

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DE UM REVESTIMENTO  
NANOCERÂMICO À BASE DE ÁCIDO HEXAFLUORZIRCÔNIO JUNTAMENTE COM  
O PROCESSO DE POLIMERIZAÇÃO VISANDO A SUBSTITUIÇÃO DO PROCESSO  
DE FOSFATIZAÇÃO EM UMA EMPRESA DO SETOR AUTOMOBILÍSTICO

**Brigite Blank**

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professora Dra. Jane Zoppas Ferreira

Porto Alegre

2018

**BRIGITE BLANK**

**ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DE UM REVESTIMENTO  
NANOCERÂMICO À BASE DE ÁCIDO HEXAFLUORZIRCÔNIO JUNTAMENTE  
COM O PROCESSO DE POLIMERIZAÇÃO VISANDO A SUBSTITUIÇÃO DO  
PROCESSO DE FOSFATIZAÇÃO EM UMA EMPRESA DO SETOR  
AUTOMOBILÍSTICO**

Trabalho de Diplomação em Engenharia apresentado ao  
Departamento de Metalurgia da Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Engenheira Metalurgista.

**Orientador: Professora Dra. Jane Zoppas Ferreira**

Porto Alegre

2018

### CIP - Catalogação na Publicação

Blank, Brigitte

ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DE UM REVESTIMENTO NANOCERÂMICO À BASE DE ÁCIDO HEXAFLUORZIRCÔNIO JUNTAMENTE COM O PROCESSO DE POLIMERIZAÇÃO VISANDO A SUBSTITUIÇÃO DO PROCESSO DE FOSFATIZAÇÃO EM UMA EMPRESA DO SETOR AUTOMOBILÍSTICO / Brigitte Blank. -- 2018.

43 f.

Orientadora: Jane Zoppas Ferreira.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Revestimentos de proteção. 2. Revestimento nanocerâmico hexafluorzircônio. 3. polimerização. I. Zoppas Ferreira, Jane, orient. II. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

A todos aqueles que um dia acreditaram em mim, que me deram a mão e até mesmo me carregaram no colo quando eu não aguentava mais, que me fizeram rir quando o que eu mais sentia era vontade de chorar, que me deram conselhos essenciais quando eu queria e quando eu não queria também, minha eterna gratidão, vocês fizeram esta minha conquista possível e com certeza são parte desta vitória.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	3
2.1 CONCEITOS E FORMAS DE CORROSÃO .....	3
2.2 PREVENÇÃO E PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO .....	4
2.3 FOSFATIZAÇÃO .....	6
2.4 POLIMERIZAÇÃO .....	8
2.5 NANOTECNOLOGIA E REVESTIMENTOS NANOCERÂMICOS .....	10
<b>3 ESTUDO DE CASO</b> .....	12
3.1 CENÁRIO ATUAL .....	12
3.2 CENÁRIO SUGERIDO .....	17
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	19
4.1 CORPOS DE PROVA .....	19
4.2 CARACTERIZAÇÃO METALÚRGICA E MECÂNICA .....	22
4.3 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO .....	24
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	25
5.1 CARACTERIZAÇÃO METALÚRGICA E MECÂNICA .....	25
5.2 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO .....	28
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	31
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	32
<b>8 REFERÊNCIAS</b> .....	33

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Linha de deposição da camada de fosfato. ....	7
Figura 2: Composição química do BONTERITE L-FM 743.....	8
Figura 3: Mecanismo de deposição da camada de polímero.....	9
Figura 4: Etapas processo de polimerização para conformação à frio.....	9
Figura 5: Mecanismo de formação da camada de nanocerâmico.....	11
Figura 6: Desenho 3D ilustrando Tulipas e Pontas de Eixo.....	12
Figura 7: Semi – eixo e seus componentes. ....	13
Figura 8: Comparativo de processos da empresa. ....	13
Figura 9 : Fluxograma de produção de dois tratamentos de superfícies distintos.....	14
Figura 10: Fluxograma do processo com a adição da etapa de conversão da camada nanocerâmica.....	18
Figura 11: Peça antes, à esquerda, e depois da imersão no banho de nanocerâmico. ....	20
Figura 12: CP3 preparado. ....	22
Figura 13: Microscópio ótico Olympus SZ61. ....	22
Figura 14: Microscópio ótico Zeiss Observer.A1m.....	23
Figura 15: Microdurômetro utilizado.....	24
Figura 16: Camada temperada do CP3 (a) e CP5 (b) utilizando o microscópio ótico Olympus SZ61.....	25
Figura 17:Microestrutura nuclear do CP3 (a) e CP5 (b) em aumento de 100x. Grãos escuros Perlita e claros Ferrita. ....	26
Figura 18:Microestrutura martensítica da camada temperada do CP3 (a) e CP5 (b) em aumento de 50x. ....	26
Figura 19: Microestrutura martensítica da camada temperada do CP3 (a) e CP5 (b) em aumento de 100x. ....	26
Figura 20: Microestrutura martensítica da camada temperada do CP3 (a) e CP5 (b) em aumento de 200x. ....	27
Figura 21: Perfil de microdureza do CP3 e CP5. ....	27
Figura 22: Acompanhamento Névoa Salina.....	28

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química do aço utilizado.....	19
Tabela 2: Relação dos corpos de provas utilizados. ....	21
Tabela 3: Dureza superficial e profundidade da camada temperada do CP3 e CP5.....	28
Tabela 4: Resultado Névoa Salina. ....	29

## RESUMO

O processo de fosfatização é um tratamento superficial de metais que visa promover a lubrificação de peças para a posterior conformação mecânica, assim como também proteger contra a corrosão e melhorar a aderência entre o substrato e as camadas de tinta. Porém, juntamente com as suas vantagens, nascem as preocupações ambientais provenientes deste processo. Sendo assim, novas alternativas vêm sendo estudadas, aprimoradas e aplicadas para o tratamento de superfícies. Visando não somente o sucesso econômico, mas também a proteção ambiental, uma determinada empresa do setor automobilístico visa eliminar sua linha de fosfatização até 2020. Em 2015 a empresa substituiu parte de sua linha por um processo de revestimento à base de polímero, todavia este método não tem apresentado resultado satisfatório, visto que muitas peças estão oxidando após sua implementação, o que não ocorre com o revestimento de fosfato. Com o intuito de encontrar uma alternativa para contornar este problema, o presente trabalho relata um estudo comparativo do desempenho de um revestimento nanocerâmico à base de ácido hexafluorzircônio juntamente com o processo de polimerização. Para a avaliação desta alternativa foram preparados corpos de prova com três tipos de revestimentos: fosfato, polímero e um terceiro com a camada de conversão nanocerâmica e posterior aplicação do polímero. Ensaios metalográficos e mecânicos foram realizados para avaliar o comportamento dos corpos de prova preparados com o revestimento nanocerâmico. A resistência à corrosão dos três revestimentos distintos foi analisada a partir do ensaio de névoa salina. Os resultados comprovaram que a camada de conversão nanocerâmica pode trazer benefícios às peças estudadas e ao mesmo tempo manter o padrão de qualidade requerido pela empresa.



## ABSTRACT

The phosphating process is a surface treatment: a phosphate-based coating, used for metals for promoting the lubrication of parts for further mechanical conformation. In addition this process protects against corrosion and improves the adherence between the substrate and subsequent coats of paint. In spite of its advantages, this process has a negative environmental impact. Therefore, new alternatives for the treatment of metallic surfaces are being investigated, developed, and improved. With the goal of not only economic gain but also environmental protection, a company from the automobile industry plans to eliminate phosphating from its production line by 2020. In 2015, this company replaced its phosphating process with a polymer-based coating in part of its production line. However, this method had not yet provided a satisfactory result. Many pieces produced with this process exhibit unacceptable oxidation, which does not happen with the phosphating process. Herein, a case study, which primary goal was to evaluate an alternative to overcome the oxidation problem, is presented. The performance of a hexafluorozirconic acid based nanoceramic coating followed by a polymer-based coating is compared with the aforementioned processes. For evaluating this new process, specimens treated with three different coating were prepared: a phosphate-based coating, a polymer-based coating, and a nanoceramic conversion layer followed by a polymer-based coating. Metallographic and mechanical tests were performed for evaluating the behavior of the specimens prepared with these coatings. The resistance to corrosion of the three coatings was individually analyzed using the salt spray test. The results demonstrate that nanoceramic conversion layer brings the lower environmental impact of the polymer-based process without the undesired oxidation, thereby conforming to the quality standard required by the company.

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria automobilística é o segundo segmento que mais consome aço no Brasil, perdendo apenas para o setor de construção civil. Uma pesquisa realizada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) mostra que o aço corresponde a quase 56% do peso de um carro, sendo mais aproveitado na carroceria dos veículos e autopeças, tais como: eixos, rodas, parafusos, biela, cilindro, estrutura do banco, entre outras (AÇO BRASIL, 2015).

Por ser um dos maiores consumidores de aço, o setor automobilístico se destaca na pesquisa e consequente aplicação de novas técnicas que visam a melhoria tanto de processo quanto de produto, como os procedimentos que visam a proteção das peças contra a corrosão. Os objetivos corporativos de hoje incluem não apenas o sucesso econômico, mas também a proteção ambiental como parte integrante da estratégia de criação de valor a longo prazo da empresa. Um exemplo disso é a fosfatização, um dos processos de tratamentos de superfícies ainda mais utilizados, seja com a intenção de proteção temporária, revestimento de base para outros tipos de tratamento superficial, como até mesmo como condicionamento para outros processos de fabricação, em especial em produtos que requerem alta qualidade e resistência à corrosão. Sabendo que a fosfatização convencional apresenta sérios problemas ao meio ambiente, com o passar dos anos, diversos processos sustentáveis vêm sendo estudados e aprimorados a fim de reduzir os impactos ambientais, assim como os custos com esse tipo de processo.

Com o intuito de minimizar os resíduos industriais e também atingir o desenvolvimento sustentável, tendo em vista à geração de menores quantidades de resíduos e reduções significativas do uso de recursos naturais, a utilização da nanotecnologia como substituição do processo de fosfatização vem sendo cada vez mais utilizada pelas indústrias como uma alternativa para o tratamento de superfícies e proteção contra corrosão. Revestimentos nanocerâmicos podem ser aplicados em diversos tipos de metais, pois apresentam uma grande eficiência como protetivo contra corrosão, promovem uma excelente aderência entre a camada de tinta e o substrato metálico, além de demandarem um menor consumo de energia por trabalharem à temperatura ambiente e permitirem aplicação sem a necessidade de enxágue final. O tratamento dos efluentes gerados é mais simples e a geração de resíduos é em torno de quarenta vezes inferior ao processo de fosfatização.

Em função das melhorias que o revestimento nanocerâmico pode trazer aos processos industriais e visando a substituição total da linha de fosfatização de uma empresa do setor automotivo no sul do Brasil, sem aumentar os impactos ambientais produzidos, bem como preparar as peças para conformação a frio e protegê-las contra corrosão, mantendo o mesmo padrão de qualidade, o presente trabalho apresenta um estudo comparativo do desempenho do revestimento nanocerâmico juntamente com o processo de polimerização.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será apresentada uma breve revisão da literatura envolvendo os conceitos importantes que acercam o assunto retratado no presente trabalho, a fim de proporcionar a melhor compreensão do estudo de caso.

### 2.1 CONCEITOS E FORMAS DE CORROSÃO

Corrosão é definida como a deterioração de um material, geralmente metálico, resultante de uma reação com o meio em que se encontra. Ocorre de forma espontânea, ou seja, até mesmo o ar, carregado de umidade e oxigênio, pode desencadear esse processo que está presente em todos os metais e segmentos, desde o princípio da extração do mineral até o cotidiano. Por ser uma forma de degradação do metal, é um processo que, além de afetar visualmente os materiais, afeta sua microestrutura e, conseqüentemente, suas propriedades mecânicas. Isto reduz drasticamente o ciclo de vida do material, sendo extremamente nocivo. É um processo que progride através do material até sua destruição total (HOUSTON, 2000).

Os revestimentos anticorrosivos são usados para combater os danos causados pela corrosão a estruturas e equipamentos críticos. Existem diversos métodos que podem minimizar a corrosão, todavia esta não pode ser eliminada definitivamente.

A corrosão pode ocorrer de diversas formas e o seu conhecimento é imprescindível para encontrar as técnicas e mecanismos necessários para a proteção do metal, a fim de aplicar medidas preventivas capazes de reduzir a corrosão à fatores desprezíveis. O primeiro passo é descobrir e investigar os tipos e formas de corrosão. O tipo de corrosão é determinado de acordo com a redução na espessura do material, falha da estrutura, contaminação e valor reduzido de mercadoria, vazamentos, perda de resistência mecânica e a deterioração de outras propriedades essenciais para sustentar a estabilidade das estruturas materiais. (GENTIL, 2003; CALLISTER JR, 2006).

Os tipos de corrosão uniforme ou localizada causadas por reações químicas ou eletroquímicas são diversos e incluem:

- Uniforme ou generalizada – a perda da espessura é uniforme;
- Por placas – localizada em algumas parcelas da peça, apresenta uma espécie de escavação no material;

- Galvânica – resulta do contato elétrico, em presença de um eletrólito, de materiais diferentes;
- Filiforme – filamentos delgados e não profundos que se propagam em diferentes direções;
- Intergranular – corrosão entre grãos da rede cristalina;
- Intragranular – corrosão através dos grãos da rede cristalina;
- Corrosão sob tensão – ação combinada de uma tensão de tração e um ambiente corrosivo;
- Esfoliação – acontece paralelamente à superfície metálica de chapas que tiveram seus grãos achatados e ou alongados, devido à trabalho mecânico;
- Empolamento por H — H atômico penetra no metal e difunde-se rapidamente na rede cristalina;
- Pite – corrosão localizada formando profundos defeitos pontuais, podendo levar à perfuração

## 2.2 PREVENÇÃO E PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO

A corrosão do metal pode ser minimizada em quase todas as situações, gerenciada ou até mesmo interrompida, fazendo uso de técnicas adequadas. Tais métodos de prevenção e proteção estão disponíveis em diversos tipos e são implantados de acordo com as instâncias envolvidas em um metal corrosivo.

A prevenção e proteção contra corrosão tem como finalidade controlar a reação do metal com o meio, preservando características técnicas e tempo de vida útil. É possível evitar a corrosão a partir de uma boa compreensão das condições que contribuem para que ela ocorra, sendo assim, medidas são elaboradas para proteger materiais, substratos e estruturas metálicas da destruição ou deterioração resultante da interação química ou eletroquímica de uma substância com seus arredores. Podemos definir a prevenção da corrosão como: técnicas utilizadas para evitar o esgotamento das propriedades físicas, mecânicas e químicas de um determinado material, além de manter a segurança, confiabilidade e eficácia dos materiais.

Para que um determinado material sobreviva à corrosão, as seguintes medidas preventivas devem ser consideradas: determinar o efeito galvânico do material, estudando sua posição na

série galvânica e analisar e identificar as condições ambientais circundantes que aceleram a corrosão.

As técnicas para prevenção de corrosão podem ser categorizadas em seis grupos básicos: condições de superfície e seleção do metal, modificações ambientais, revestimento protetor, proteção catódica, e inibidores da corrosão (GENTIL, 2003).

Visto que a corrosão não pode ser eliminada em sua totalidade, por ser um processo espontâneo e estar presente em todos os metais, além dos métodos de prevenção existem métodos de proteção contra corrosão, tais como, aplicação de revestimento anti corrosão, proteção catódica ou outros métodos que tornam o metal resistente à corrosão, que são técnicas utilizadas para minimizar o seu efeito. Dentre os fatores a considerar para a seleção do método de proteção podemos citar: condições ambientais, custo, grau de proteção necessário e consequências de falha imprevista em serviço.

A proteção contra a corrosão pode ser feita das seguintes formas: criação de uma barreira entre o metal e o meio corrosivo, introdução de uma substância que inibe a ação química da corrosão e indução de uma atividade galvânica que atua contra a atividade galvânica da corrosão.

Entende-se por Revestimento Protetor o processo de cobrir uma superfície com outra substância a fim de protegê-la temporariamente ou permanentemente da deterioração ou degradação devido ao resultado da sua reação ao meio ambiente ou à agentes corrosivos. Alguns revestimentos não eliminam a corrosão, apenas a minimizam. Já outras variedades de revestimentos, assim como tintas, são utilizados não apenas como protetores, mas também como decorativos.

Existem diversos fatores a serem considerados ao escolher o revestimento mais adequado, tais como: combinações, condições e relações entre materiais, tipo de corrosão que a peça está mais propensa de desenvolver, aplicação da peça, condições ambientais a que a peça será exposta (temperatura, umidade, etc), tempo que peça será exposta ao ambiente corrosivo, e qualidade da superfície da peça.

Alguns revestimentos anticorrosivos apresentam ação protetora devido à formação de películas formadas por óxidos, hidróxidos e outros compostos que reagem com os oxidantes do

meio corrosivo, desde que ocorra a formação de óxidos aderentes. Os mais comuns são: alumínio, cromo, níquel, titânio e zinco.

Para revestimentos não metálicos inorgânicos, os compostos depositados diretamente sobre a superfície como óxidos, nitretos, boretos, carbetos, e silicetos são, de acordo com suas características particulares, processos de proteção onde cada caso e situações corrosivas devem ser analisados. Dentre os processos de proteção de revestimentos não metálicos inorgânicos, pode-se destacar os mais utilizados: anodização, cromatização e fosfatização (GENTIL, 2003; CALLISTER JR, 2006; OLIVEIRA, 2012).

### 2.3 FOSFATIZAÇÃO

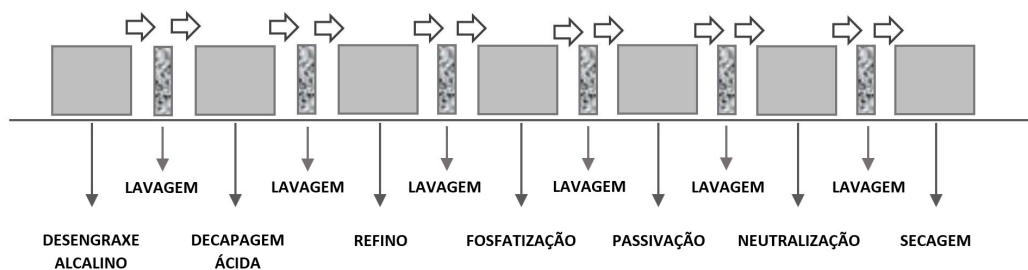
Fosfatização é um dos métodos mais utilizados e importantes do setor de tratamento de superfícies. Além de aumentar a resistência à corrosão, serve como base aderente para uma posterior pintura ou outro revestimento orgânico. Pode ser aplicada na conformação plástica, prevenindo o contato metal-metal devido à sua ação lubrificante, e a conseqüente redução do coeficiente de atrito. Sendo assim, é possível elevar a vida útil das matrizes ou ferramentas e, eventualmente, aumentar a velocidade das operações de conformação (WOLPERS, 2003).

A fosfatização consiste em recobrir peças metálicas através da deposição de uma camada de fosfato insolúvel, devido à conversão superficial do substrato. O revestimento é formado a partir de uma solução de fosfato de ferro, fosfato de zinco, fosfato de manganês ou fosfato tricatiônico (Zn, Mn, Ni), aceleradores ( $\text{ClO}_3^-$  e  $\text{NO}_3^-$ ), catalisadores (Ni ou Cu) e água. Em função da alteração do pH interfacial, depositam-se sobre a superfície metálica sob a forma de uma espessa camada de finos cristais. A superfície ativa do metal é, então, convertida em uma superfície não ativa. Pode ser aplicado por pulverização da solução no substrato ou por imersão do substrato na solução.

O processo industrial de fosfatização por imersão, exemplificado na Figura 1, é constituído de diversas etapas e entre cada uma delas há uma etapa de lavagem com o intuito de evitar possíveis contaminações dos banhos. A primeira etapa é o desengraxe alcalino e tem por objetivo remover óleos e sujidades orgânicas presentes. A segunda etapa é a decapagem ácida, que serve para remover óxidos e carepas. Em seqüência, a etapa de refino cria pontos de nucleação na superfície metálica que induzem à formação de pequenos cristais. Na etapa de fosfatização o objetivo é depositar uma camada de cristais insolúveis sobre a superfície. Os

cristais se formam por reação química, o que lhes confere ótima ligação com o metal e praticamente cobrem toda a superfície. A camada formada de fosfato apresenta alta porosidade, sendo assim, a etapa de passivação é um tratamento indispensável para se obter a aparência desejada e, dentre outras propriedades, resistência à corrosão, pois tem como finalidade a selagem da camada de fosfato. Nesta etapa as falhas na camada de fosfato são preenchidas, melhorando a proteção anticorrosiva. Segue a etapa de neutralização para a remoção de vestígios de produtos oriundos dos processos de passivação. Por fim a peça passa pela a etapa de secagem, que é de extrema importância, pois superfícies molhadas oxidam mais rapidamente e, no caso da pintura, impedem a ancoragem da tinta (GENTIL, 2003; DONOFRIO, 2004).

Figura 1: Linha de deposição da camada de fosfato.



FONTE: Adaptação de (GNECCO, 2003)

Por ser um processo que contém diversas etapas que consomem um elevado volume de água e por conter em sua composição fósforo, uma alta quantidade de produtos químicos perigosos e metais pesados, tais como ácido sulfúrico e níquel, o que, conseqüentemente, promove consideráveis quantidades de efluentes e resíduos, a fosfatização convencional apresenta sérios riscos e danos ao meio ambiente. Além disso, para a realização deste tratamento, é necessária uma alta quantidade de energia para o aquecimento dos tanques, alto custo para tratamento, confinamento e incineramento do lodo gerado no processo e altos custos de manutenção devido à corrosão química do equipamento, o que acaba impactando também na viabilidade econômica do processo (WENG, WANG e ZHANG, 1998).



## 2.4 POLIMERIZAÇÃO

A reação de polimerização é um dos tipos mais importantes de composição de macromoléculas e, em geral, ocorre entre compostos de dupla ligação que se combinam quimicamente. Esse tipo de reação pode ser dividido basicamente em dois grupos: polimerização por adição e a polimerização por condensação. A escolha de uma técnica específica depende dos fatores cinéticos relacionados ao comprimento e composição da cadeia, tecnológicos, tais como troca de calor, velocidade de reação, viscosidade da mistura reacional, morfologia do produto e econômicos, custos de produção, aspectos ambientais, etapas de purificação, dentre outros (FELTRE, 2002).

O processo a base de polimerização vem sendo recentemente estudado e utilizado como alternativa na substituição do processo de fosfatização, a Figura 2 apresenta a composição química de um exemplo de produto polimerizante que vem sendo utilizado para esses fins. Esse processo é chamado industrialmente de polímero, apesar de ser a base de compostos inorgânicos, de acordo com as informações do fabricante, ilustrada na Figura 2.

Figura 2: Composição química do BONTERITE L-FM 743.

**Produtos de base do preparado:**

Sais inorgânicos

**Declaração dos ingredientes de acordo com o Regulamento CLP (EC) N° 1272/2008:**

Componentes nocivos N.º CAS	Número CE Reg. REACH N°	Conteúdo	Classificação
tetraborato de dipotássio 1332-77-0	215-575-5	10- 20 %	Repr. 2 H361d
bis(ortofosfato) de trizinc 7779-90-0	231-944-3 01-2119485044-40	2,5- < 10 %	Aquatic Chronic 1 H410 Aquatic Acute 1 H400 Factor-M 10
piritiona zinco 13463-41-7	236-671-3 01-2119511196-46	< 0,25 %	Acute Tox. 3; Oral H301 Eye Dam. 1 H318 Acute Tox. 3; Inalação H331 Aquatic Acute 1 H400 Aquatic Chronic 1 H410 Factor-M 100

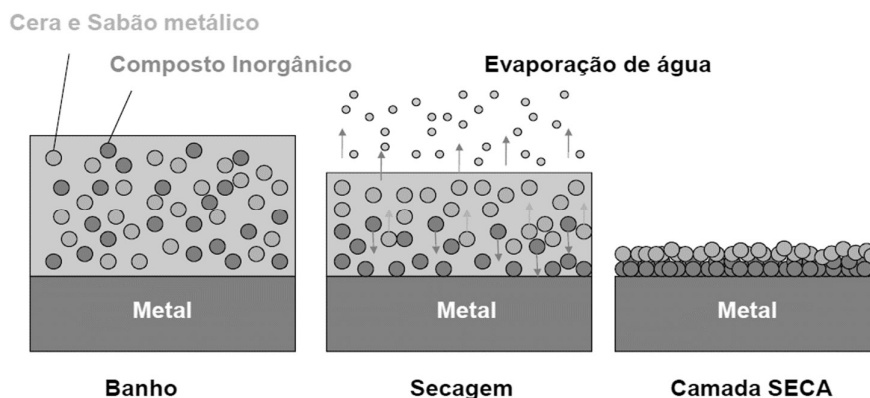
A etiquetagem do produto é indicada na secção 2. O texto completo de todas as abreviaturas indicadas por códigos nesta ficha de dados de segurança é o seguinte:

H301 Tóxico por ingestão.  
H318 Provoca lesões oculares graves.  
H331 Tóxico por inalação.  
H361d Suspeito de afectar o nascituro.  
H400 Muito tóxico para os organismos aquáticos.  
H410 Muito tóxico para os organismos aquáticos com efeitos duradouros.

FONTE: FISPQ (Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos) do BONTERITE L-FM 743.

O depósito de polímero sobre o substrato cria uma camada homogênea, conforme podemos ver na Figura 3. O filme polimérico apresenta resultados semelhantes em relação à sua ação lubrificante, ou até melhores, em comparação com a camada convertida de fosfato. É um processo mais simples que a fosfatização, pois apresenta menos etapas para a formação do filme protetor. A aplicação do polímero pode ser feita, dentre outras formas, por imersão. As etapas pertencentes a este processo estão exemplificadas na Figura 4 e são respectivamente as seguintes: limpeza mecânica por jateamento de granalha e banho com água deionizada, para lavagem e preparo da superfície da peça, imersão na solução contendo o polímero diluído, para que inicie a deposição do polímero sobre a peça e, por fim, secagem, etapa na qual toda a água da solução evapora e sobre a superfície só permanece a camada de polimérica (Boletim Técnico do produto BONTERITE L-FM 743).

Figura 3: Mecanismo de deposição da camada de polímero.



FONTE: FABRETE, 2017

Figura 4: Etapas processo de polimerização para conformação à frio.



FONTE: Adaptado de (FABRETE, 2017)

## 2.5 NANOTECNOLOGIA E REVESTIMENTOS NANOCERÂMICOS

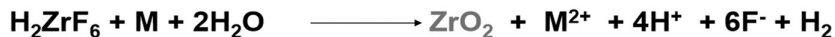
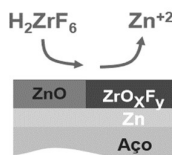
A nanotecnologia é o estudo de manipulação da matéria em escala atômica e molecular, inclui o desenvolvimento de materiais associados a diversas áreas como a medicina, eletrônica, ciência da computação, física, química, biologia, engenharia, entre outras. A atuação nessas áreas tem como princípio básico a elaboração de estruturas e novos materiais a partir do arranjo de átomos. Esse tipo de tecnologia trabalha dentro da escala nanométrica, geralmente entre 0,1 e 100 nanômetros. Propriedades térmicas, ópticas, magnéticas e elétricas podem ser atingidas quando certos materiais são submetidos à miniaturização em nanopartículas, mantendo-se a composição química. A possibilidade de manipular o átomo abre inúmeros panoramas e trabalhar a matéria em escala atômica permite expandir o horizonte de inovações.

Dentre os principais benefícios do avanço da nanotecnologia pode-se destacar: controle das características desejáveis, otimização do uso de recursos, menor impacto ambiental, desenvolvimento de fármacos com menores efeitos colaterais e aumento da capacidade de processamento de sistemas computacionais. (BUSHAN, 2004)

Com o decorrer dos anos a nanotecnologia, tem sido cada vez mais incorporada em tratamentos de superfícies. Os revestimentos nanocerâmicos, por exemplo, apresentam uma delgada camada em escala nanométrica que se deposita sobre o substrato. Essa camada inorgânica de alta densidade resulta em uma elevada resistência à oxidação, corrosão, erosão e desgaste em altas temperatura, além de serem compatíveis com revestimentos poliméricos, garantindo uma boa adesão entre o substrato e a tinta.

O revestimento nanocerâmico é produzido em um curto espaço de tempo e o seu depósito de óxidos metálicos atinge um pico nos primeiros trinta segundos, após isso, segue um comportamento aproximadamente constante. A Figura 5 exemplifica a formação da camada nanocerâmica a base de hexafluorzircônio em um substrato de aço.

Figura 5: Mecanismo de formação da camada de nanocerâmico.



**M = Substrato Tratado Fe, Zn, Al, Mg**

FONTE: Adaptado de (FABRETE, 2018)

O processo de revestimento nanocerâmico, ao ser comparado com o processo de fosfatização, pode ser considerado ambientalmente favorável, uma vez que não apresenta metais pesados e íons de fosfatos. Além disso, reduz o volume de efluente a ser tratado devido ao baixo número de produtos químicos utilizados e por consumir menos água. É economicamente vantajoso por apresentar um menor tempo de tratamento, resultando em ganho de produção, necessitar menos estágios no decorrer do processo e de poder ser realizado à temperatura ambiente, o que resulta na redução do consumo de energia (DRONIOU, 2005).

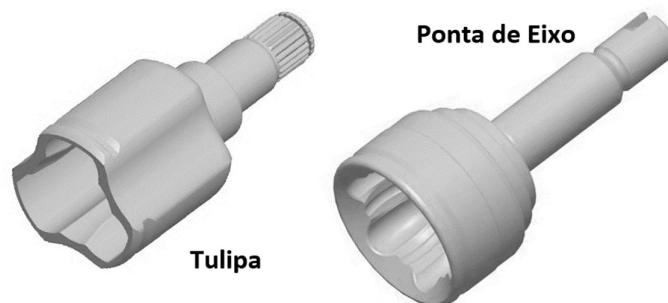
### 3 ESTUDO DE CASO

No presente capítulo será retratada a posição do problema que deu origem e impulsionou a realização deste trabalho, juntamente com a alternativa sugerida para sua eliminação.

#### 3.1 CENÁRIO ATUAL

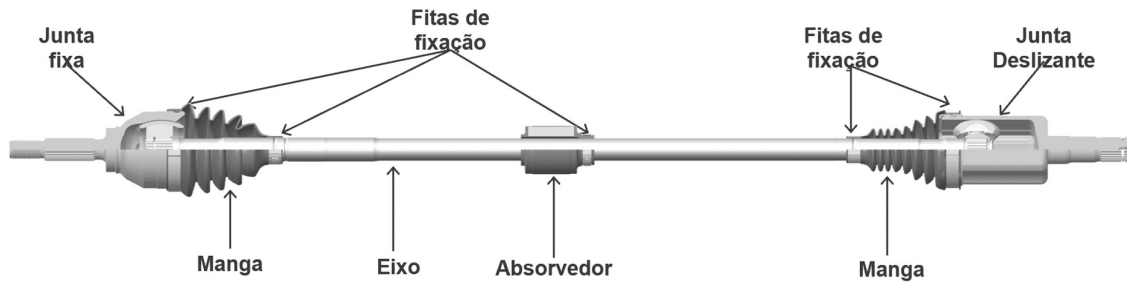
O processo de fosfatização é utilizado na forjaria de uma determinada empresa do setor automobilístico como tratamento superficial de certas peças e tem como objetivo promover a lubrificação para a posterior conformação mecânica, que é realizada à frio, assim como também proteger as peças contra a corrosão. Nas duas unidades da empresa no Rio Grande do Sul, que trabalham em conjunto, são produzidos semi-eixos homocinéticos (SEH), juntas fixas e juntas deslizantes para veículos. A Figura 6 ilustra as peças que passam por esse tipo de tratamento, sendo elas as Tulipas e Pontas de Eixo, que compõem a Junta Deslizante e Junta Fixa, respectivamente. Ambos componentes fazem parte do semi-eixo, mostrado na Figura 7, o qual permite a ligação dinâmica entre o motor e as rodas, sendo ele responsável por transmitir a potência e permitir ângulos de esterçamento. Estes ângulos, além de acomodar a suspensão do veículo, também isolam suas vibrações. A Junta Fixa conecta na roda, enquanto a Junta Deslizante faz a ligação no motor.

Figura 6: Desenho 3D ilustrando Tulipas e Pontas de Eixo.



FONTE: Adaptação de produto da empresa

Figura 7: Semi – eixo e seus componentes.

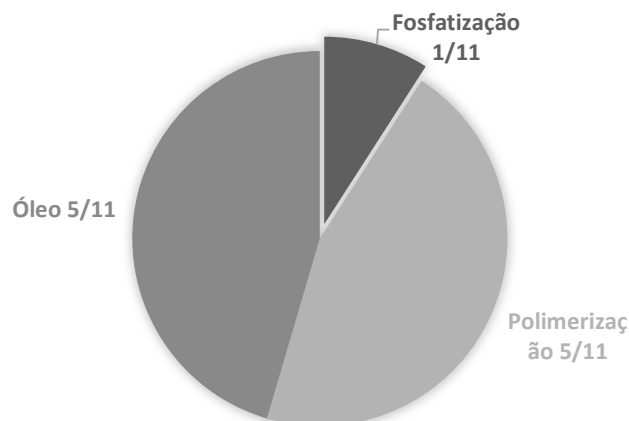


FONTE: Adaptação de produto da empresa

Devido às aplicações e condições a que estão expostas, essas peças necessitam principalmente de uma alta resistência a corrosão. Tal fato se faz necessário para que seja evitada a degradação da peça, que pode provocar posteriores falhas do componente e até mesmo acidentes graves com o veículo.

O processo de fosfatização era utilizado em ampla escala pela empresa a fim de lubrificar a peça para posterior conformação mecânica à frio, empregar a resistência à corrosão e garantir elevada qualidade às peças produzidas, porém, devido à fatores ambientais e econômicos, vem caindo em desuso em todas suas plantas em nível mundial, sendo substituído pelo processo de polimerização. Este fato é comprovado ao se observar a Figura 8, que nos mostra que a unidade estudada é a única, das onze plantas que realizam tratamento de superfície para preparação da peça para conformação mecânica, que ainda utiliza o processo de fosfatização, representando uma pequena fatia de aproximadamente 9%.

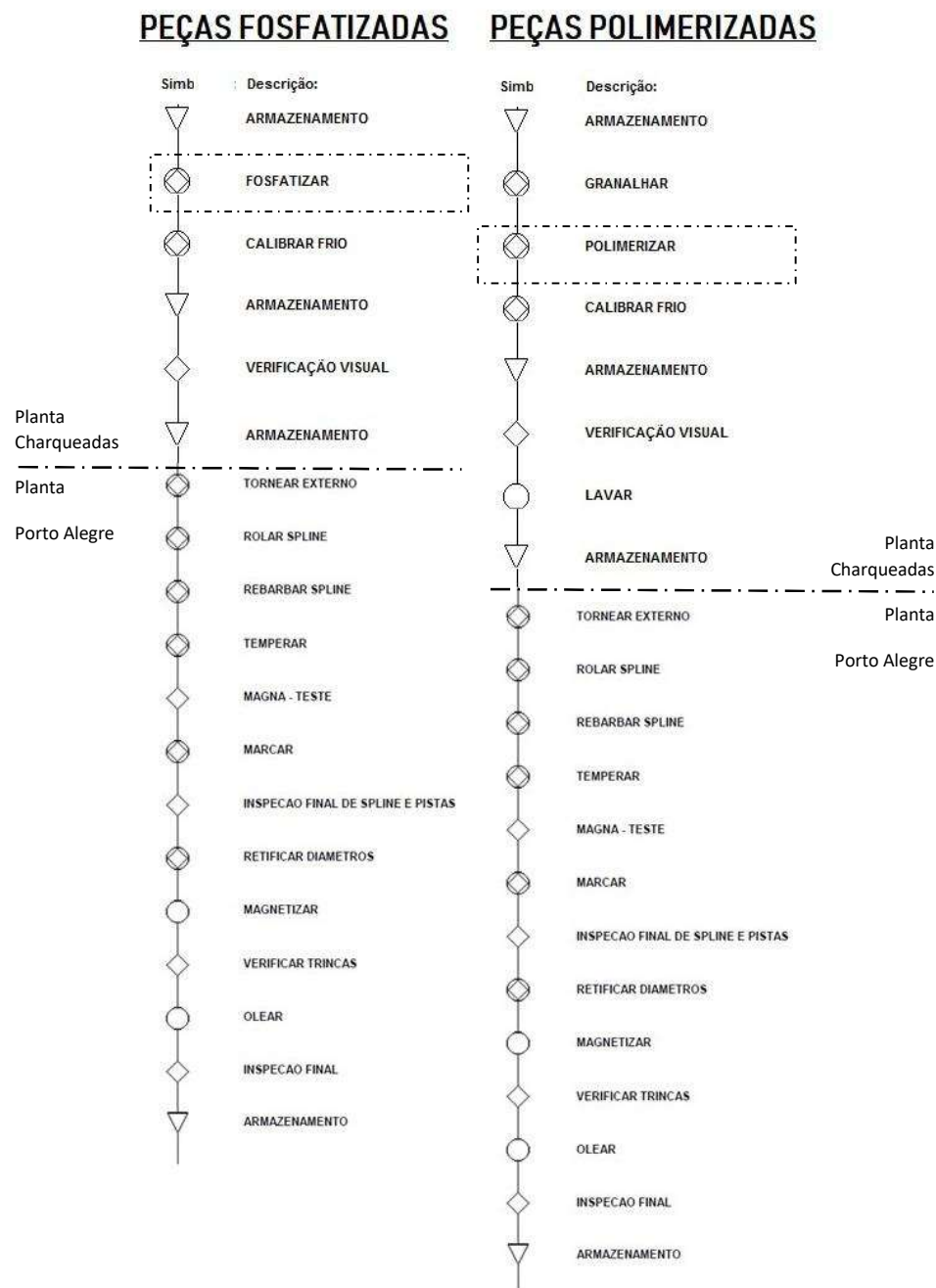
Figura 8: Comparativo de processos da empresa.



FONTE: AUTOR

A forjaria da empresa iniciou a utilização de um processo à base de polímero em suas peças em outubro de 2015 e tem como objetivo atingir 100% de sua linha até 2020. Atualmente, cerca de 40% das Tulipas, que antes eram fosfatizadas, já estão sendo tratadas por polimerização. As etapas de ambos os métodos de revestimento estão resumidamente descritas na Figura 9 para uma melhor compreensão e comparação dos processos.

Figura 9 : Fluxograma de produção de dois tratamentos de superfícies distintos.



FONTE: Adaptação de Fluxograma da empresa

Até o presente momento, a camada de polímero tem apresentado resultados semelhantes em relação à sua ação lubrificante, ou até melhores ao se comparar com a camada fosfatizada. Com relação a camada temperada adquirida no tratamento térmico de têmpera das peças, a fim de empregar a resistência mecânica exigida pelo componente, o fabricante do produto polimerizante informa que não há necessidade de qualquer alteração nos parâmetros de têmpera de peças fosfatizadas e polimerizadas, pois o polímero não tem influência sobre a profundidade camada. Ou seja, o fabricante informa que o produto não interfere na resistência mecânica e dureza final de peças tratadas com o polímero em comparação com as peças com a camada de fosfato.

Características e benefícios do processo de polimerização, informado pelo fabricante: melhores propriedades de lubrificação que acarretam no aumento da vida das ferramentas, componentes conformados com precisão para indústria automobilística, economia de custos por apresentar menos etapas no processo e, conseqüentemente, atenuação na utilização de água e energia, o que resulta também na redução de efluentes, além de ser ambientalmente favorável por não gerar lama e por não necessitar a remoção de camada com banho de cromo.

Em contrapartida, é um processo que tem se mostrado insuficiente em relação a sua ação anticorrosiva. Isso ocorre, pois, o produto comercial empregado (BONDERITE L-FM FL 743, fabricado pela Henkel) tem características de um polímero higroscópico, ou seja, apresenta a propriedade de absorver água. Sendo assim, ele tende a se hidratar com a umidade do ar, podendo tornar as peças polimerizadas mais suscetíveis a corrosão por pite.

Para evitar que as peças sejam oxidadas e ao mesmo tempo retirar o excesso de polímero da superfície das mesmas, uma das medidas adotadas pela empresa como forma de contenção/prevenção foi a utilização de pequenas lavadoras após a etapa de conformação à frio. Essas lavadoras foram projetadas com base nas lavadoras de grande porte que são utilizadas em outras plantas da empresa, porém a unidade em questão achou inviável a utilização de lavadoras maiores devido ao espaço requerido para sua instalação, custo, manuseio, consumo energético, à excessiva quantidade de água consumida e conseqüente geração de efluentes, além do gasto demasiado com a aquisição dos equipamentos, o que tornaria a utilização do polímero ao invés do fosfato um tanto quanto contraditória. As lavadoras que estão sendo utilizadas são móveis e apresentam o mesmo princípio das lavadoras grandes. As peças saem da prensa e em sequência passam pela lavadora, a mesma pulveriza sobre toda superfície da peça, inicialmente água, para efetuar a limpeza do polímero e posteriormente o BONDERITE 6461 em concentração 10%, que é um protetivo comercial anticorrosivo, também fornecido pelo mesmo fabricante do polímero. Como as peças saem quentes da etapa de conformação, aproximadamente a 90°C, ao



pulverizar-se o protetivo diluído em água, em pouco tempo a água deve evaporar e apenas uma camada do produto se deposita sobre a peça. Porém, até mesmo com o protetivo, a resistência contra corrosão das peças continua insatisfatória.

No final da produção das Tulipas o fluxograma de processo da empresa requer que todas elas, tanto fosfatizadas quanto polimerizadas, sejam banhadas em um óleo protetivo com a finalidade de evitar que ocorra corrosão das Tulipas antes do envio para a montagem do produto. Em uma situação normal de trabalho (sem retrabalho de oxidação) a média de consumo do óleo protetivo chega a 80 litros mensais. Porém, para as duas células que trabalham com peças polimerizadas, o consumo do óleo subiu para 160 litros mensais. Isso acontece para o caso daquelas peças que já chegam nestas células da linha com oxidação e necessitam ser retrabalhadas para a posterior utilização. O consumo de óleo protetivo dobra, pois após o retrabalho, que consiste em remover manualmente a superfície oxidada com escovas de aço, as peças devem ser banhadas em óleo protetivo, para só depois serem enviadas para a etapa usinagem.

Devido aos fatos apresentados, desde a implementação da polimerização em 2015, todos os meses uma elevada quantidade de peças necessita ser retrabalhada para que seja possível utilizá-las na produção.

Este é um problema reportado apenas nas Tulipas, as Pontas de Eixo não necessitam nenhum tratamento protetivo posterior à polimerização, pois essas peças são totalmente usinadas, com isso, camada superficial oxidada é totalmente retirada nesta operação.

Visto que as duas células que trabalham com Tulipas polimerizadas são uns dos gargalos de produção da empresa, devido ao retrabalho das peças oxidadas e às paradas de linha para ajuste dos parâmetros de temperatura, pode-se considerá-las um obstáculo que interfere nos processos produtivos e comprometem a qualidade dos produtos. Isto não só afeta a lucratividade, mas também resulta na redução do desempenho e impacta negativamente os resultados da empresa como um todo. Sendo assim, é fundamental que se busquem formas de corrigir ou contornar tal situação.

### 3.2 CENÁRIO SUGERIDO

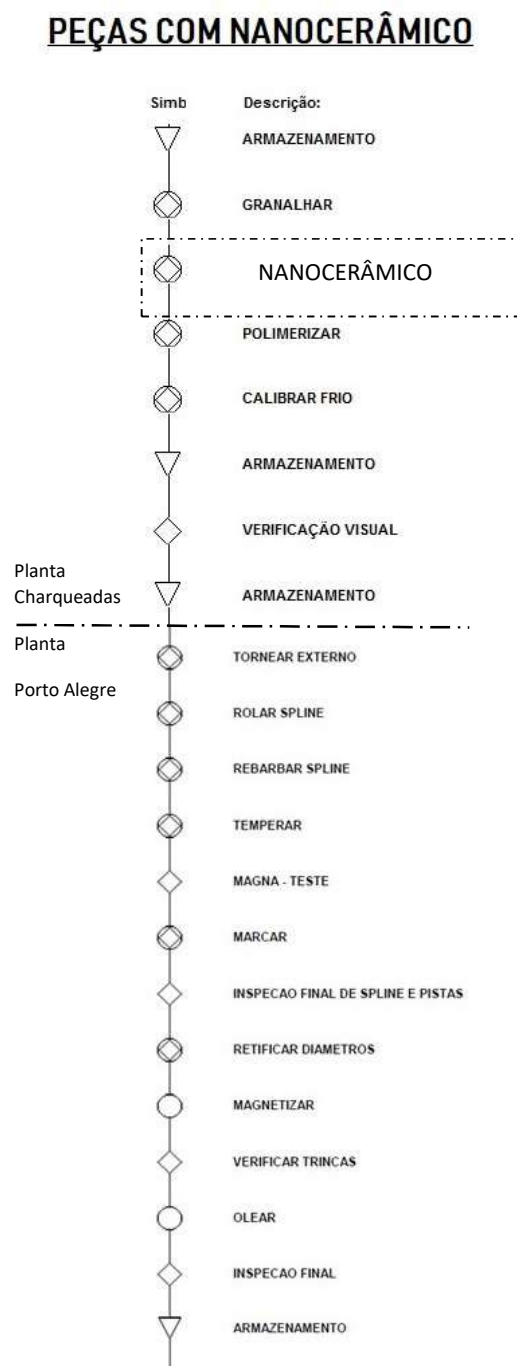
Com base nos problemas provenientes da utilização do processo a base polímero como substituição da fosfatização que foram citados em capítulos anteriores, foi proposta uma alternativa para evitar a oxidação das peças antes do processo de polimerização, a partir da utilização de um revestimento nanocerâmico à base de zircônio como forma de proteção.

Sabendo que o trabalho à frio e superfícies rugosas facilitam o ataque corrosivo por pites nos metais, acelerando sua degradação, o revestimento nanocerâmico parece uma boa ideia pois ele cria uma fina camada de óxido de zircônio sobre a superfície da peça. Essa camada impede o contato do substrato com a atmosfera protegendo contra a corrosão antes mesmo da polimerização. Assim, o polímero higroscópico, que é o grande vilão neste processo, não entra em contato com a peça e, conseqüentemente, a umidade proveniente do ar, que é retida pelo polímero, também não.

O revestimento BONDERITE M-NT CC 42 BR é um conversor químico a base de zircônio especialmente formulado para tratamento de superfícies de aço, zinco e alumínio. É livre de componentes orgânicos voláteis e metais pesados tóxicos. O desempenho da resistência a corrosão é igual ou até mesmo melhor que o fosfato de ferro e apresenta um pós-enxágue isento de cromo. É compatível com todos os tipos de tintas e é empregado em tratamentos de preparação de peças destinadas às indústrias automotivas, eletrodomésticos, e peças em geral que são expostas ao ataque de agentes corrosivos. Por ter um comportamento ácido, antes de seu lançamento à rede de efluentes é necessário tratamento e neutralização. Principais características e benefícios do revestimento nanocerâmico: melhores propriedades de lubrificação que acarretam no aumento da vida das ferramentas, componentes conformados com precisão para indústria automobilística, economia devido ao menor número de estágios no processo, conversão mais rápida da camada, aumento de produção, redução de manutenção, menos controles do processo, baixos custos de gerenciamento de descartes e menor quantidade de água utilizada, o que provoca redução de efluentes gerados, além de não apresentar metais pesados e fósforo, reduzir em aproximadamente 90% da lama ao comparar-se com o processo de fosfatização e utilizar menos produtos químicos no processo (Boletim Técnico do produto BONDERITE M-NT CC 42 BR; FABRETE, 2018).

Sendo assim, a Figura 10 retrata o fluxograma do processo proposto.

Figura 10: Fluxograma do processo com a adição da etapa de conversão da camada nanocerâmica.



FONTE: Adaptação de Fluxograma da empresa

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item, serão apresentadas as operações executadas para o tratamento superficial do substrato, bem como os ensaios e técnicas realizados para avaliação do desempenho dos mesmos.

### 4.1 CORPOS DE PROVA

As peças são feitas em aço XC45, semelhante ao aço 1045 em termos de elementos químicos. A Tabela 1 apresenta a composição química do material utilizado.

Tabela 1: Composição química do aço utilizado em % de massa.

%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	%Al
0,470	0,71	0,23	0,013	0,013	0,017	0,09	0,03	0,140	0,016

FONTE: CERTIFICADO DE MATÉRIA PRIMA DO AÇO

Para a preparação dos 9 corpos de prova e posterior realização dos ensaios, foram utilizadas Tulipas e Pontas de Eixo de três tipos de processos de tratamentos de superfícies, a fim de garantir a confiabilidade dos testes e permitir a comparação entre os revestimentos.

As peças fosfatizadas e polimerizadas foram retiradas diretamente da linha de produção e seguem o procedimento padrão da empresa. A solução fosfatizante e a polimerizante são de formulação de dois representantes comerciais diferentes, Klintex e Henkel, respectivamente.

O revestimento nanocerâmico utilizado provém de uma solução concentrada à base de ácido hexafluorzircônio, vendido comercialmente como BONDERITE M-NT CC 42 BR, e foi fornecido pelo mesmo representante da solução polimerizante. O produto pode ser aplicado em sistemas de “spray” ou imersão com um ou mais estágios, de acordo com as condições de funcionamento. O método escolhido foi o de imersão com um estágio.

Os tempos de imersão das peças na solução de conversão foram de 2 e 4 minutos. Como se trata de revestimentos em escala nanométrica, um curto período de imersão é suficiente para desencadear a deposição do produto em alguns sítios ativos da superfície da peça que com o passar do tempo, começa a se estender por toda a superfície formando um filme homogêneo.

Anteriormente ao banho de conversão, as peças foram submetidas à limpeza mecânica com jato de granalha para limpeza e preparo da superfície. Para a preparação do banho os procedimentos foram baseados nas instruções especificadas pelo fabricante. Sendo assim, foi

utilizado 50 ml do BONDERITE M-NT CC 42 BR diluído em 2L de água à temperatura ambiente sob agitação. O banho é controlado pela determinação de pH e deve ser mantido constante durante todo processo. A faixa de pH recomendada é de 4,5 a 5,5 à 20°C. Não é recomendado deixar o pH nem muito maior que 5,0 nem muito menor que 4,5 devido à deposição do nanocerâmico no próprio banho e deposição do produto sobre o substrato, respectivamente. O pH foi determinado a partir da fita indicadora de pH e foi trabalhado com o pH na faixa dos 4,5. Para que o banho atingisse os valores requeridos foi necessário a utilização de algumas gotas de NaOH diluído, que serviu como alcalinizante. Após a imersão as peças apresentaram coloração levemente azulada, conforme mostrado na Figura 11, que apresenta um comparativo entre uma peça ainda sem o revestimento nanocerâmico (a) e uma após a conversão da camada superficial (b).

Figura 11: Peça antes, à esquerda, e depois da imersão no banho de nanocerâmico.



Após o banho de conversão e secagem as peças com o revestimento nanocerâmico seguiram o fluxograma padrão de produção da empresa, porém sem a lavagem posterior à conformação mecânica.

A Tabela 2 apresenta todos os corpos de provas ensaiados neste trabalho e os processos pelos quais eles foram submetidos.

Tabela 2: Relação dos corpos de provas utilizados.

<b><u>CORPO</u></b> <b><u>DE PROVA</u></b>	<b>PROCESSOS</b>							
	FOSFATO	NANO imersão 2min	NANO imersão 4min	POLÍMERO	CONFORMAÇÃO	PROTETIVO	USINAGEM	TÊMPERA
<b>CP1</b>	<b>X</b>				<b>X</b>		<b>X</b>	<b>X</b>
<b>CP2</b>				<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
<b>CP3</b>		<b>X</b>		<b>X</b>	<b>X</b>		<b>X</b>	<b>X</b>
<b>CP4</b>		<b>X</b>		<b>X</b>	<b>X</b>		<b>X</b>	<b>X</b>
<b>CP5</b>			<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		<b>X</b>	<b>X</b>
<b>CP6</b>			<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		<b>X</b>	<b>X</b>
<b>CP7</b>	<b>X</b>				<b>X</b>			
<b>CP8</b>				<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		
<b>CP9</b>		<b>X</b>		<b>X</b>	<b>X</b>			

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO METALÚRGICA E MECÂNICA

Para os ensaios apresentados nesta seção, foram utilizados corpos de prova CP3 e CP5, a fim de analisar as influências da camada depositada no revestimento nanocerâmico e os tempos de imersão nas propriedades mecânicas e metalúrgicas.

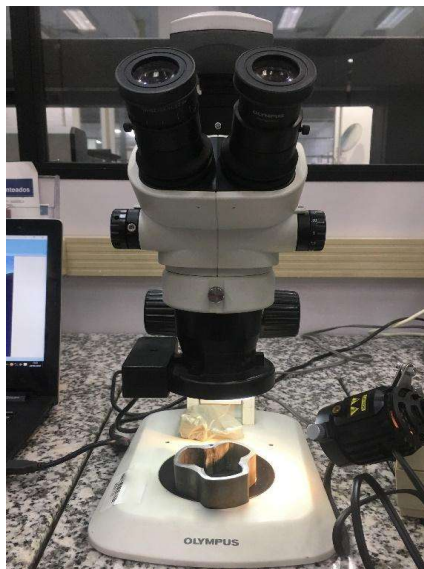
As análises foram realizadas após o corte, lixamento e polimento. Para o ataque químico, foi utilizado o reagente Nital 2%. A Figura 12 apresenta um exemplo de corpo de prova após sua preparação.

Figura 12: CP3 preparado.



Para a análise macrovisual da camada temperada foi utilizado o microscópio ótico da marca Olympus modelo SZ61, mostrado na Figura 13, com aumento de 10x.

Figura 13: Microscópio ótico Olympus SZ61.



O microscópio ótico da marca Zeiss, modelo Observer.A1m, mostrado na Figura 14, encontra-se no laboratório metalúrgico da empresa e foi utilizado para a análise da microestrutura superficial e nuclear das peças estudadas. As imagens foram obtidas em aumento de 50, 100 e 200x.

Figura 14: Microscópio ótico Zeiss Observer.A1m.



A profundidade da camada temperada, dureza superficial e dureza do núcleo foram medidas utilizando o microdurômetro da marca Buehler, modelo Tukon 1102, representado na Figura 15, localizado no laboratório metalúrgico da empresa. A unidade de medição utilizada para esta análise foi em Vickers, para isso, foi utilizado um penetrador de diamante em formato de pirâmide de base quadrada com um ângulo de  $136^\circ$  entre as faces opostas, carga de 500 g e limite de 500 HV.

Foi escolhida uma carga de 500 g, que é uma carga relativamente baixa, para que o penetrador atinja somente a camada mais superficial do material. O limite de 500 HV foi determinado de acordo com as especificações do produto.



Figura 15: Microdurômetro utilizado.



#### 4.3 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO

Foram ensaiados os 7 corpos de prova restantes para acompanhar a resistência à corrosão nas diferentes condições de tratamento de superfícies, sendo eles: CP1, CP2, CP4, CP6, CP7, CP8 e CP9.

O ensaio de névoa salina, também conhecido por *salt-spray*, tem o propósito de simular uma condição altamente corrosiva através da nebulização de uma solução aquosa de cloreto de sódio (concentração  $50 \pm 5 \text{g/L}$ ) na temperatura  $35 \pm 2^\circ\text{C}$ , com pH entre 6,5 e 7,2 e pressão do ar entre 0,7 e 1,4  $\text{kgf/cm}^2$ .

O período de exposição à névoa salina foi de 6 horas. As amostras foram ensaiadas no equipamento Bass, modelo UCS, que se encontra no Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais (LACOR). Para tanto foi seguindo as normas NBR8094 e ASTM B117. Esses ensaios são acreditados no CGECRE (Inmetro).

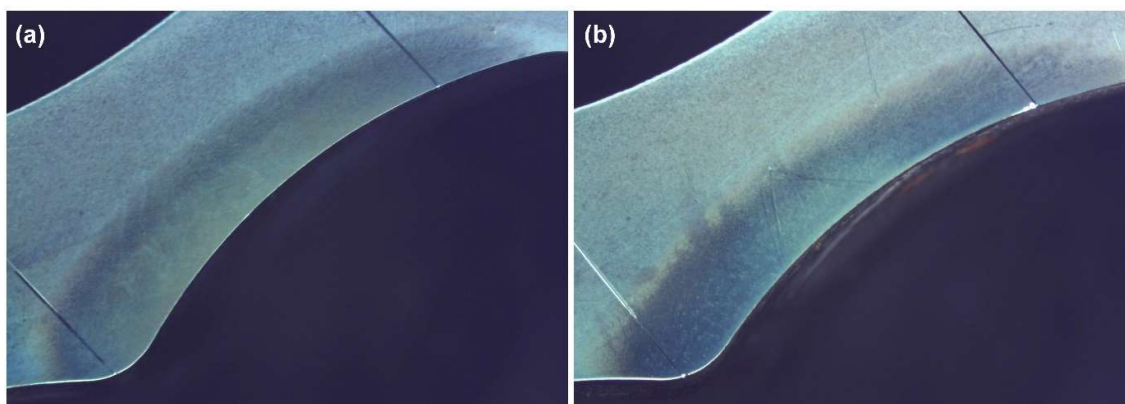
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A parte experimental do presente trabalho teve como objetivo comparar o desempenho de três tratamentos de superfícies diferentes, os resultados obtidos a partir dos experimentos executados serão apresentados e discutidos nesta seção.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO METALÚRGICA E MECÂNICA

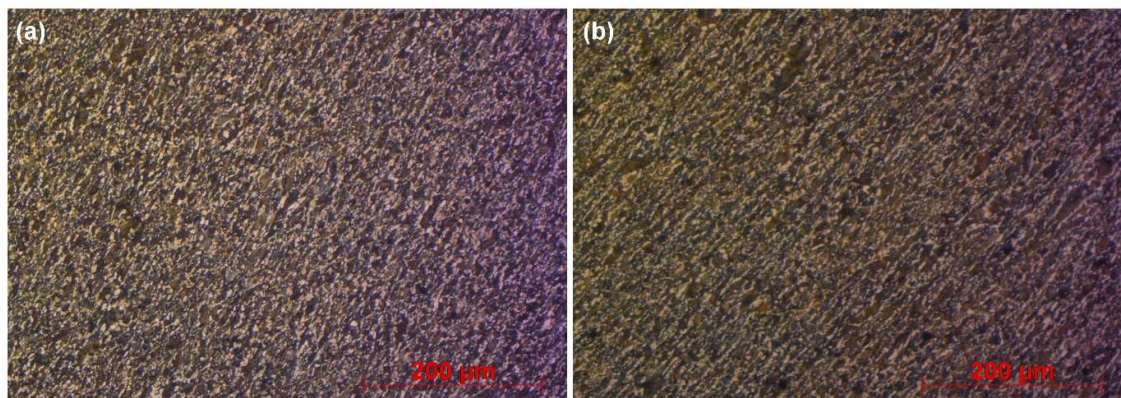
A análise macrovisual realizada em microscópio ótico mostra a camada temperada dos corpos de prova CP3 (a) e CP5 (b), ambos com tratamento de nanocerâmico, porém com tempos diferentes de imersão. Ambas camadas se mostraram muito parecidas e visualmente estão dentro dos parâmetros exigidos pela empresa, indicando que a camada nanocerâmica não influenciou no processo de têmpera.

Figura 16: Camada temperada do CP3 (a) e CP5 (b) utilizando o microscópio ótico Olympus SZ61.



A microestrutura do núcleo das peças estudadas, apresentada na Figura 17 em aumento de 100x, é formada por Perlita e Ferrita refinada, com tamanho de grão 8 ASTM, e está dentro dos parâmetros esperados para este tipo de material. CP3 e CP5 não apresentaram diferenças significativas entre suas microestruturas.

Figura 17: Microestrutura nuclear do CP3 (a) e CP5 (b) em aumento de 100x. Grãos escuros Perlita e claros Ferrita.



Por sua vez, a camada temperada apresentou microestrutura martensítica, como podemos ver em aumento de 50x na Figura 18, de 100x na Figura 19 e de 200x na Figura 20. O resultado encontrado também está dentro das especificações da empresa para este produto. CP3 e CP5 não apresentaram variações consideráveis entre si.

Figura 18: Microestrutura martensítica da camada temperada do CP3 (a) e CP5 (b) em aumento de 50x.

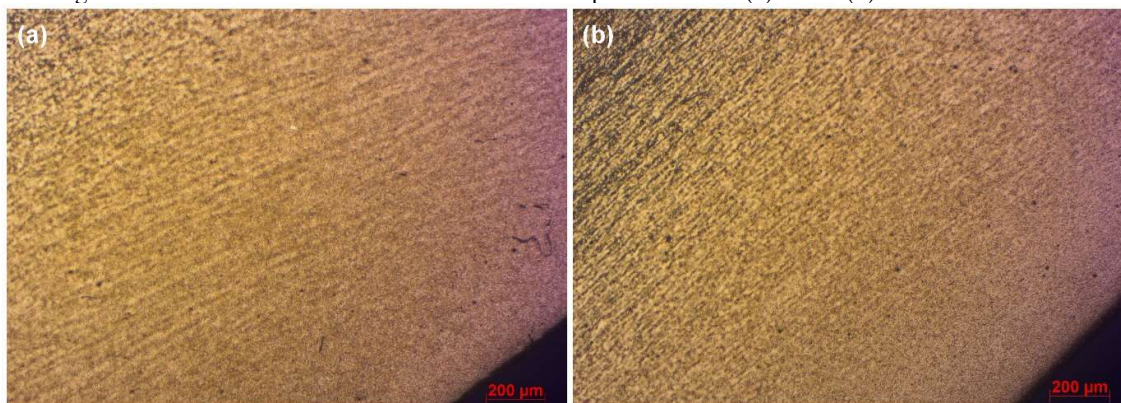


Figura 19: Microestrutura martensítica da camada temperada do CP3 (a) e CP5 (b) em aumento de 100x.

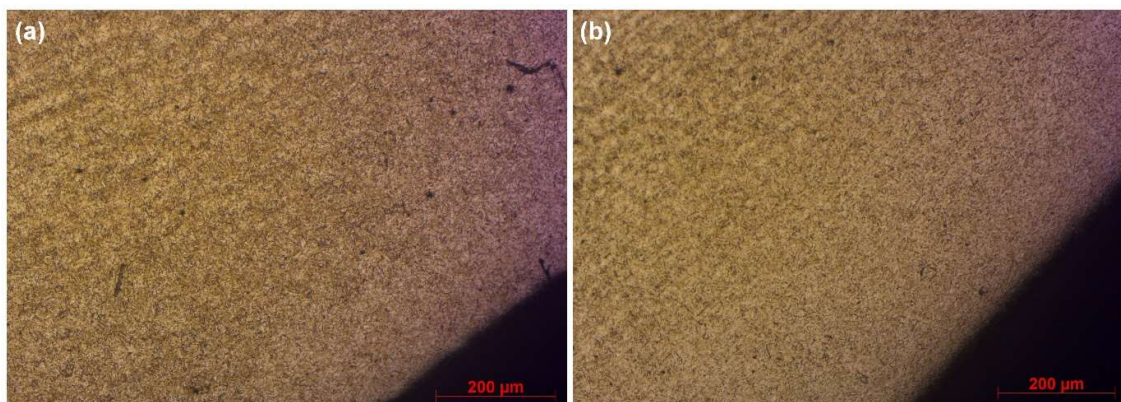
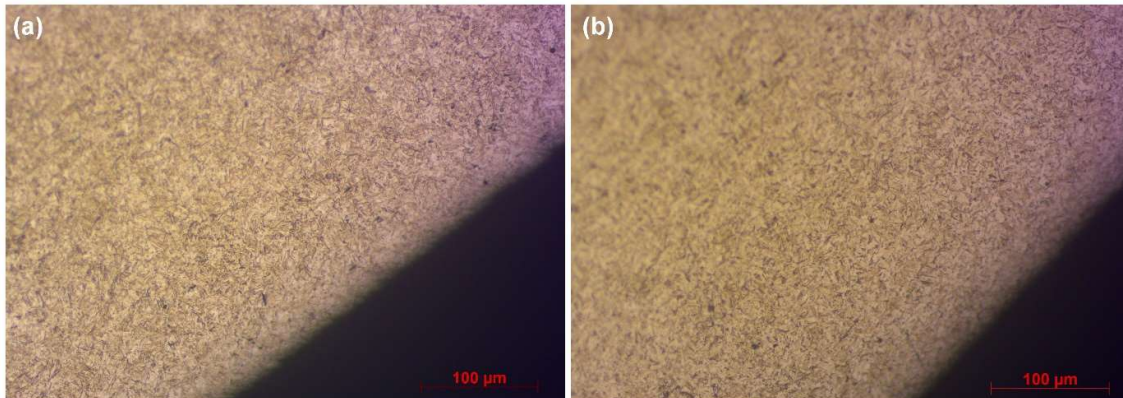
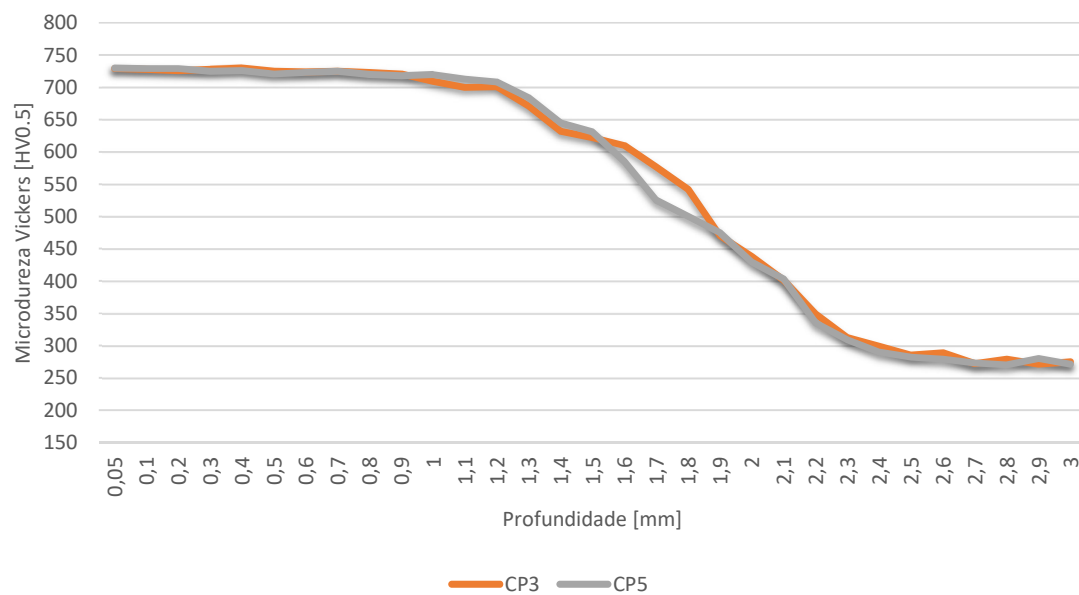


Figura 20: Microestrutura martensítica da camada temperada do CP3 (a) e CP5 (b) em aumento de 200x.



Com base nas medições feitas com o microdurômetro, foi possível elaborar o perfil de microdureza dos corpos de prova, mostrado na Figura 21. A maior dureza é encontrada na superfície, devido à camada temperada e sua microestrutura martensítica, enquanto o núcleo, que é formado por perlita e ferrita refinada, apresenta menor dureza. Os resultados encontrados neste ensaio estão dentro das cotas definidas para este produto.

Figura 21: Perfil de microdureza do CP3 e CP5.



As medições de dureza superficial e profundidade de camada, apresentadas na Tabela 3, constataram que não ocorre alteração significativa e que os valores estão dentro dos parâmetros estabelecidos pela empresa.

Tabela 3: Dureza superficial e profundidade da camada temperada do CP3 e CP5.

	CP3	CP5
<b>Dureza superficial</b>	729 HV (61,4 HRC)	730 HV (61,5 HRC)
<b>Profundidade da camada</b>	1,85 mm	1,80 mm

Esses resultados mostram que a camada nanocerâmica não interferiu nas operações subsequentes do processo, conforme o esperado.

## 5.2 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO

O tempo que as peças resistiram ao ensaio de Névoa Salina estão apontados na Tabela 4 os resultados estão expressos conforme o critério LACOR para avaliação de corrosão.

Figura 22: Acompanhamento Névoa Salina.

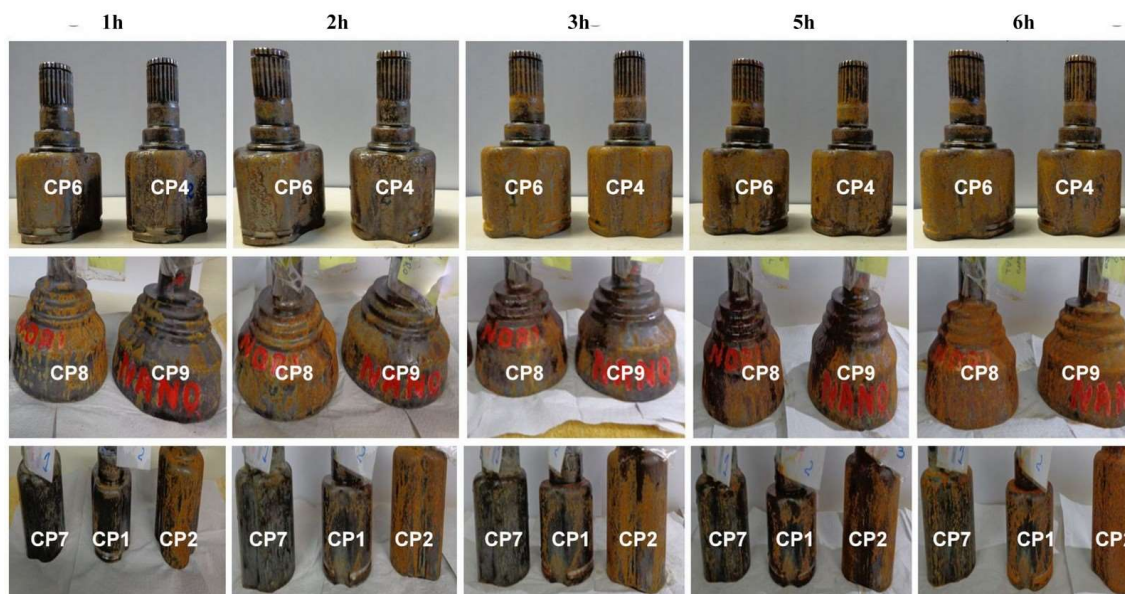


Tabela 4: Resultado Névoa Salina.

CORPO DE PROVA	GRAU DE CORROSÃO DE ACORDO COM O TEMPO DE EXPOSIÇÃO				
	1h	2h	3h	5h	6h
CP1	V3	V3	V3	V3	V4
CP2	V3	V4	V4	V5	V5
CP4	V3	V4	V5	V5	V5
CP6	V3	V4	V5	V5	V5
CP7	V1	V1	V1	V3	V3
CP8	V4	V5	V5	V5	V5
CP9	V3	V4	V4	V4	V5

Legenda de acordo com o critério LACOR:

Aspecto	Grau de Corrosão		
V – Vermelho	0 – Perfeito	1 – Pontos em áreas localizadas	2 – Pontos em geral
	3 – Áreas localizadas	4 – Parcial: pontos e áreas	5 - Total

De acordo com o acompanhamento feito durante o ensaio, Figura 22, foi observado que as peças que apresentaram melhor resistência à corrosão continuam sendo as peças fosfatizadas (CP1 e CP7), enquanto as apenas polimerizadas (CP2 e CP8) apresentaram o pior desempenho. As peças que foram imersas em solução à base de ácido hexafluorzircônio (CP4, CP6 e CP9) antes do processo de polimerização demonstraram melhoria em sua performance.

O ensaio de Névoa Salina é muito agressivo para esse produto, pois não retrata sua utilização. Entretanto, é um ensaio que fornece um resultado mais rápido e, em curto espaço de tempo, pode ser feita uma comparação entre os processos. Seria recomendado fazer um ensaio em Câmara Úmida.

## 6 CONCLUSÕES

Através do estudo comparativo realizado no presente trabalho, pode-se concluir que:

Os resultados obtidos através dos ensaios de caracterização revelaram que a camada nanocerâmica não interferiu nas operações subsequentes do processo, uma vez que os corpos de prova ensaiados apresentaram todas suas propriedades metalúrgicas e mecânicas de acordo com as especificações do produto.

O tempo de imersão na solução de conversão não intervém nas propriedades metalúrgicas e mecânicas do material, tal como na sua resistência à corrosão, visto que os resultados dos ensaios se mostraram muito próximos para os corpos de prova imersos por 2 e 4 minutos.

O ensaio de Névoa Salina se mostrou muito agressivo para esse produto e não retrata sua real utilização.

A utilização do revestimento nanocerâmico como forma de proteção contra a corrosão se mostrou eficaz e apresentou resultado satisfatório, principalmente se comparado com o atual processo à base de polímero. Embora o processo de fosfatização tenha apresentado resultados superiores na resistência à corrosão.

Com a implementação do revestimento alternativo à base de óxido de zircônio, seria possível diminuir consideravelmente a quantidade de Tulipas oxidadas e, conseqüentemente, o elevado número de peças retrabalhadas. Sendo assim, uma das principais causas dos gargalos de produção da empresa seria reduzida, ou até mesmo eliminada, o que beneficiaria os processos produtivos consecutivos, a qualidade dos produtos, bem como a lucratividade da empresa e aumento do seu desempenho como um todo.



## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Utilização do ensaio em Câmara Úmida para este estudo, pois poderia expressar a eficiência do revestimento com mais precisão.

Levantamento de custos devido às peças oxidadas e da implementação do revestimento nanocerâmico na linha da empresa em questão.

Investigação detalhada a respeito do processo de polimerização a fim de determinar e eliminar a causa raiz da oxidação.

## 8 REFERÊNCIAS

AÇO BRASIL. **Aço no Dia a Dia**. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/diadia.html>> Acesso em: 27 de abril de 2018.

ASTM B 117 - 09 Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus.

Boletim Técnico do produto BONDERITE M-NT CC 42 BR. Henkel Ltda, 2013.

Boletim Técnico do produto BONTERITE L-FM 743. Henkel Ltda, 2014.

BUSHAN, B. Springer Handbook of Nanotechnology, First Edition, New York, Springer Verlag, 2004.

CALLISTER JR, W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais - Uma abordagem integrada**. Rio de Janeiro : LTC, 2006.

DONOFRIO, John. **Zinc phosphating. Metals and Plastics Publications. s.l. : Oakite Products Inc, 2004. Vol. 102.**

DRONIOU, Patrick. **Nanoceramic-based Conversion Coating: Ecological and economic benefits position process as a viable alternative to phosphating systems**. Organic Finishing, 2005.

FABRETE, Emerson. **Substituição do fosfato e Lubrificante para Conformação à Frio**. Henkel, 2017.

FABRETE, Emerson. **Tratamento de Superfície: Fosfatização, Nanotecnologia e Autodeposição**. Henkel, 2018.

FELTRE, Ricardo. **Química**. São Paulo: Moderna, 2004.

FISPQ (Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos) do BONDERITE M-NT CC 42 BR. Henkel Ltda, 2017.

FISPQ (Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos) do BONTERITE L-FM 743. Henkel Ltda, 2015.

GENTIL, Vicente. **Corrosão. s.l. : LTC, 2003.**

GNECCO, Celso, Mariano, Roberto e Fernandes, Fernando. **Tratamento de superfície e pintura**. Rio de Janeiro : IBS/SBCA, 2003.

NBR8094 - Método de ensaio para material metálico revestido e não revestido: corrosão por exposição à névoa salina.

OLIVEIRA, Antônio Roberto de. **Corrosão e tratamento de superfície** / Antônio Roberto de Oliveira. — Belém: IFPA ; Santa Maria : UFSM, 2012.

VAN DELINDER, L.S. **Corrosion Basics: An Introduction** Ed., NACE International, 1984.

WENG, Duan, WANG, Rizhong e ZHANG, Guoqing. **Environmental Impact of Zinc Phosphating in surface treatment of metals**. Metal Finishing, 1998.

WOLPERS, Kevin Ogle e M. **Phosphate Conversion Coatings**; ASM Handbook; ASM International; 2003.