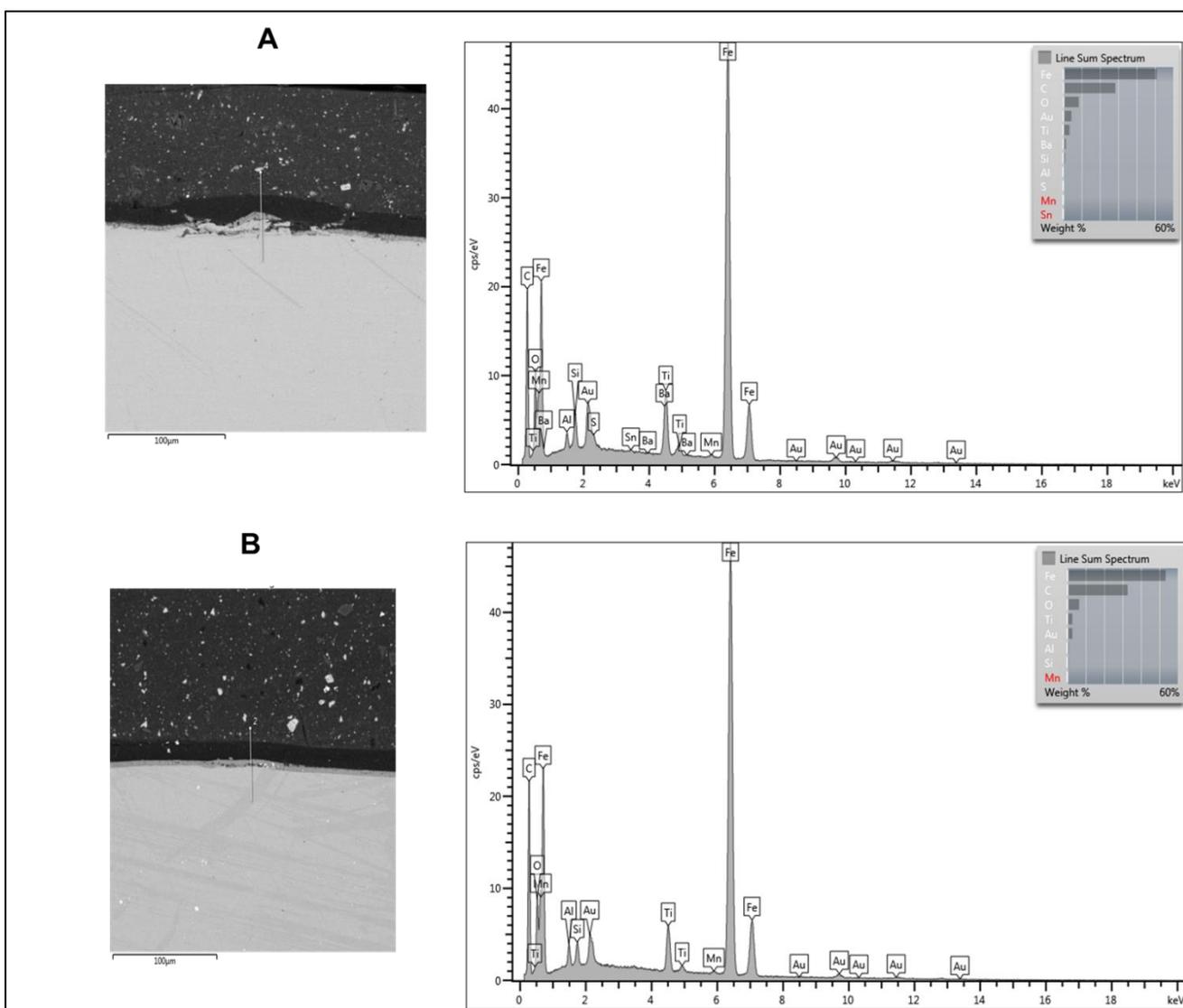
Fonte: A Autora (2020).

4.8 ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO EM ENERGIA (EDS)

Nas Figuras 23 e 24 pode-se observar imagens obtidas por MEV de cada local analisado juntamente com a composição dada pelo espectro de EDS. A Figura 23 apresenta a imagem e o espectro de EDS relacionado às amostras sem jateamento, lado A, e velocidade de jateamento de 3000 mm/min no lado B. Já na Figura 24 são

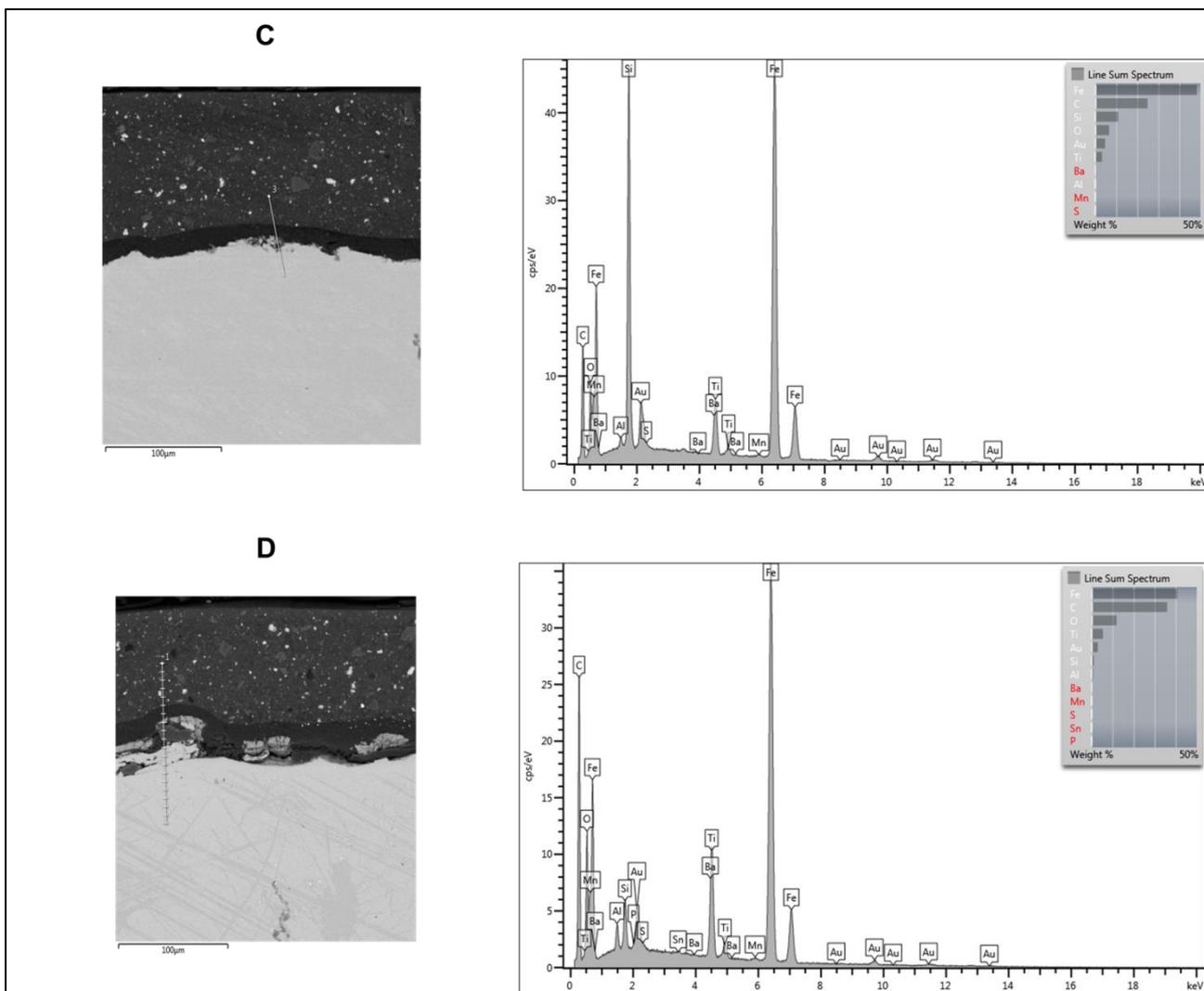
apresentadas as imagens e espectros de EDS correspondentes às amostras de velocidade de jateamento de 2000 mm/min e 1000 mm/min, lado A e lado B respectivamente.

Figura 23 - Imagem de MEV do local analisado por EDS com os espectros gerados de cada imagem: (A): Sem jateamento, (B): Velocidade de 3000 mm/min



Fonte: A Autora (2020).

Figura 24 - Imagem de MEV do local analisado por EDS com os espectros gerados de cada imagem: (C): Velocidade de 2000 mm/min, (D): Velocidade de 1000 mm/min



Fonte: A Autora (2020).

Os elementos contidos na matriz metálica, tinta *e-coat* e *top-coat*, analisados por EDS estão descritos na Tabela 10. Avaliando os elementos químicos detectados pela análise, observa-se que estão relacionados com os componentes das suas formulações, como por exemplo, Fe e C presentes na matriz metálica, corroborando com o material usado, que é o aço carbono, e também componentes existentes nas tintas *e-coat* e *top-coat*, como o estanho e titânio, entre outros, conforme descritas também nos itens 3.1.9 e 3.1.12 (SANTOS, 2018).

Tabela 10 - Elementos químicos obtidos através da análise de EDS

| Descrição | Elemento Químico | | |
|------------------|------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| | Matriz metálica | Tinta <i>E-coat</i> | Tinta <i>Top-coat</i> |
| Sem jateamento | Fe, C, Au | C, O, Al, Si, Au, Sn | C, O, Ti, Ba, Al, Si, Au, S |
| Vel. 3000 mm/min | Fe, C, Au | C, O, Au, Si, Al, Sn | C, Ti, O, Si, Au, Al |
| Vel. 2000 mm/min | Fe | C, O, Au, Al, Si | C, Ti, O, Ba, Au, Si, Al |
| Vel. 1000 mm/min | Fe, C, Au | C, O, Au, Si, Al, Sn, Fe | C, O, Ti, Ba, Au, S, Al, Si |

Fonte: A Autora (2020).

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, é possível concluir que o pré-tratamento mecânico de jateamento tem influência na resistência anticorrosiva de um processo de pintura *e-coat* e *top-coat*. Dentre as velocidades do transportador processadas pelo pré-tratamento mecânico de jateamento, as velocidades de 2000 mm/min e 1000 mm/min apresentaram o melhor desempenho quanto à resistência à corrosão, pois o perfil de rugosidade gerado promoveu a ancoragem ideal para uma boa proteção contra a corrosão. A cada 1000 mm/min de mudança de velocidade o perfil de rugosidade muda em média 16,25 %, comprovando os resultados obtidos no ensaio de microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (MEV-FEG), demonstrando a diferença dos perfis de rugosidade gerados para as velocidades de 3000 mm/min, 2000 mm/min e 1000 mm/min comparando com as amostras sem a influência do pré-tratamento mecânico de jateamento. O brilho da tinta tem influência direta no perfil de rugosidade gerado no substrato, ou seja, quanto maior o perfil de rugosidade, menor será o brilho.

Em relação ao ensaio em névoa salina, todas as amostras não apresentaram grau de empolamento visíveis, comprovando as preparações realizadas satisfatórias, promovendo uma boa adesão da tinta ao substrato, dificultando seu descolamento da superfície metálica pela formação da bolha. Já em relação ao deslocamento realizado para verificação de migração subcutânea, todas as amostras com velocidades de 2000 mm/min e 1000 mm/min, obtiveram classificação 10, ou seja, 0 mm de deslocamento do revestimento em torno das incisões. Os sistemas estudados sem jateamento e velocidade de 3000 mm/min não obtiveram um bom desempenho no ensaio em névoa salina, após a realização do deslocamento para verificação de migração subcutânea, gerando deslocamento do revestimento em torno das incisões. Considerando então, maior o perfil de rugosidade gerado, maior será a ancoragem da tinta na superfície metálica, sendo assim menos suscetível à corrosão.

Os componentes estudados (matriz metálica, tinta *e-coat* e *top-coat* pó) foi comprovado suas formulações químicas de acordo com a análise de espectroscopia por dispersão em energia (EDS), sem identificação da presença de elementos desconhecidos no meio. Todos os sistemas estudados neste trabalho (com e sem

preparação mecânica) não apresentaram trincas, fissuras e/ou deslocamento de tinta antes e após o ensaio em névoa salina de acordo com os ensaios realizados de aderência e flexibilidade comprovando a eficácia na preparação de todos os sistemas utilizados.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D523-08**: Standard Test Method for Specular Gloss. West Conshohocken, PA, 2008.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM B 117**: Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. West Conshohocken, PA, 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D522-1**: Standard Test Methods for Mandrel Bend Test of Attached Organic Coatings. West Conshohocken, PA, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D714-02**: Standard Test Method for evaluating degree of blistering of paints. West Conshohocken, PA, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D1654-08**: Standard Test Method for evaluation of painted or coated specimens subjected to corrosive environments. West Conshohocken, PA, 2008.
- AMORIM, C. Corrosão e proteção anticorrosiva. 2018. 24 slides. Disponível em: <http://semanadaquimica.org/wp-content/uploads/2018/04/Cepel2.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-15488**: Pintura industrial – Superfície metálica para aplicação de tinta – Determinação do perfil de rugosidade. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-11003**: Tintas – Determinação da aderência. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-8754**: Corpos de prova revestidos e expostos a ambientes corrosivos – Método de avaliação – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1985.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5841**: Determinação do grau de empolamento de superfícies pintadas. Rio de Janeiro, 2015.
- CAMILO, D. M. **Avaliação dos parâmetros do processo de fosfatização tricatiônica**. 2011. 71 f. TCC (Graduação em Engenharia Química) - Universidade de São Paulo. Lorena, 2011.
- CARDOSO, R. **Pintura para metais como proteção anticorrosiva**. Rede de Tecnologia e Inovação do Rio de Janeiro – REDETEC 11/6/2013. 32p.
- CASER, G. D. C. **Influência do tipo de abrasivo de jateamento no desempenho de esquemas de pintura sobre aço carbono**. 2008. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2008.

CAVALCANTE, T. S. L. **Avaliação da resistência à corrosão de aços revestidos ou não com zinco fosfatizados e pintados**. 2010. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

FAZENDA, J. M. R. **Tintas & vernizes – ciência e tecnologia**, Associação Brasileira dos Fabricantes de Tintas. 3 ed. São Paulo, 2006.

FRAGATA, F.; ORDINE, P. A.; AMORIM, C. C.; FERRAZ, O. Ensaio de aderência de esquemas de pintura pelo método de tração (*pull – off*) – Avaliação de fatores que influenciam os resultados. **Corrosão Proteção de Materiais**, Lisboa, v. 27, n. 4, p. 1-8, jul. 2008.

FERRO, W. A.; LIMA, J. D. Viabilidade econômica da aquisição de uma linha de pintura associada ao tratamento de superfície de metais nanocerâmico. **Revista Espacios**, Pato Branco, v. 37, n. 26, p. 1-20, jul. 2016.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2011.

GNECCO, C.; MARIANO, R.; FERNANDES, F. **Tratamento de superfície e pintura**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2006. (Série Manual de Construção em Aço).

GNECCO, C.; FRAGATA, F. Perfil de rugosidade de superfícies de aço-carbono x espessura de tintas e de esquemas de pintura - Um tema importante para ser debatido. *In*: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PINTURA ANTICORROSIVA - SPBA, 2., 2014, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABRACO, 2014. p 1-12.

GOMES, E. A. **Análise comparativa da resistência à corrosão de aços carbono em ensaios de campo e testes eletroquímicos**. 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2013.

ICZ. Instituto de Metais Não Ferrosos. Disponível em: <http://www.icz.org.br/corrosao.php>. Acesso em: 27 abr. 2020.

IKK DO BRASIL LTDA. **Technical data sheet**. Jacareí: W Abrasives, 2015. 1 p. Documento produzido no laboratório da IKK do Brasil Ltda.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6270-2**: Paints and varnishes – Determination of resistance to humidity – Part 2: Condensation (in-cabinet exposure with heated water reservoir). Estados Unidos, 2017.

KOCH, G. Cost of corrosion. **Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies**, [S.l.], p. 3-30, June 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-101105-8.00001-2>.

MENEGHEL, L. **Aproveitamento de resíduos de granalha de aço-carbono por metalurgia do pó.** 2017. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2017.

MIERZWA, J. C. **O uso racional e o reuso como ferramentas para o gerenciamento de águas e efluentes na indústria:** estudo de caso da Kodak Brasileira. 2002. 399 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

NIOSH. **Abrasive blasting operations** - engineering control and work practices manual. Public Health Service. Washington, p. 154. 1976.

NUNES, L. D. P.; LOBO, A. C. O. **Pintura industrial na proteção anticorrosiva.** 5ª ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2014.

RIBEIRO F. G. L. **Estudo de patologias de pintura e ocorrência de corrosão atmosférica em plataforma de petróleo.** 2018. 214 f. Dissertação (Mestrado em Construção Metálica) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2018.

SANTÁGATA, D.M; SERÉ, P.R; ELSNER, C.I; SARLI, A.R di. Evaluation of the surface treatment effect on the corrosion performance of paint coated carbon steel. **Progress in Organic Coatings**, [S.l.], v. 33, n. 1, p.44-54, Jan. 1998. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/s0300-9440\(98\)00006-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0300-9440(98)00006-x). Acesso em: 30 mar. 2020.

SANTOS, F. S. D. **Comparação do pré-tratamento de fosfatização via industrial com o processo de revestimento nanocerâmico.** 2013. 48 f. TCC (Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

SANTOS, D. M. R. P. **Estudo da estampagem rasa de calota com chapa espessa.** 2015. 53 f. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2015.

SANTOS, S. A. R. D. **Proposta de reuso não potável de efluente industrial na indústria automobilística:** estudo de caso para fábrica de cabines de caminhões. 2016. 92 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

SANTOS, S. I. **Influência da preparação de superfície no desempenho de tintas de fundo aplicadas a estruturas marítimas sob proteção catódica.** 2018. 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.

SCARABOTTO, M.; SCIENZA, L. C. Efeito da variação das condições de cura e um sistema de pintura e-coat (epóxi) e pintura a pó (poliéster) aplicado em aço carbono. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS – CBECIMAT, 21., 2014, Cuiabá. Anais [...].* Cuiabá: CBECIMAT, 2014. p 1-8.

SERENÁRIO, M. E. D. **Avaliação da resistência à corrosão em temperaturas elevadas da tinta epóxi Nb₂O₅ aplicada na indústria química**. 2018. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de São João del-Rei. São João del-Rei, 2018.

SERIZAWA, G. H. R.; GALLEGOS, J. Análise estrutural da aplicação do processo de jateamento com granalhas de aço (*shoot peening*) em rotores hidroelétricos. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA. 12., 2005, Ilha Solteira. **Anais** [...]. Ilha Solteira: Unesp e ABCM, 2005. Disponível em: <http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/creem/2005/pdf/pf10.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2020.

SILVA, R. S.; FERREIRA, J. Z.; MENEGUZZI, A. Anticorrosive acrylic intelligent paint. **Chemical Papers**, [S.l.], v. 74, n. 2, p. 631-639, Aug. 2019.

SILVA, L. F. J. **Utilização do método KTL em pinturas industriais**. 2012. 63 f. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SINTO. Jateamento – Introdução. Disponível em: <http://www.sinto.com.br/pdf-produtos/pro-jateamento.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2020.

SOARES, B. B. **A utilização do modelo de simulação computacional para análise e modificação de um sistema de produção de pinturas automotivas Caxias do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2013.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **SAE J-444**: Cast shot and grit size specifications for peening and cleaning. Warrendale, 1993.

VAZ, E. L. S.; ACCIARI, H. A.; CODARO, E. N. Um método para avaliar a taxa de corrosão. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, n. 7, p.1288-1290, abr. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422011000700031>. Acesso em: 30 mar. 2020.

VILLAS, M. R. A.; MAINIER, F. B. Processo de deposição de tintas catódicas por eletroforese e suas correlações com a qualidade e o meio ambiente. *In*: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA – SEGET, 2., 2005, Resende. **Anais** [...]. Resende: AEDB. 2005. p 646-655.

VITOR, A. S. *et al.* Processo de pintura e revestimento superficial e-coat. **Pesquisa e Ação**, Mogi das Cruzes, v. 4, n. 1, p. 101-105, maio 2018.

XAVIER, C.; A. *et al.* Influência da preparação da superfície química e mecânica em aço carbono para aplicação do revestimento poliuretano de alta resistência. *In*: INTERCORR. 2016, Búzios. **Anais** [...]. Búzios:Abraco, p. 1-14, maio 2016. Disponível em: https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2016/INTERCORR2016_176.pdf. Acesso em: 02 nov. 2020.

ZÜNDLER, L. **Influência da resistência à corrosão de pré-tratamento a base de fosfato de ferro e silano aplicados sobre o aço carbono 1008 utilizando desengraxantes alcalinos para posterior aplicação da tinta epoxídica.** 2016. 84 f. TCC (Graduação em Engenharia Química) - Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2016.

WEG TINTAS. Pintura industrial com tintas em pó. Disponível em: https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h6e/h8b/Apostila-DT-13-Tinta-p-_2018.pdf. Acesso em: 07 mar. 2020.