

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE QUÍMICA

TAMIRES DE MATOS

**A INFLUÊNCIA DA PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE NA CROMAGEM DE
BARRAS DO AÇO SAE 1045**

Porto Alegre, novembro de 2016.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE QUÍMICA

TAMIRES DE MATOS

**A INFLUÊNCIA DA PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE NA CROMAGEM DE
BARRAS DO AÇO SAE 1045**

Trabalho de conclusão de curso apresentado junto à atividade de ensino “Projeto Tecnológico” do Curso de Química Industrial, como requisito parcial para a obtenção do grau de Químico Industrial.

Prof^a. Dr^a. Emilse Maria Agostini Martini
Orientadora

Porto Alegre, novembro de 2016.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família que sempre me apoiou e esteve ao meu lado em todos esses anos, me incentivando e motivando.

Agradeço ao meu namorado, Eduardo, que tanto me apoia e me incentiva, acredita em mim e sempre me motiva. Agradeço por toda paciência, carinho e companheirismo.

Agradeço à UFRGS pela oportunidade de um ensino gratuito e de qualidade, aos professores que durante esses anos transmitiram seus conhecimentos e principalmente, à professora Emilse Maria Agostini Martini por toda paciência, carinho, incentivo e ensinamentos.

Agradeço à todos colegas que dividiram algum conhecimento durante todos esses anos e aos meus amigos que me incentivaram a sempre persistir.

Agradeço a empresa Sulcromo pela oportunidade de realizar o trabalho nas suas dependências, pelos materiais utilizados, tempo e operadores disponíveis. Agradeço aos colegas de trabalho, por toda ajuda na parte dos processos, além de todo conhecimento compartilhado, os quais agregaram muito para tornar possível esse trabalho.

ABSTRACT

The present study investigated the influence of the surface treatment of the SAE 1045 steel on the quality of the electrodeposited chromium layer for the protection against the corrosion of the base metal. Test specimen sets, in triplicate, underwent different forms of polishing, not usual in an industrial preparation routine. All test specimens were cracked to remove the first metal layer, covered with oil by the steel manufacturer, and exhibiting corrosion due to inadequate factory storage. The specimens were then polished with sandpaper in order of increasing particle size, followed by polishing with animal grease and paste. After finishing the surface preparation, the roughness was evaluated through the parameter Ra. The higher the level of polishing, the lower Ra, indicating the homogenization of the surface. Afterwards, the samples were weighed and placed in a saline mist chamber, with a high chloride content. It was observed that the test time, before the start of the corrosion process, is inversely proportional to the roughness. The results were discussed in terms of diffusion limiting current for the cathode process of $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ reduction and the different diffusion pathways in the valleys and peaks around a midline of the metal surface. Thus, very rough surfaces tend to receive layers of chromium of different thickness, with faults and are more susceptible to corrosion by chloride. A surface preparation protocol was then proposed to meet the 96 hour *salt spray* specification as required for this type of chromed material.

RESUMO

O presente trabalho investigou a influência do tratamento da superfície do aço SAE 1045 na qualidade da camada de cromo eletrodepositada para a proteção contra a corrosão do metal base. Conjuntos de corpos de prova, em triplicata, passaram por diferentes formas de polimento, não usuais em uma rotina de preparação industrial. Todos os corpos de prova passaram por uma retífica, a fim de retirar a primeira camada metálica, cobertas com óleo pelo fabricante do aço, e apresentando corrosão devido ao armazenamento fabril inadequado. Os corpos de prova foram então polidos com lixas em ordem crescente de granulometria, seguido de polimento com graxa animal e pasta. Após a finalização da preparação da superfície, foi avaliada a rugosidade, através do parâmetro Ra. Quanto maior o nível de polimento, menor Ra, indicando a homogeneização da superfície. Após, as amostras foram pesadas e colocadas em câmara de névoa salina, com alto teor de cloreto. Foi observado que o tempo de ensaio, antes do início do processo de corrosão, é inversamente proporcional à rugosidade. Os resultados foram discutidos em termos de corrente limite de difusão para o processo catódico de redução do $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ e dos diferentes caminhos de difusão nos vales e nos picos em torno de uma linha média da superfície metálica. Assim, superfícies muito rugosas tendem a receber camadas de cromagem de diferente espessura, com falhas e ficam mais suscetíveis à corrosão por cloreto. Um protocolo de preparação da superfície foi então proposto, com o objetivo de atender a especificação de 96 horas em *salt spray*, como requerido para esse tipo de material cromado.

Palavras-chaves: Aço SAE 1045. Cromagem. Rugosidade. *Salt Spray*. Corrosão. Polimento. Névoa Salina.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Rebolos de diferentes abrasivos.....	32
Figura 2: Tipos de lixas.....	33
Figura 3: Tipos de rodas de polimento: (a) feltro, (b) sisal e (c) pano.....	33
Figura 4: Tipo de massas de polimento.....	34
Figura 5: Rugosímetro – aparelho para medição de rugosidade superficial.....	35
Figura 6: Barras recebidas em feixes.....	49
Figura 7: Preparação do corpo de prova no torno polidor utilizando lixa. (a) Montagem; (b) polimento.....	50
Figura 8: Copo de prova recebendo tratamento na retífica (com refrigeração com óleo solúvel). (a) Montagem; (b) polimento.....	51
Figura 9: Retífica <i>Centerless</i>	52
Figura 10: Preparação do pedaço de barra na retífica <i>centerless</i> . (a) Montagem; (b) polimento.....	52
Figura 11: Corpos de prova preparados (TCC 05 e TCC 06), observando-se a diferença de brilho.....	53
Figura 12: Posicionamento da base do rugosímetro no corpo de prova para iniciar ensaio.....	54
Figura 13: Rugosímetro durante medição: (a) gráfico gerado durante o ensaio; (b) resultado da rugosidade encontrada.....	55
Figura 14: Corpos de prova montados em gancheiras apropriadas.....	56
Figura 15: Peças imergidas no banho de cromo.....	56
Figura 16: Controles de parâmetros: (a) Painel com voltagem e amperagem aplicadas durante o processo de cromagem dos corpos de prova; (b) Medição da temperatura do tanque durante a cromagem.....	57
Figura 17: Enxágue dos corpos de prova após cromagem.....	58
Figura 18: Acabamento final dos corpos de prova no torno polidor.....	58
Figura 19: Isolamento dos corpos de prova com fita isolante e colocação do fio de nylon.....	60
Figura 20: Câmara de <i>Salt Spray</i> BASS USP-00 utilizada para os ensaios.....	60
Figura 21: Disposição dos corpos de prova na câmara para iniciar o ensaio.....	61

Figura 22: Registro fotográfico inicial dos corpos de prova da primeira parte do trabalho.....	61
Figura 23: Registro fotográfico inicial dos corpos de prova da segunda parte do trabalho.....	62
Figura 24: Registros fotográficos final dos corpos de prova TCC 02 e TCC 03 da primeira parte do trabalho após 72 horas de exposição ao ensaio de névoa salina.....	64
Figura 25: Registro fotográfico final dos corpos de prova TCC 01 e TCC 04 da primeira parte do trabalho, após 96 horas de exposição ao ensaio de névoa salina.....	65
Figura 26: Perfil de irregularidades de superfície.....	66
Figura 27: Ilustração do parâmetro de rugosidade Ra.....	67
Figura 28: Registro fotográfico final dos corpos de prova TCC 06 da segunda parte do trabalho, após 168 horas de exposição ao ensaio de névoa salina.....	71
Figura 29: Registro fotográfico final dos corpos de prova TCC 05 da segunda parte do trabalho, após 216 horas de exposição ao ensaio de névoa salina.....	72
Figura 30: Gráfico da relação entre a rugosidade dos corpos de prova com diferente preparação da superfície e tempo de resistência à corrosão.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades físico-químicas do cromo e seus compostos.....	21
Tabela 2: Comprimento da amostragem (<i>cut-off</i>) conforme tipo de perfis.....	35
Tabela 3: Limites máximos de contaminantes em processos de cromagem.....	44
Tabela 4: Dados iniciais e finais de alguns parâmetros medidos nos corpos de prova destinados ao ensaio de névoa salina na primeira parte do trabalho.....	66
Tabela 5: Dados iniciais e finais de alguns parâmetros medidos nos corpos de prova destinados ao ensaio de névoa salina na segunda parte do trabalho.....	70

LISTA DE SÍMBOLOS

A = área

α = fração da barreira de energia de ativação para o processo catódico

ASTM = American Society for Testing and Materials

C_o^α = concentração na solução

D_o = coeficiente de difusão

δ = espessura da camada de difusão

e^- = elétron

E_{apl} = potencial aplicado

E_{equil} = potencial de equilíbrio

F = constante de Faraday

h = hora

h = altura do pico a partir da linha média

HV = dureza Vickers

i_c = densidade de corrente catódica

i_{lim} = densidade de corrente limite

i_o = densidade de corrente de troca

l_m = comprimento médio

M_i = massa inicial antes do ensaio

M_f = massa final após o ensaio

M^{n+} = cátion metálico

n = número de elétrons

η_c = sobrepotencial catódico

PVC = policloreto de vinila

R = constante universal dos gases

R_a = parâmetro de rugosidade aritmético

R_q = desvio padrão médio quadrático das distâncias verticais em um perfil de rugosidade

R_t = parâmetro de rugosidade máxima total

R_z = parâmetro de rugosidade de profundidade média

SAE = Society of Automotive Engineers (USA)

T = temperatura absoluta

TCC 01 a 06 = corpos de prova com diferentes tratamentos de superfície

TQ 1 = tanque de eletrodeposição

UCS = Universidade de Caxias do Sul

UFRGS = Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
3 PROPOSTA TECNOLÓGICA	15
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
4.1 Galvanoplastia	16
4.1.1 Princípio da deposição metálica	16
4.1.2 Fatores que influenciam a eletrodeposição	17
4.2 Cromo	18
4.2.1 Propriedades Gerais	18
4.2.2 Toxicidade	19
4.3 Estrutura industrial para processo de cromagem	20
4.3.1 Tanques	21
4.3.2 Gancheiras e barramentos	21
4.3.3 Resistências	22
4.3.4 Ânodos	22
4.3.5 Exaustão	23
4.3.6 Retificadores de corrente	23
4.4 Preparação da superfície	23
4.4.1 Preparação mecânica	24
4.4.2 Usinagem	25
4.4.3 Retífica	25
4.4.4 Rebolos	26
4.4.5 Polimento	26
4.4.6 Rodas para polir	27
4.4.7 Jateamento	27

4.4.8 Esmerilhamento	28
4.4.9 Rugosidade	28
4.4.10 Parâmetro de rugosidade média Ra	29
4.4.11 Parâmetro de rugosidade de profundidade média Rz	29
4.4.12 Parâmetro de rugosidade Rt.....	30
4.4.13 Parâmetro de rugosidade Rq.....	30
4.4.14 Pré-tratamento químico e eletroquímico	30
4.4.15 Decapagem química.....	30
4.4.16 Decapagem com ácido clorídrico	31
4.4.17 Decapagem com ácido sulfúrico.....	31
4.4.18 Função do inibidor.....	32
4.4.19 Decapantes alcalinos.....	32
4.4.20 Desengraxante.....	32
4.4.21 Pré-tratamento eletrolítico	33
4.5 Eletrodeposição de cromo.....	33
4.5.1 Reações químicas da preparação do banho.....	33
4.5.2 Reações no cátodo	34
4.5.3 Reações no ânodo	34
4.5.4 Composição do banho de cromo.....	34
4.5.5 Contaminantes do banho de cromo.....	35
4.5.6 Cromo trivalente	36
4.5.7 Formas de minimizar os contaminantes nos banhos.....	37
4.5.8 Corrente elétrica.....	37
4.5.9 Características dos banhos de cromo duro.....	37
4.6 Controle de qualidade dos banhos	38
5 SITUAÇÃO ATUAL	39
6 METODOLOGIA	41

6.1	Corpos de prova	41
6.2	Preparação dos corpos de prova	42
6.2.1	Rugosidade Superficial	44
6.3	Cromagem dos corpos de prova	45
6.4	Acabamento Final	47
6.5	Preparação dos corpos de prova e ensaio de Névoa Salina (<i>Salt Spray</i>)	47
6.5.1	Ensaio de Névoa Salina (<i>Salt Spray</i>)	47
6.5.2	Preparação dos corpos de prova	48
6.5.3	Câmara de <i>Salt Spray</i>	48
6.5.4	Registros dos corpos de prova	49
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
7.1	Primeira parte: TCC 01, TCC 02, TCC 03 e TCC 04.....	51
7.2	Segunda parte: TCC 05 e TCC 06	56
7.3	Protocolo de preparação de barras SAE 1045	59
8	AVALIAÇÃO DE CUSTOS	61
9	CONCLUSÃO	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1 INTRODUÇÃO

O Cromo, elemento químico metálico bastante conhecido como componente de aços inoxidáveis e aços ligas para beneficiamento, é também um dos poucos metais que podem ser depositados eletroliticamente, com alta dureza, a partir de soluções aquosas de seus íons. Cromo Duro é o termo que descreve eletrodepósitos de cromo com espessuras superiores a 2,5 μm . Camadas de cromo duro podem ser industrialmente obtidas com dureza desde 600 até 1.400 HV. Uma propriedade muito importante do Cr é a resistência à corrosão e, embora ele seja menos nobre que o Fe, protege o Fe, catodicamente. O sucesso de seu emprego, e consequente difusão em aplicações industriais pode ser atribuído à combinação de propriedades ainda não encontradas em outro material a nível comercial: alta dureza, boa adesão e grande resistência à corrosão.

Devido ao seu baixo poder de cobertura, o cromo duro não se deposita em poros, trincas ou pequenos defeitos de superfície. A adesão do revestimento de cromo ao substrato metálico é influenciada por diversos fatores, como a condição do substrato, a rugosidade, a limpeza e a temperatura durante o processo de eletrodeposição. Por isso, para a obtenção de um material com boa qualidade de cobertura eletrodepositada e que atenda às propriedades desejadas, é preciso que a superfície esteja isenta de defeitos, limpa e o mais homogênea possível. Dependendo da função industrial que o material cromado irá exercer, será determinada a melhor otimização do serviço, atendendo às exigências de especificação: camada, rugosidade final, resistência, entre outras.

Grande exigência de mercado das indústrias de inúmeras áreas como: metal-mecânica, papel e celulose, petroquímica, e demais áreas que utilizam a eletrodeposição de cromo em seus equipamentos ou peças, é a realização de ensaio de névoa salina. A exigência mínima feita demanda a validação dos processos periodicamente. O ensaio de névoa salina (*Salt Spray*) para avaliação de revestimentos protetores aplicados sobre superfícies metálicas é normatizado como ASTM B 117. Neste ensaio, os corpos de prova são expostos a uma névoa salina contínua, cuja composição corresponde a 5% (em massa) de cloreto de sódio (NaCl), à temperatura de 35 °C. O teste de pulverização de sal não reproduz as verdadeiras condições do serviço, mas é usada para simular condições ambientais agressivas de oxidação, como serviços marítimos. Este ensaio oferece inúmeras vantagens e, entre elas, o fato de ser multi material, isto é, pode avaliar diferentes matérias-primas e revestimentos.

A proposta deste trabalho está embasada no problema de não atendimento da especificação em produtos de cromados à base de aço SAE 1045. Atualmente, a indústria não

consegue atender a exigência de no mínimo 96 horas de resistência à corrosão em ensaio de névoa salina nessas peças. A melhora desta resistência está diretamente relacionada as condições de preparação das peças antes da etapa de cromagem. Este trabalho objetiva avaliar os parâmetros operacionais da preparação das peças e propor a metodologia adequada para essa etapa alcançando as exigências desses clientes.

Para a realização deste trabalho foram utilizados corpos de prova retirados de uma barra de aço SAE 1045 para a realização dos processos em fábrica, estudando as variações na etapa de preparação e mantendo demais parâmetros sem alteração. Para validação da exigência de *salt spray*, é utilizada uma câmara de névoa salina da marca BASS modelo USP-00, onde é possível realizar todos os ensaios, segundo a norma ASTM B-117.

Para este propósito, é necessário validar os resultados obtidos por comparação dos dados de parâmetros do processo realizado e os resultados do ensaio de névoa salina, podendo propor a melhor metodologia para preparação do aço.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é verificar a influência da preparação da superfície das barras de SAE 1045 frente à resistência a corrosão em ensaio de névoa salina. Uma vez identificado essa influência, também é objetivo propor uma metodologia de preparação para esses materiais.

O objetivo geral será alcançado através dos seguintes objetivos parciais:

- a) Investigar diferentes formas de tratamento da superfície do aço SAE 1045 e verificar a influência no tempo de ensaio em câmara de névoa salina;
- b) Avaliar a rugosidade das amostras após diferentes metodologias de polimento e verificar sua influência no tempo em câmara de névoa salina;
- c) Eletrodepositar cromo nas amostras e avaliar a influência da preparação da superfície na perda de massa durante o ensaio em névoa salina;
- d) Verificar o melhor resultado em tempo de permanência na câmara de névoa salina;
- e) Propor um protocolo de preparação da superfície do aço SAE 1045 em função dos resultados obtidos.

3 PROPOSTA TECNOLÓGICA

Com a alta do dólar e variação cambial ao longo dos anos, o mercado nacional sinalizou um novo nicho de mercado para peças de aço SAE 1045 cromadas, que antes eram importadas pelas empresas metal-mecânicas brasileiras.

O sucesso do emprego do cromo duro, e consequente difusão em aplicações industriais, pode ser atribuído à combinação de propriedades ainda não encontradas em outro material a nível comercial: alta dureza, boa adesão e grande resistência à corrosão. Devido ao seu baixo poder de cobertura, o cromo duro não se deposita em poros, trincas ou pequenos defeitos de superfície. Por isso é desejável que a superfície esteja perfeitamente lisa e isenta de defeitos, o que exige trabalhos de retificação e polimento prévio, garantindo um revestimento excelente. Eventuais poros ou defeitos não eliminados durante retificação e polimento preparatórios não serão cobertos pelo depósito, originando áreas desprotegidas que levam à corrosão galvânica, devido à diferença de potencial entre o metal base e o revestimento.

O ensaio de névoa salina (*Salt Spray*) para avaliação de revestimentos protetores aplicados sobre superfícies metálicas é normatizado como ASTM B 117. Em termos de questões técnicas, os requisitos especificados pelos clientes de barras englobam *salt spray* de 96 horas, o que mostra ser um grande desafio. Ao longo dos anos, as empresas de cromagem têm alterado parâmetros das etapas de preparação, cromagem, camada depositada, etapas dos acabamentos, tentando alcançar o objetivo de atingir mais horas de *salt spray*.

A proposta tecnológica deste trabalho é pesquisar a influência da preparação da superfície da barra SAE 1045 com o objetivo de atender o requisito de especificação do produto final, que prevê 96 horas de *salt spray*.

Como resultado, será determinado o melhor método de preparação de barras de aço SAE 1045 para revestimento de cromo duro por eletrodeposição, a fim de obter o mínimo de 96 horas de exposição em névoa salina sem ocorrência de oxidação. Com esses resultados, é esperado o atendimento de especificação do produto final, atendendo a demanda de mercado.

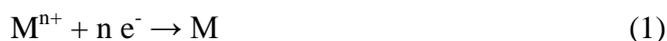
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Galvanoplastia

Galvanoplastia é o processo de revestimento por deposição de um metal sobre uma superfície metálica ou plástica, através de um processo eletrolítico. Consiste na imersão da peça em uma solução contendo os íons do metal a ser depositado, e a imposição de uma corrente elétrica para obter a camada desejada. Esse processo pode ter vários objetivos, como proteger a peça de metal da corrosão, conferir acabamento estético ou decorativo e aumentar a durabilidade e melhoramento de propriedades superficiais [1, 2].

4.1.1 Princípio da deposição metálica

A deposição metálica a partir de uma solução aquosa de seus íons pode ser representada, de uma forma geral, pela equação [2]:



Os cátions metálicos em solução, por aplicação de um potencial ou passagem de corrente, são reduzidos e eletrodepositados sobre a peça metálica, que atua como cátodo no processo eletrolítico.

Os elétrons necessários para a redução dos íons metálicos podem ser obtidos de diferentes maneiras, diferenciando os diversos processos de deposição a partir de soluções aquosas. A deposição pode ocorrer com ou sem fonte externa de eletricidade.

A eletrodeposição de metais é baseada em fenômenos eletroquímicos. Durante a eletrólise, acontecem transformações químicas nas superfícies, na interface eletrodo/eletrólito, os quais consomem (redução) elétrons ou fornecem (oxidação) elétrons. A aplicação de uma corrente contínua é necessária para que as reações se realizem no sentido desejado. Os elétrons são retirados do ânodo e transferidos para o cátodo. A reação que ocorre no ânodo gera íons metálicos em solução ou oxidação do solvente, normalmente água. No ânodo, a reação eletroquímica fornece elétrons, que reagem com íons metálicos contidos no eletrólito, originando os átomos metálicos [1, 2].

Já na deposição metálica sem fonte elétrica externa, os elétrons necessários para a redução de íons metálicos são produzidos diretamente na solução, por meio de reação química. Para isso, existem três diferentes possibilidades:

- Deposição por inversão de carga: o metal que recebe o revestimento deve ser menos nobre que o depositado.
- Deposição por contato: são utilizados o metal a ser protegido, aquele a ser depositado e o que fornece elétrons.
- Deposição por redução: o metal redutor é oxidado e os elétrons liberados servem para a redução de íons metálicos, onde ocorre a troca de elétrons entre o composto químico e um metal.

4.1.2 Fatores que influenciam a eletrodeposição

A quantidade de camada metálica depositada sobre uma superfície depende de muitos fatores, entre eles a densidade de corrente (A/dm^2). Para uma deposição mais rápida, é importante utilizar uma densidade de corrente alta, mas, com uma densidade de corrente catódica mais baixa, são obtidos depósitos mais uniformes e, em alguns casos, menos porosos. Para cada solução eletrolítica contida nos tanques de eletrodeposição é necessária a aplicação de uma diferença de potencial específica. Normalmente, uma diferença de potencial mais alta é necessária para superar o sobrepotencial inicial do processo, mas diversas condições físicas e químicas contribuem para a boa qualidade da deposição. Os banhos normalmente funcionam com controle de alguns fatores [2-8]:

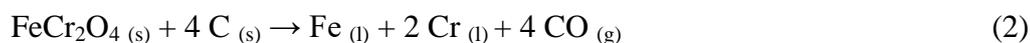
- Temperatura acima de $40^{\circ}C$ – contribui para o aumento da condutividade da solução, permitindo o uso de densidade de corrente mais alta.
- Alta concentração dos eletrólitos – o aumento da atividade dos íons conduz a um aumento da condutividade e diminui a sobre tensão catódica.
- Agitação - permite a homogeneização de solução, reduzindo a polarização de concentração, levando a obtenção de densidades de correntes mais altas com potenciais iguais.

Os banhos contêm, em sua composição, aditivos como abrillantadores, niveladores e tensoativos, pois possuem ação umectante, favorecendo a penetração da solução nas microporosidades do metal base. Esses aditivos contribuem para a melhoria da qualidade da deposição metálica. Alguns aditivos evitam a formação de filmes passivadores sobre o ânodo, já que os filmes impedem a dissolução homogênea do eletrodo, provocando a produção de gases indesejáveis.

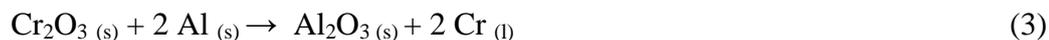
4.2 Cromo

4.2.1 Propriedades Gerais

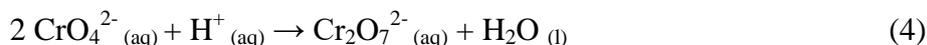
O cromo (Cr) é um metal cinza, brilhante, sem odor, com forma cristalina cúbica e resistente à corrosão. O nome é originado do grego e significado “cor”, devido à coloração de seus compostos. O metal não é encontrado livre na natureza, mas obtido a partir do mineral *cromita* (FeCr_2O_4) por redução com carbono em um forno de arco elétrico [7]:



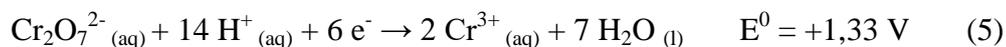
Uma fonte menos abundante é o mineral verde *ocre de cromo* (Cr_2O_3), que é reduzido pelo alumínio no processo *termita*:



O cromato de sódio, Na_2CrO_4 , um sólido amarelo, é a fonte da maior parte dos outros compostos de cromo, incluindo fungicidas, pigmentos e esmaltes cerâmicos. O íon cromato produz o íon dicromato, $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, de cor laranja, na presença de ácido.



A forma original do cromo é cúbica de corpo centrado, havendo uma transição para a estrutura cúbica de face centrada a cerca de 1840 °C. O cromo é uma mistura de quatro isótopos estáveis de números de massas ^{50}Cr (4,31%), ^{52}Cr (83,76%), ^{53}Cr (9,55%) e ^{54}Cr (2,38%). Existem cinco isótopos radiativos: 48 (tempo de meia vida = 23-24 horas), 49 (tempo de meia vida = 41,7-41,9 minutos), 51 (tempo de meia vida = 27,5-27,9 dias), 55 (tempo de meia vida = 3,52-3,6 minutos), 56 (tempo de meia vida = 5,9 minutos). O cromo ocorre nos estados de oxidação de -2 a +6, porém somente o Cr^0 , Cr (II), Cr (III) e Cr (VI) são os mais comuns. A forma bivalente é facilmente oxidada à forma trivalente pelo ar. Apenas a forma tri (+3) e a hexa (+6) são as mais estáveis no ambiente, além da forma elementar, aparecendo na composição de óxidos, sulfatos, cromatos, dicromatos, sais básicos recobrendo peças metálicas e plásticas nos processos de tratamento de superfícies. A relação entre os estados hexavalente e trivalente do cromo é descrita pela reação:



A diferença de potencial entre os dois estados reflete a propriedade oxidante do cromo hexavalente e a substancial energia necessária para oxidar a forma trivalente à hexavalente.

A Tabela 1 apresenta as principais propriedades físico-químicas do cromo e seus compostos.

Tabela 1: Propriedades físico-químicas do cromo e seus compostos [7].

Propriedades físico-químicas	Cromo Metálico	Ácido crômico	Cromato de sódio	Óxido de cromo III
Família Química	Cromo elemento	Óxido metálico	Sal de cromato	Composto de cromo (III) e óxido
Fórmula Molecular	Cr	CrO ₃	Na ₂ CrO ₄	Cr ₂ O ₃
Massa Molecular (g/mol)	51,996	100,00	161,97	151,99
Ponto de Fusão (°C)	1.900	197	NA	2.435
Ponto de Ebulição (°C)	2.672	250	792	3.000
Solubilidade em H ₂ O	Insolúvel	63g/100ml de H ₂ O	Parcialmente solúvel	Insolúvel
Solubilidade em outros líquidos	Solúvel em ácido nítrico concentrado	Solúvel em etanol, éter etílico, ácidos sulfúrico e nítrico	Parcialmente solúvel em metanol	Solúvel em ácidos e bases concentrados

4.2.2 Toxicidade

O cromo está incluído entre os metais reconhecidamente tóxicos e perigosos para a vida humana e para o meio ambiente. A toxicidade do cromo depende do seu estado de oxidação, sendo o cromo hexavalente de maior toxicidade que o cromo trivalente. Um dos fatores que contribui para esta elevada toxicidade é a grande habilidade do cromo (VI) em penetrar nas células, em comparação com o cromo (III). O cromo (VI) pode existir como ânion cromato tetraédrico em pH fisiológico, e é semelhante a outros ânions naturais como sulfato e fosfato, permeáveis através dos canais da membrana celular. O cromo (III), entretanto, forma complexos octaédricos e não pode penetrar facilmente através daqueles canais. Portanto, a baixa toxicidade do cromo (III) se deve, em parte, a esta dificuldade de penetração celular. A redução extracelular do cromo (VI) a cromo (III) diminui a penetração

intracelular do cromo, reduzindo assim a sua toxicidade. A baixa solubilidade e mobilidade do cromo (III) são os principais fatores de sua baixa toxicidade [8-9].

Os compostos de cromo hexavalente como cromatos, dicromatos e particularmente o ácido crômico são irritantes para a pele e membrana da mucosa, são extremamente tóxicos e a ingestão de pequenas quantidades pode ser fatal. Não existem evidências que compostos de cromo trivalente causem algum efeito tóxico. O cromo trivalente parece ser essencial como elemento traço no metabolismo dos mamíferos, agindo na ativação da insulina. A sua falta pode causar uma diminuição da tolerância de glicose no sangue, algumas formas de diabetes e doenças cardiovasculares.

As doenças relacionadas ao cromo e seus compostos: neoplasia maligna dos brônquios e do pulmão, outras rinites alérgicas, rinite crônica, ulceração ou necrose do septo nasal, asma, dermatoses pápulo-pustulosas e suas complicações infecciosas, dermatite alérgica de contato, dermatite de contato por produtos irritantes, úlcera crônica de pele não classificada em outra parte e efeitos tóxicos agudos. A principal via de exposição da população em geral é a ingestão de alimentos e água, enquanto na exposição ocupacional é a inalação, também podendo ocorrer dermatites por contato [8].

A Agência Internacional de Investigação de Câncer (International Agency for Research on Cancer - IARC) determinou que os compostos de Cromo (VI) são cancerígenos para os seres humanos. Nos trabalhadores, a inalação de cromo (VI) demonstrou causar câncer de pulmão. Resultados mistos foram encontrados nos estudos de populações que vivem em área com alto nível de cromo (VI) na água potável. Em animais de laboratório, ficou demonstrado que os compostos de cromo (VI) causam tumores no estômago, trato intestinal e pulmão.

As empresas devem estar atentas à legislação trabalhista e ambiental. Segundo a Resolução do Conama n° 397/2008 [9] que dispõe sobre a fixação de padrões de emissão de efluentes para fontes de emissão que lancem seus efluentes em águas superficiais no estado do Rio Grande do Sul, regulamenta através do Art. 10 que o padrão máximo de emissão de cromo hexavalente é de $0,1 \text{ mg L}^{-1}$. Nesta Resolução existe a obrigatoriedade das indústrias manterem instalações de tratamento de efluentes com a mínima tecnologia capaz de atingir os padrões exigidos pela legislação.

4.3 Estrutura industrial para processo de cromagem

O tamanho, a quantidade e a forma das peças é que determinará o tipo mais adequado de instalação industrial para o processo de cromagem por eletrodeposição [3-6].

4.3.1 Tanques

O material de construção dos tanques deve atender especialmente aos requisitos de resistência aos choques térmicos e mecânicos, ou seja, temperatura, pressão e produtos agressivos utilizados no processo galvânico. O material geralmente utilizado é o policloreto de vinila (PVC).

4.3.2 Gancheiras e barramentos

A utilização correta dos dispositivos para a colocação de peças fixadas ou penduradas é de suma importância. As gancheiras devem ser bem dimensionadas para a obtenção de uma boa distribuição das peças a serem cromadas e variam de acordo com os diferentes tipos de peças. As condições necessárias para a fixação das peças a serem cromadas nos dispositivos são:

- A seção transversal e a construção das peças precisam ser escolhidas de tal forma que cada peça receba as mesmas tensões e densidade de corrente.
- A fixação das peças precisa permitir o transporte do dispositivo, de modo que não caiam no banho durante a movimentação do eletrólito ou delas mesmas.
- O material de que é feita a gancheira, em relação à seção transversal precisa permitir a passagem de corrente sem que haja perdas.

A forma das gancheiras para eletrólitos brilhantes e de grande capacidade, com altas densidades de correntes, como nos processos de cromagem, é de suma importância. Para efeito de cálculo para dimensionamento das gancheiras, a densidade de corrente para banhos de cromo duro é de 55 A/dm^2 . O material mais indicado é o cobre com o revestimento de plastisol, pois o cobre suporta cargas contínuas maiores. O perfeito contato entre as peças/gancheiras/barramentos deve ser garantido para evitar problemas de passivação e falta de penetração. Os contatos são garantidos pelo adequado dimensionamento das gancheiras e barramentos e pela sua limpeza. Os locais dos barramentos e/ou gancheiras que não são utilizados para dar contato devem ser isolados com revestimento de materiais anticorrosivos, fitas adesivas, materiais plásticos ou tintas especiais, resistentes à ação química e à

temperatura. Os barramentos devem ser fabricados tanto para suportar o fluxo de corrente, como o peso dos ânodos e das peças.

4.3.3 Resistências

O aquecimento do banho de eletrodeposição é feito através de resistências, que deverão ser protegidas contra o ataque químico. Normalmente é utilizada resistência elétrica de chumbo, mas, para banhos catalisados, é utilizada resistência elétrica de aço inox com revestimento em Teflon.

4.3.4 Ânodos

Os banhos de cromo trabalham com ânodos insolúveis constituídos de ligas de chumbo. Ânodos de chumbo puros são atacados pela solução, causando a formação de lodo de cromato de chumbo. Os ânodos de liga de chumbo são preferíveis ao chumbo puro porque tem maior resistência mecânica e à corrosão.

Tipicamente é utilizada uma liga de 93% de chumbo e 7% de estanho. Os ânodos de estanho-chumbo têm melhor condutividade e duram mais tempo, porém os ânodos de antimônio-chumbo são mais rígidos. A resistência do chumbo antimonioso à dissolução pelo ácido crômico aumenta com o conteúdo em antimônio. Para um máximo de condutividade, os ânodos devem adotar a forma de chapas onduladas com ganchos de sustentação de cobre ou latão. É importante usar ânodos suficientemente grossos e um número suficientemente grande deles para conduzir as altas correntes necessárias.

Quando os ânodos ficam no eletrólito durante um longo tempo em circuito aberto, ficam cobertos com cromato de chumbo, como resultado do ataque pelo ácido crômico. Essa camada não é condutora e deve ser removida por raspagem com escova de aço.

Geralmente são utilizados ânodos em forma de fitas com 50 mm de largura e 3 a 5 mm de espessura. Para obter melhor contato com o trilho anódico, um fio de cobre é soldado ao ânodo, bem distanciado do eletrólito, por intermédio do qual se dá o fornecimento de energia. Isso é importante na cromagem dura, onde são usadas continuamente altas densidades de corrente.

4.3.5 Exaustão

Devido às altas densidades de corrente e ao forte desenvolvimento de hidrogênio e oxigênio em função da baixa eficiência catódica da solução, há a formação de uma névoa ao redor do banho. Os tanques devem possuir exaustores ao redor de todo o banho. Os eletrólitos desprendem vapores venenosos e precisam, por essa razão, ser eliminados. Os gases de exaustão deverão sofrer tratamento adequado, todos os gases sugados pelos exaustores são levados para os lavadores de gases antes de serem lançados para a atmosfera. Evidentemente, toda a instalação de exaustão deverá ser construída com um material resistente ao ácido crômico como PVC. A capacidade de sucção deverá ser bem dimensionada.

4.3.6 Retificadores de corrente

São usados retificadores, principalmente para o suprimento de energia de banhos galvânicos, e são fornecidos para a transformação de corrente alternada de uma ou mais fases para corrente contínua. A tensão do circuito é transformada em tensão galvânica através de um transformador que depois é retificado. Sendo aparelhos refrigerados a ar, devem ficar localizados em ambientes separados, porém o mais perto possível devido à resistência interna e ao custo dos barramentos. Em caso de aparelhos refrigerados a óleo, poderão ficar no mesmo ambiente dos tanques, pois todas as partes internas são envolvidas por camadas de óleo e, conseqüentemente, protegidas contra a atmosfera galvânica.

4.4 Preparação da superfície

A eficiência do revestimento ou recobrimento protetor depende do preparo da superfície receptora. A preparação das superfícies é condição essencial para a obtenção de um revestimento perfeito, uma vez que a maioria dos defeitos que aparecem durante a operação de revestimento é devido a um tratamento preliminar deficiente. Uma superfície bem limpa, livre de ferrugem, graxa, sujidades e umidade são tidas como o melhor substrato a um bom recobrimento protetor ou decorativo. Contudo, não existe um tratamento preparatório de superfícies de caráter universal. São diversas as variáveis, entre elas, o tipo de substrato, o fim a que se destina, condições econômicas, além da quantidade e qualidade das impurezas ou sujidades, a serem removidas. Não existe uma condição ideal e sim a melhor condição para

uma determinada finalidade, de forma a garantir a eficiência do tratamento de proteção e sua durabilidade [10-16].

A superfície a ser cromada deve, preferencialmente, ser uniforme, isenta de poros, riscos, batidas, manchas de oxidação, riscos provenientes da usinagem e trincas. O cromo duro não produz nivelamento das superfícies que apresentem esses defeitos. Desta forma, se numa peça houver porosidade e ela ser cromada, os poros permanecerão. Isso deve ser evitado, uma vez que o cromo duro se comporta como um revestimento catódico em relação ao ferro. Na presença de umidade, o ferro e o cromo formam um par galvânico com a oxidação do ferro, ocasionando o empolamento da camada de cromo e, em pouco tempo, a destruição do metal base (ferro).

A preparação da peça, também chamada de pré-tratamento, é uma das etapas que antecede a eletrodeposição de metais, podendo ser classificada em preparação mecânica e pré-tratamento químico, que são as etapas responsáveis por retirar as imperfeições e materiais aderidos à superfície das peças. Na preparação das superfícies são utilizados métodos físicos, químicos e eletroquímicos ou mistos para atingir as características adequadas ao sucesso dos tratamentos posteriores.

As operações, como por exemplo, o desengraxe e a decapagem, são praticadas quando se pretende remover camada de sujidade e matéria orgânica, de modo a melhorar a aderência do revestimento na superfície da peça; ou em uma transformação subsequente, como o polimento, quando se pretende reduzir a rugosidade da peça, ou ainda, quando se pretende proteger a peça entre as etapas de fabricação distintas (proteção temporária).

A preparação inicial das superfícies pode ser feita por diferentes tipos de processos, como mecânico, químico e eletrolítico.

4.4.1 Preparação mecânica

O tratamento de superfície através de ferramentas manuais e mecânicas é um procedimento antigo, aplicável a grande parte dos trabalhos de preparação de superfície [16, 18].

A preparação mecânica das peças consiste na eliminação das irregularidades e asperezas da superfície. Essa etapa objetiva a regularização da superfície utilizando processos mecânicos. A reação do metal com os constituintes da atmosfera, como água e oxigênio, forma filmes de óxidos metálicos que devem ser removidos antes da etapa de eletrodeposição. Basicamente é o atrito que caracteriza esse processo, desde a remoção do metal, como para

adquirir um padrão uniforme de riscos cada vez menores até o ponto em que os riscos são preenchidos pelas minúsculas rebarbas e repuxados para dentro dos sulcos que lhe deram origem. O processo de preparação desempenha papel importante na qualidade final da superfície revestida.

A superfície a ser cromada deve ser uniforme, isenta de poros, riscos, depressões, manchas de oxidação, microtrincas, em acordo com a ASTM-B650 e a ASTM-B177. Grande parte dessas imperfeições pode permitir a ocorrência de corrosão galvânica na superfície, caso não sejam eliminadas na etapa que antecede a cromação.

Existem inúmeros abrasivos, sendo os mais importantes: óxido de alumínio, carvão de silício, silicato de alumínio, óxido de ferro, óxido de cromo. Esses abrasivos utilizados são atritados contra a superfície que devem beneficiar em várias formas de agregação, tais como:

- Integrantes em rebolos rígidos ou colocados sobre panos, papéis ou rodas;
- Componentes em massas de polimento;
- Abrasivos para escoamento, esmerilhamento.

A quantidade de operações unitárias, bem como suas sequências, dependerá de variáveis como o tipo de substrato, metal a ser depositado e condições que a superfície se encontra. Além das operações citadas a seguir, podem existir diversas outras tecnologias para serem utilizadas nessa etapa. Durante as operações devem ser considerados parâmetros como a espessura de camada a depositar e a rugosidade desejada.

4.4.2 Usinagem

A máquinas utilizadas na usinagem trabalham com rebolos, ferramentas e lixas para remover quantidades substanciais de metal das peças, de 3 ou 4 centímetros, eliminando óxidos de sua superfície.

4.4.3 Retífica

A finalidade da retífica é a mesma da usinagem, porém, é usado o rebolo para a remoção de revestimentos com 1 ou 2 mm de espessura. A operação de retificação deve ser feita respeitando os parâmetros característicos do processo, tais como: tipo de rebolo, rotação da peça e do rebolo, profundidade do corte, avanço e refrigeração.

A retificação preparatória, quando mal conduzida, pode produzir alterações indesejadas no metal base, como: superfície irregular devido à vibração, queima de superfície,

microtrincas, redução na dureza do metal base devido a altas temperaturas alcançadas (excesso de avanço ou falta de refrigeração).

4.4.4 Rebolos

Rebolo é a ferramenta utilizada na retificação de peças. Constituída por um corpo, em geral cilíndrico, formado por aglomerados, cuja função é reunir os inúmeros e pequenos grãos abrasivos, que irão entrar em contato com a peça e realizar a usinagem (Figura 1).

Figura 1: Rebolos de diferentes abrasivos.



Fonte: Sulcromo

4.4.5 Polimento

O processo de polimento é um processo de abrasão para remover linhas dos processos de usinagem ou retífica, e também acabamento brilhoso. Pode utilizar lixas (correia abrasiva) ou com roda de tecido a qual é ligado um meio abrasivo apropriado. Este processo permite desde o desgaste grosseiro até o polimento das superfícies, pela substituição sucessiva das lixas de maior granulometria para as de menor.

As lixas possuem três componentes: costado, grão abrasivo e adesivo. As lixas utilizadas são comumente de abrasivo de carbetto de silício ou óxido de alumínio, com tamanhos de grão variáveis. As granulações podem variar de #40 até #1200, onde a granulometria menor é utilizada para maior remoção de material e as maiores para acabamento brilhoso e diminuição de rugosidade. O lixamento mais usual é com lixas à prova de água, que não se desmancham quando molhadas e representam um meio de acabamento rápido. Os movimentos de lixamento devem ser circulares e devem cobrir toda a superfície.

Os métodos utilizados possuem como objetivos diminuir a rugosidade superficial, melhorar as propriedades para a função específica e dar brilho, como no caso dos aços inoxidáveis. Existem diversos formatos de lixas: cinta, rolos, discos, folhas, cones, tubos e outros, como mostrado na Figura 2.

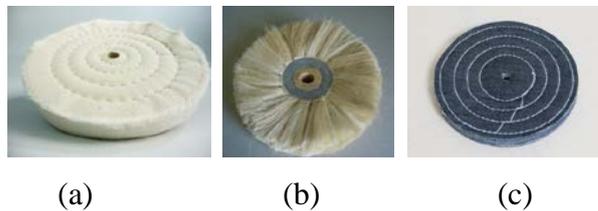
Figura 2: Tipos de lixas.

Fonte: Sulcromo

4.4.6 Rodas para polir

Para uma superfície mais brilhosa deve ser feito o alto polimento, onde é comum a utilização de rodas, cuja face se reveste com abrasivos de uma determinada granulometria. O alto polimento visa remover os últimos traços do polimento prévio. Não há necessidade de forte abrasão, assim os abrasivos são muito finos e variam de acordo com o metal a polir.

As rodas podem ser de feltro, sisal ou pano (Figura 3). É utilizado massa de polimento, colocada em contato com as rodas, enquanto giram. As massas são constituídas de sebo, cera estearina, parafina, entre outros materiais, que se misturam por fusão controlada, incorporando o abrasivo (Figura 4).

Figura 3: Tipos de rodas de polimento: (a) feltro, (b) sisal e (c) pano.

(a)

(b)

(c)

Figura 4: Tipo de massas de polimento.

Fonte: Sulcromo

4.4.7 Jateamento

Remove a carepa, óxidos e cascas de fundição por efeito do impacto de areia ou esferas de aço sobre a peça a limpar. A areia é impulsionada por ar comprimido. O efeito de impacto pode também ser alcançado por centrifugação e jato turbulento.

Entre as aplicações de jateamento, as mais importantes são: limpeza, acabamento, desrebarbamento e gravação. Inicialmente era utilizada areia, porém, devido aos problemas pulmonares provocados por esse material, outros produtos granulados começaram a ser utilizados, como o óxido de alumínio, as granalhas de aço, materiais de origem orgânica (ossos de peixe, cascas de noz) e, mais revolucionário, as esferas de vidro.

4.4.8 Esmerilhamento

Essa operação é utilizada para acabamentos em peças fundidas e soldadas. Muitas vezes as peças fundidas apresentam rebarbas, em função do fechamento dos moldes ou das folgas existentes entre as marcações de machos e moldes.

4.4.9 Rugosidade

Observando-se em detalhes, as superfícies de peças apresentam irregularidades. Estas irregularidades são provocadas por sulcos ou marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre a superfície da peça. A rugosidade (erros microgeométricos) é o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências (picos) e reentrâncias (vales) que caracterizam uma superfície. Essas irregularidades podem ser avaliadas com aparelhos eletrônicos, por exemplo, o rugosímetro (Figura 5). O rugosímetro é um relógio comparador com uma agulha, uma base de seção circular plana e um corte nessa base para visualizar a agulha [10-18].

Figura 5: Rugosímetro – aparelho para medição de rugosidade superficial.



No Brasil, os conceitos de rugosidade superficial são definidos pela norma ABNT NBR ISO 4288:2002. A rugosidade superficial é função do tipo de acabamento, da máquina-ferramenta ou do processo de fabricação utilizado. O acabamento superficial é medido através da rugosidade superficial, a qual é expressa em micron (mm ou μm).

A avaliação da rugosidade de uma superfície não é a medição do perfil, mas sim a atribuição de um valor numérico, um parâmetro, que irá fornecer uma informação expressiva e aceitável a respeito dessa superfície. De acordo com a norma, primeiramente, deve-se classificar a superfície com perfil periódico ou aperiódico, e assim, estabelecer os valores referenciais do *cut-off* para cada tipo de perfil, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: Comprimento de amostragem (*cut-off*) conforme tipos de perfis [10].

Perfis periódicos	Perfis aperiódicos	<i>Cut-off</i>
Distância entre picos [mm]	Ra [μm]	[mm]
> 0,01 até 0,04	Até 0,02	0,08
> 0,04 até 0,13	> 0,02 até 0,1	0,25
> 0,13 até 0,4	> 0,1 até 2	0,8
> 0,4 até 1,3	> 2 até 10	2,5
> 1,3 até 4	> 10	8

4.4.10 Parâmetro de rugosidade média Ra

O parâmetro de rugosidade Ra, também conhecido como CLA (*Center Line Average*) ou linha média central, é compreendido como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo (medido) em relação à linha média em um comprimento de amostragem. Este parâmetro corresponde à área entre o perfil de rugosidade e a linha média, ou ainda, a integral dos valores absolutos das amplitudes do perfil de rugosidade dentro de um comprimento de amostragem [10-16].

O parâmetro Ra é o mais utilizado pela indústria para controle de qualidade em geral e monitoramento de processos produtivos onde mudanças graduais no acabamento superficial podem ocorrer. Por medir uma média de picos e vales, o parâmetro Ra não é muito sensível a algum defeito individual maior.

4.4.11 Parâmetro de rugosidade de profundidade média Rz

O parâmetro de rugosidade Rz ou rugosidade de profundidade média é definido como a média aritmética das distâncias entre o pico mais alto e o vale mais profundo de cada intervalo considerado na amostragem do perfil de rugosidade.

A rugosidade de profundidade média é muito utilizada nos casos em que o perfil é periódico e conhecido, principalmente em aplicações que envolvem selantes, vedantes, desgaste, atrito e corrosão. Ainda assim, grandes variações pontuais não podem ser medidas por este parâmetro, além de que ele não permite identificar informações sobre a forma e a distância entre marcas e ranhuras.

4.4.12 Parâmetro de rugosidade R_t

O parâmetro R_t ou rugosidade máxima total, corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação, independentemente dos valores de rugosidade parcial. Este parâmetro é bastante sensível a grandes desvios de picos e vales, a partir da linha média. Normalmente, é utilizado em conjunto com o R_a , quando este último é um indicador geral de textura da superfície.

4.4.13 Parâmetro de rugosidade R_q

Também denominado RMS (*Root Mean Square*) em países de língua inglesa, o desvio médio quadrático, R_q , representa o desvio padrão médio quadrático das distâncias verticais do perfil efetivo (medido) em relação à linha média em um comprimento de amostragem. É um parâmetro complementar e correspondente ao R_a , pois a elevação ao quadrado aumenta o efeito das irregularidades que se afasta da média e, portanto, é mais sensível às variações de picos e vales do que o R_a .

4.4.14 Pré-tratamento químico e eletroquímico

O pré-tratamento químico e eletrolítico, que ocorre com o auxílio de corrente elétrica, geralmente ocorre após o tratamento mecânico e é feito através de desengraxe e/ou decapagem permitindo a perfeita deposição nos tratamentos galvânicos posteriores. Uma superfície satisfatoriamente limpa para a eletrodeposição pode ser considerada como aquela que permite o escoamento da água em uma película contínua, isenta, portanto de “quebra-de-água”.

4.4.15 Decapagem química

A decapagem visa eliminar as camadas de óxidos presentes na superfície das peças, de modo que a posterior deposição de material constitua uma camada perfeitamente aderente e homogênea e ainda possa ser utilizada como ativação ácida [16-20].

O banho de decapagem deve atender as seguintes condições:

- O metal a ser decapado deve sofrer o mínimo de ataque em sua base;
- O substrato não deve ter suas propriedades mecânicas alteradas;
- O tratamento subsequente não deve sofrer alterações.

Os decapantes têm as funções de: neutralizar a alcalinidade da superfície, remover óxidos e carepas, ativar as superfícies e promover a aderência de depósitos. Esse processo pode causar ataques na superfície, para evitar, é adicionado inibidor de corrosão ao decapante.

A decapagem ou ativação pode ser feita por diferentes ácidos, dependendo do metal base a ser tratado. Os ácidos clorídrico e sulfúrico são os mais utilizados, porém atacam a maioria dos metais base. São fáceis de tratar seus efluentes, porém quando utilizados, necessitam um sistema de exaustão e lavadores de gases.

4.4.16 Decapagem com ácido clorídrico

Este ácido é muito utilizado em instalações galvânicas, pois apresenta baixo custo e grande velocidade de decapagem em temperaturas ambientes. A concentração de trabalho varia de 50 a 70 % e é eficiente na remoção de carepas, deixando a superfície tratada bastante limpa.

4.4.17 Decapagem com ácido sulfúrico

Da mesma forma que o ácido clorídrico, o sulfúrico encontra largo uso nas instalações galvânicas, principalmente para decapagem preliminar de carepas e como soluções de neutralização em quase todas as linhas de pré-tratamento.

Para decapagem, é utilizado em concentrações que variam de 20 a 45% e aquecido de 40 °C a 50 °C para aumentar a velocidade de reação e melhorar a eficiência do processo de decapagem.

As vantagens que fazem com que o ácido clorídrico seja mais utilizado do que o ácido sulfúrico são:

- Produz uma superfície mais limpa e brilhosa;

- Não necessita aquecimento;
- Os resíduos do ácido clorídrico são removidos com mais facilidade com água;
- De modo geral, em soluções de ácido clorídrico de concentração equivalente, a quantidade de hidrogênio atômico incorporado é menor.

4.4.18 Função do inibidor

O ferro é o maior contaminante em soluções de decapagem e grande porção provém do ataque do ácido ao metal base, durante a remoção do óxido e carepa pelo ácido. Isso pode ser minimizado pelo uso de inibidor de ácido. A atuação desejada de um inibidor é impedir o ataque do ácido ao metal base, enquanto permite que o ácido remova óxido e carepa. A função principal do inibidor é reduzir o ataque do metal, o odor da decapagem, a demanda de hidrogênio e o consumo de ácido.

O inibidor pode agir de duas formas: deposição sobre o substrato, impedindo que o ácido atinja o metal e também, formando uma leve película que isolará o substrato do meio ácido.

4.4.19 Decapantes alcalinos

Os decapantes alcalinos apresentam propriedades desengraxantes, removem os óxidos presentes na superfície dos metais, praticamente sem atacar o substrato de aço e, portanto, não liberam gás hidrogênio, devido ao fato de serem alcalinos. Esses decapantes são soluções que contém agentes complexantes ou quelantes e gluconatos e que operam a temperaturas elevadas, em torno de 95 °C. Metais suscetíveis à fragilização por hidrogênio são preferencialmente decapados em soluções alcalinas. Esses decapantes são menos eficientes do que os ácidos.

4.4.20 Desengraxante

O desengraxamento é a operação de eliminação de sujidades, como graxas, óleos solúveis e lubrificantes e óleos protetivos que restam na superfície após as operações mecânicas. O processo de eletrodeposição exige um perfeito desengraxe. O desengraxe pode ser efetuado por dissolução, saponificação, emulsificação e por ação mecânica.

Antes de iniciar o desengraxe é necessário conhecer o tipo de contaminantes a serem removidos. A maioria são produtos insolúveis em água, o que torna difícil a sua remoção por simples lavagem. Existem graxas saponificáveis, passíveis de serem removidas com produtos alcalinos, como soda cáustica. Já os óleos minerais exigem limpeza com solventes orgânicos apropriados ou com soluções de tensoativos, que são mais eficientes na limpeza, pois removem também sais e óxidos solúveis em água, além das oleosidades. A remoção das impurezas também pode ser feita através de ultrassom.

4.4.21 Pré-tratamento eletrolítico

O pré-tratamento eletrolítico é geralmente complemento de outros processos de limpeza. É utilizado como desengraxante fino de peças que sofrerão eletrodeposição de metais. Nesse processo, há necessidade de indução de corrente elétrica para remover finas sujidades. É uma limpeza profunda, com eliminação de todo e qualquer contaminante que não faça parte da superfície.

4.5 Eletrodeposição de cromo

A eletrodeposição de cromo duro é um meio reconhecido de prolongar a vida de todos os tipos de peças metálicas sujeitas a desgaste, fricção, abrasão e corrosão. Essas peças podem ser protegidas quando recém-fabricadas, ou podem ser recuperadas quando estão desgastadas e, caso contrário, seriam eliminadas [3-6] .

4.5.1 Reações químicas da preparação do banho

O banho de cromo consiste em dissolver em água ácido crômico, que é, na verdade, CrO_3 (Anidrido Crômico), juntamente com uma quantidade específica de catalisadores para formar o banho de cromo. O CrO_3 é vagarosamente adicionado à água, ele se dissolve e começa a formar H_2CrO_4 , conforme reação abaixo [5, 6]:



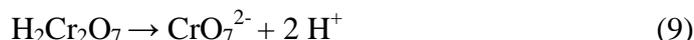
O ácido ioniza, formando íons cromato e íons hidrogênio:



Com a adição continua de ácido crômico na água, a solução fica mais concentrada e o H_2CrO_4 forma ácido dicrômico, $\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$.

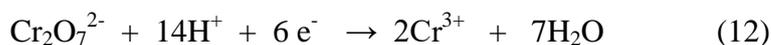
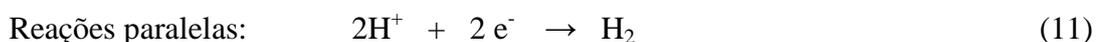
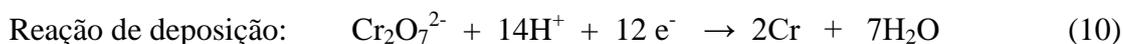


O ácido dicrômico ioniza e forma íons dicromato e hidrogênio:



4.5.2 Reações no cátodo

A primeira reação é de deposição do cromo, na presença do catalisador. Paralelamente, há duas reações: a primeira é onde forma o gás (H_2), responsável por 80% da energia consumida no processo de eletrodeposição; a segunda é uma reação indesejável, onde se forma o cromo trivalente [5, 6, 8].



4.5.3 Reações no ânodo

Na primeira equação, com a reação de íons hidroxila com 4 elétrons, muita energia é consumida. A segunda reação, do chumbo, é muito importante pois torna a terceira reação possível. Sem o peróxido de chumbo na superfície do ânodo, o cromo trivalente não seria reoxidado para ácido crômico.



4.5.4 Composição do banho de cromo

Para composição do tanque de cromagem é utilizada uma solução aquosa contendo trióxido de cromo com concentrações que variam de 230 a 300 g/L. Além de ácido crômico, os banhos contêm sulfato (proveniente do ácido sulfúrico) em uma quantidade de 1,5 a 2,0 %, calculada sobre a concentração de ácido crômico. As relações absolutas de ácido crômico e sulfato no banho são de importância secundária com relação ao fator principal, que é a relação de ácido crômico e sulfato. Essa relação é melhor se mantida em 100:1, não ultrapassando os limites de 50:1 a 200:1.

Os banhos de cromo duro podem ser divididos em catalisados e convencionais. Os banhos catalisados possuem, além de ácido crômico e sulfato, uma quantidade moderada de catalisadores (entre 30 e 70 mL por litro). Já os convencionais não possuem nenhum aditivo, tendo um processo de deposição mais lento, porém o custo é menor com relação ao catalisado.

As vantagens do processo de eletrodeposição com cromo catalisado podem ser citadas: alta velocidade de deposição, melhor penetração, maior facilidade de deposição sobre superfícies passivas, economia de energia, melhor distribuição de camadas, faixa maior de operação. Em termos de qualidade, pode ser relatado:

- Performance consistente;
- Melhor resistência à corrosão;
- Melhor resistência à abrasão;
- Depósitos brilhantes;
- Tensões internas menores;
- Acabamento mais liso;
- Maior contagem de fissuras;
- Maior dureza;
- Maior resistência a corrosão pela produção de cromo microfissurado ou microporoso.

Tensão: depende da geometria da peça.

Velocidade de deposição: com 55 A/dm^2 e temperatura de $55 \text{ }^\circ\text{C}$, aproximadamente $1 \text{ }\mu\text{m/min}$ de cromo é depositado.

Um conjunto de condições ideais deve ser monitorado, como: temperatura do banho, a densidade de corrente, e a concentração de ácido crômico. Esses parâmetros poderão influenciar no poder de penetração, na dureza e qualidade final do revestimento.

4.5.5 Contaminantes do banho de cromo

Os contaminantes influenciam diretamente a condutividade do banho e causam a degradação das condições da solução, prejudicando a eficiência da eletrodeposição e algumas características do depósito de cromo, como:

- Diminuem a condutividade ou aumentam a resistividade do banho;
- Alteram o poder de cobertura e penetração na alta densidade de corrente;
- Aumentam o número de *pits*, no depósito da camada de cromo;
- Causam o crescimento de nódulos e arborescência na camada depositada.

A condutividade da solução diminui quando a concentração de impurezas aumenta. Além disso, existem estudos que comprovam que a energia consumida durante a cromagem aumenta em 25% se a concentração de cátions metálicos aumenta de 0 a 7,5 g/L. Com a redução da condutividade há necessidade de um aumento significativo na voltagem aplicada na solução, para obter uma densidade de corrente catódica suficiente para manter os mesmos níveis de deposição.

Os principais contaminantes para banhos de cromo são o cromo trivalente e os metais, para os quais é determinado limites máximos no processo de cromagem (Tabela 3).

Tabela 3: Limites máximos de contaminantes em processo de cromagem [6].

Cromo Trivalente	4 a 7 g/L
Ferro	7 g/L
Cloro	0,03 g/L
Alumínio	10 g/L
Zinco	5 g/L
Cobre	5 g/L

4.5.6 Cromo trivalente

O cromo trivalente é formado durante a redução do ácido crômico no cátodo. Uma vez que há a reoxidação do cromo trivalente nos ânodos de chumbo, rapidamente se forma uma concentração de equilíbrio, pois a formação de trivalência depende da relação entre superfícies anódicas e catódicas.

O baixo teor de cromo trivalente tem influência positiva sobre a má dispersão do eletrólito de cromo. Quando seu teor cresce demais, ou seja, quando a superfície anódica é muito pequena em relação à superfície catódica, o aspecto da camada de cromo vai piorando e a região da densidade de corrente para a cromagem brilhante diminui, tornando impossível a obtenção de uma camada brilhante. Além disso, o cromo trivalente tem o efeito de estreitar os limites das condições de trabalho da solução de cromagem e de diminuir a sua condutividade.

Em tanques convencionais, por não possuírem catalisadores, possuem uma condutividade menor e com isso, há uma maior dificuldade de reoxidação do cromo trivalente para cromo hexavalente, além de serem utilizados para cromagem de peças de grande porte, não obedecendo a recomendação de 30:1 de área anódica.

4.5.7 Formas de minimizar os contaminantes nos banhos

- Cobre: evitando contato da solução com os barramentos, e dos dispositivos diretos com metais expostos.
- Alumínio: evitando isolar peças onde não é requerido o depósito de cromo com lâminas de alumínio; ao cromar peças de ligas de alumínio, evitando que caia peças nos banhos.
- Ferro: evitando que caia peças nos banhos. Isolando as partes das peças onde não deseja cromar com fitas adesivas orgânicas ou com tintas isolantes e resistentes a solução de ácido crômico.
- Cromo trivalente: utilizando área anódica maior que a área catódica (mínimo 2 vezes maior) e evitando entrada de óleo e produtos alcalinos no banho.

4.5.8 Corrente elétrica

Os tanques devem ser bem dimensionados. Para cada Ampère de intensidade de corrente, cada tanque deve ter 2 a 3 litros de volume. Com isso, é obtida uma constância quanto à composição do eletrólito e às condições de trabalho, fatores importantes para a cromação dura. A corrente contínua é de fundamental importância, portanto os retificadores trifásicos devem ser de onda completa com no máximo 5 % de “*Ripple*”. Quando o “*Ripple*” tiver percentual mais alto, podem ocorrer problemas como falta de cobertura e queima, ao mesmo tempo. A condutividade de um banho de cromo duro deve ser de 500 mS/cm (milisemens por centímetro). Os contaminantes reduzem a condutividade da solução, elevando o consumo de energia e o tempo de deposição.

4.5.9 Características dos banhos de cromo duro

As características que em conjunto dão valor à película de cromo duro são: resistência ao desgaste, resistência à abrasão, dureza e resistência à corrosão.

A resistência ao desgaste é a maior qualidade do cromo duro. Nos amplos setores da metalurgia, tem sido sempre um trabalho fundamental obter uma máxima resistência ao desgaste aumentando a vida da peça. Em muitos casos, estas peças são de difícil construção, conservação e reparação.

A resistência ao desgaste de uma película de cromo corretamente obtida com o banho normal é influenciada, principalmente, pela relação densidade de corrente x temperatura, e aumenta com a elevação da temperatura e da densidade de corrente. Os valores mais altos de resistência ao desgaste foram encontrados em películas obtidas com densidade de corrente da ordem de 70 A/dm^2 e trabalhando a $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

São muitas as aplicações de cromo duro baseadas em sua elevada resistência à abrasão, qualidade que aumenta o valor de proteção da película de cromo. A aplicação de sistemas mais modernos e mais exatos para a comprovação desta resistência tem demonstrado que seu valor não depende diretamente da dureza.

Dureza de um corpo é a resistência que impede a penetração por outro corpo. Tem influência na dureza a composição química do banho, sua densidade, temperatura e regime de corrente. As causas mais importantes da dureza são: o tamanho extremamente pequeno dos cristais de cromo e a disposição especial que estas se adaptam durante a formação do depósito. Também influi a oclusão dos átomos de hidrogênio dentro do cristal cúbico de cromo, que é obrigado a tomar uma orientação favorável.

Frente aos fenômenos de oxidação, os metais são ativos ou passivos, sendo que estes são os mais resistentes à corrosão. Na prática, o cromo passiva rapidamente e adquire um potencial eletroquímico da grandeza de um metal nobre. Portanto, o cromo duro pode ser utilizado como proteção anticorrosiva, protegendo eficazmente o ferro e o aço.

É condição essencial para obter a proteção desejada que não exista porosidade alguma, pois se um agente corrosivo atinge, através dos poros da película de cromo, o metal base, a película deixará de ser passiva e atuará catodicamente. Por sua pouca reatividade com os produtos oxidantes ou redutores, o cromo resiste à maior parte de ácidos e alcalinos.

4.6 Controle de qualidade dos banhos

O controle dos banhos de cromo, para uma maior eficiência, consiste em:

- Concentração de cromo e cromo trivalente: através de análise por titulometria;
- Contaminantes: através de análises por absorção atômica;
- Dureza: através de medidas com microdurômetro.

5 SITUAÇÃO ATUAL

As empresas metal-mecânicas brasileiras compravam as barras de aço SAE 1045 das usinas, confeccionavam suas peças, enviavam para a cromagem e só então retornavam para a montagem do equipamento. Dessa forma, o custo de fabricação, logística e gerenciamento de terceiros aumentava o preço dos produtos, além do prazo de execução das operações, inviabilizando negócios.

Aos poucos, essas mesmas empresas passaram a importar (principalmente da Europa e Romênia) as barras cromadas no comprimento de seis metros, fabricando as peças a partir desse material já acabado e assim reduzindo custos de cromagem e etapas de logística intermediárias. Todavia, com a alta do dólar e variação cambial ao longo dos últimos três anos, o mercado nacional sinalizou a necessidade de nacionalizar esse tipo de produto e assim, abriu espaço para a atuação nesse processo.

Em termos de questões técnicas, os requisitos especificados pelos clientes de barras englobam: dimensão, camada, rugosidade, embalagem, identificação, dureza e *salt spray* de 48 horas. Apesar de atender todas as necessidades dos clientes atuais, ainda há a necessidade de atender ao requisito de *salt spray* mínimo de 96 horas até 200 horas, sinalizado por alguns clientes potenciais.

Ao longo dos anos, a empresa alterou parâmetros da etapa de preparação, na etapa de cromagem, camada depositada, etapas dos acabamentos, tentando alcançar o objetivo de atingir mais horas de *salt spray*. Os testes sempre precisaram ser realizados externamente, na UFRGS ou UCS, porém demandava um grande tempo de confecção dos corpos de prova e organização na agenda dos laboratórios especializados, além de um alto custo para realização dos testes.

A empresa Sulcromo observou a necessidade sinalizada pelo mercado de ensaios de névoa salina frequentes para validação dos processos, além da quantidade de ensaios necessários para a investigação e obtenção de melhores resultados de *salt spray*. Frente a essas situações, foi feita a cotação para a aquisição de uma câmara de névoa salina para que os testes pudessem ser realizados pela própria empresa, como rotina de controle de qualidade.

Em 2015, a empresa realizou o investimento de aquisição de uma câmara de névoa salina da marca BASS, modelo USP-00. Foi necessário um local e instalações apropriadas para que pudessem ser iniciados os testes, além de aquisição de reagente necessário para preparo da solução salina. Também obteve conhecimento da norma ASTM B115, além de

visitas aos laboratórios onde se realizavam os ensaios, com objetivo de agregar conhecimento do processo para colocá-lo em prática.

Devido a maior facilidade com a aquisição da câmara, foram feitas diversas alterações nos processos de cromagem, buscando melhora dos resultados de horas obtidas na câmara de névoa salina, sempre sendo registrados os parâmetros utilizados e os resultados.

Mesmo já tendo realizado diversos estudos, testes e alterações no processo ao longo dos últimos três anos, a empresa ainda não conseguiu atingir esse objetivo, o que acaba inviabilizando novos negócios. O presente trabalho visa investigar pontos ainda não trabalhados, visando buscar um melhor resultado.

6 METODOLOGIA

6.1 Corpos de prova

As barras trefiladas de aço SAE 1045 são recebidas da usina em feixes (Figura 6). Cada barra possui comprimento de seis metros e diâmetro variável, entre 10 e 100 mm.

Figura 6: Barras recebidas em feixes.



Para todos os ensaios realizados neste trabalho, foram utilizados corpos de prova confeccionados a partir de uma barra de aço SAE 1045, trefilada cilíndrica com diâmetro de 30,00 mm, fabricada na usina Arcelor Mittal. A barra utilizada estava condicionada com óleo protetivo desde sua fabricação, em ambiente fabril por menos de 30 dias, exposta aos efeitos do ambiente. Para a fabricação dos corpos de prova, a barra foi cotada na serra, de acordo com as condições de preparação planejadas. Nos ensaios foram utilizados conjuntos de três corpos de prova para cada situação analisada, ou seja, os ensaios foram realizados em triplicata.

Na primeira parte do trabalho, quatro tipos de corpos de prova foram desenvolvidos, foram denominados e identificados como: TCC 01, TCC 02, TCC 03 e TCC 04. As amostras passaram por o todo processo de preparação, cromagem, acabamento e iniciação no teste de *Salt Spray*, no mesmo dia, a fim de evitar variáveis não controladas. Após a preparação, as amostras ficaram envoltas em papel e armazenadas em dessecador, evitando possível corrosão. As lixas utilizadas foram de abrasivo óxido de alumínio.

Como os resultados desejados não foram alcançados na primeira parte do trabalho, após a análise foi decidido realizar modificação na etapa de preparação dos corpos de prova para diminuir a rugosidade da sua superfície.

Na segunda parte do trabalho, dois tipos de corpos de prova foram desenvolvidos, identificados como: TCC 05 e TCC 06. Todas as amostras desenvolvidas sofreram todo processo de preparação, cromagem, acabamento e iniciação no teste de *Salt Spray*, no mesmo dia, como já descrito.

6.2 Preparação dos corpos de prova

Conforme sua identificação, os quatro tipos de corpos de prova receberam as seguintes preparações:

- **TCC 01:** Os três corpos de prova, após cortados, receberam a preparação da superfície. Em um torno polidor, a peça foi fixada entre dois extremos. Os corpos de prova foram então polidos com lixas de granulometria #220, #320, #400 e #600. Após, os corpos de prova foram lixados com pasta de polimento sobre a lixa de granulometria #600. Com a sequência realizada, diminuindo o tamanho do grão, cada peça obteve maior brilho e menor rugosidade (Figura 7).

Figura 7: Preparação do corpo de prova no torno polidor utilizando lixa. (a) Montagem; (b) polimento.

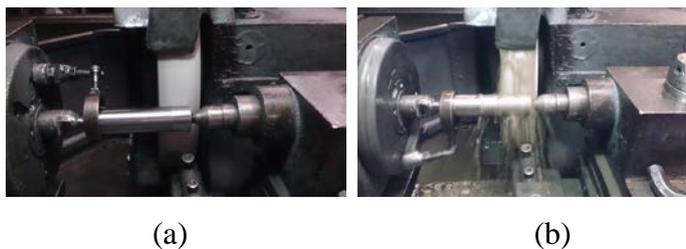


(a)

(b)

- **TCC 02:** Os três corpos de prova após cortados, receberam a preparação da superfície semelhante aos do TCC 01. A mesma sequência de lixas #220, #320, #400 e #600 foi utilizada, apenas eliminando a etapa de passagem da lixa com pasta de polimento. Desta forma, a superfície dos corpos de prova ficou com uma rugosidade maior que o conjunto TCC 01, mas ainda com brilho.
- **TCC 03:** Os três corpos de prova, após cortados, receberam a preparação da superfície. Inicialmente, em uma retífica, a peça foi fixada entre dois extremos e foi utilizado um rebolo branco para a remoção de aproximadamente 0,03 mm de material base. Após, foi encaminhada para o torno polidor, onde foi realizado o polimento com a sequência de lixas #220, #320, #400 e #600, ou seja, as mesmas operações dos corpos de prova TCC 02 (Figura 8).

Figura 8: Corpo de prova recebendo tratamento na retífica (com refrigeração com óleo solúvel). (a) Montagem; (b) polimento.



- **TCC 04:** Uma barra de um metro de comprimento recebeu a preparação da superfície em uma retífica *centerless*. Esse tipo de retífica é muito usado para produção em série, onde a peça é conduzida pelo rebolo e pelo disco de arraste (Figura 9). Toda a sequência de lixas já é previamente fixada na máquina, a barra de aço é fixada e automaticamente é conduzido o processo. Para o polimento foi utilizada a sequência de lixas #320, #400, #800, #1200 e escova sisal com pasta de polimento. Após a preparação da superfície, a barra foi cortada para a produção dos três corpos de prova (Figura 10).

Figura 9: Retífica *Centerless*.

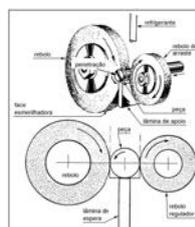


Figura 10: Preparação do pedaço de barra na retífica *centerless*. (a) Montagem; (b) polimento.

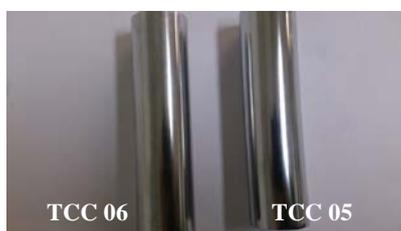


- **TCC 05:** Os três corpos de prova, após cortados, receberam a preparação da superfície visando obter uma menor rugosidade, em relação aos anteriores. Em uma retífica, a peça foi fixada entre dois extremos, utilizando o rebolo branco para a remoção de aproximadamente 0,03 mm do material base. Após, no torno polidor, foi feito o polimento com a sequência de lixas #220, #320, #400, #600 e #1200, processo análogo ao TCC 03. Os corpos de prova receberam ainda um polimento manual com

graxa animal e pasta de polimento, sendo obtida então uma superfície espelhada (Figura 11).

- **TCC 06:** Os três corpos de prova, após cortados, receberam a preparação da superfície visando obter uma baixa rugosidade. Em uma retífica, a peça foi fixada entre dois extremos, utilizando-se rebolo branco para a remoção de aproximadamente 0,03 mm de material base. Após, no torno polidor, foi feito o polimento com a sequência de lixas #220, #320, #400, #600 e #1200 (Figura 11).

Figura 11: Corpos de prova preparados (TCC 05 e TCC 06), observando-se a diferença de brilho.



6.2.1 Rugosidade Superficial

A rugosidade é uma propriedade de grande interesse e conseqüentemente bastante estudada. A rugosidade dos corpos de prova TCC 01, TCC 02, TCC 03, TCC 04 e TCC 05 foi determinada com um rugosímetro portátil Mitutoyo – SJ 210 devidamente calibrado e aferido (Figuras 13 e 14). Este equipamento utiliza um apalpador de ponta fina posicionado sobre a amostra e um motor elétrico gera o deslocamento horizontal deste apalpador sobre a superfície da amostra. Os movimentos verticais do apalpador são convertidos em sinais elétricos e utilizados posteriormente para a quantificação da rugosidade.

O procedimento para realização da medição da rugosidade está baseado, inicialmente, na configuração do equipamento utilizado para medição. É estabelecido o parâmetro de rugosidade a ser utilizado para a medição, que estará vinculado a normatização e classificação de *cut-off*, conforme descrito na Tabela 2. O valor de *cut-off* está relacionado com o perfil da superfície, isto é, com a distância pico a pico referente à rugosidade da superfície metálica. Na primeira parte do trabalho foi utilizado um valor de *cut-off* de 0,25 mm, visto que a superfície recebeu um bom acabamento, porém não chegando a ser espelhado. Para a segunda parte do trabalho foi selecionado um valor de *cut-off* de 0,08 mm, visto que os corpos de prova apresentavam uma superfície espelhada.

Para todas as medições realizadas, o parâmetro de rugosidade selecionado foi o Ra. A rugosidade média (Ra) é calculada através da média aritmética dos valores absolutos das alturas dos pontos que compõem o perfil, em relação à linha média (LM). A linha média é uma linha de referência que divide o perfil de rugosidade, de forma que a soma das áreas superiores seja igual à soma das áreas inferiores. Ra é o parâmetro mais utilizado como indicador da rugosidade superficial.

Todos os valores encontrados nas medições de rugosidade foram registrados para posterior análise com os resultados obtidos de resistência a corrosão, e verificação de possível relação entre eles.

Figura 12: Posicionamento da base do rugosímetro no corpo de prova para iniciar ensaio.



Figura 13: Rugosímetro durante medição: (a) gráfico gerado durante o ensaio; (b) resultado da rugosidade encontrada.



(a) (b)

6.3 Cromagem dos corpos de prova

Todos os corpos de prova, independente do método de preparação, foram montados em dispositivo (gancheira) apropriado, e idênticos (Figura 14). Foram todos colocados no tanque juntos. O tanque, identificado internamente como TQ 1, já continha o banho de cromagem com uma concentração de 252 g/L, dentro das especificações de catalisador (Duro Cromo Fluor *Free*) e de contaminantes. Durante todo o processo de cromagem foi feito o controle de temperatura, estando entre 50 °C e 60 °C. Todos os parâmetros exigidos para o banho de cromo estavam de acordo com a especificação.

Figura 14: Corpos de prova montados em ganchos apropriados.



Após imersão no tanque de cromagem, os corpos de prova foram submetidos a um ataque anódico com aplicação de uma corrente de 550 A e 3,7 V, durante aproximadamente 25 segundos, objetivando sua limpeza (Figura 15).

Figura 15: Peças imergidas no banho de cromo.



As peças foram cromadas com aplicação de uma corrente entre 710 e 730 A e de 6,9 a 7,0 V, durante aproximadamente uma hora (Figura 16). Com isso, uma camada de cromo entre 0,05 a 0,07 mm foi depositada em cada corpo de prova.

Figura 16: Controles de parâmetros: (a) Painel com voltagem e amperagem aplicadas durante o processo de cromagem dos corpos de prova; (b) Medição da temperatura do tanque durante a cromagem.



(a)

(b)

Após a operação de cromagem e verificação da camada depositada dentro do especificado, os corpos de prova foram retirados do tanque, enxaguados com água corrente (Figura 17) e encaminhados para o polimento final.

Figura 17: Enxágue dos corpos de prova após cromagem.



6.4 Acabamento Final

Todos os corpos de prova receberam um acabamento final em torno lixador com uma lixa #600, apenas assegurando uniformidade do revestimento e brilho (Figura 18). Após, os corpos de prova foram pesados em balança semi-analítica e foram então, encaminhados para preparação para o ensaio de *Salt Spray*.

Figura 18: Acabamento final dos corpos de prova no torno polidor.



6.5 Preparação dos corpos de prova e ensaio de Névoa Salina (*Salt Spray*)

6.5.1 Ensaio de Névoa Salina (*Salt Spray*)

O ensaio de névoa salina é conduzido em uma câmara fechada com controle das condições de exposição da amostra. Estes ensaios têm como objetivo permitir o controle dos fatores que contribuem para a corrosão, porém sem provocar alteração nos mecanismos de corrosão.

O mais antigo e utilizado ensaio acelerado de laboratório para simulação de intempéries é o ensaio de névoa salina ASTM B-117, originalmente desenvolvido entre 1910-1920 e padronizado em 1939. Este ensaio procura simular as condições encontradas em atmosferas marítimas, através da névoa contínua de solução de NaCl a uma concentração de 5% em massa e temperatura de $35\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. O pH da solução oscila entre 6,5 e 7,2 e a umidade relativa é de 100%.

A justificativa para a utilização deste ensaio como método de avaliação é que se o sistema de revestimento suporta a alta agressividade do ensaio, ele apresentará um comportamento satisfatório quando utilizado em condições de serviço.

6.5.2 Preparação dos corpos de prova

Na preparação dos corpos de prova para o ensaio, suas faces foram completamente isoladas de modo que a corrosão originada nesta região não cromada não prejudicasse o resultado do ensaio no restante do corpo de prova. O isolamento foi realizado com fita isolante. Fitas de nylon foram anexadas para possibilitar a suspensão dos corpos de prova na câmara (Figura 19). Todos os corpos de prova foram devidamente identificados.

Figura 19: Isolamento dos corpos de prova com fita isolante e colocação do fio de nylon.



6.5.3 Câmara de *Salt Spray*

Os ensaios foram realizados numa câmara fechada da marca BASS, modelo USP-00 (Figura 20) com todos os instrumentos de controle dos parâmetros calibrados.

Figura 20: Câmara de *Salt Spray* BASS USP-00 utilizada para os ensaios.



Os ensaios de névoa salina foram realizados conforme norma ASTM B117, dentro dos parâmetros exigidos na norma, como:

- Temperatura dentro da câmara de $35\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$;
- Taxa de coleta de solução de 1 a 2 mL por hora;

- Na solução coletada: pH de 6,5 a 7,2 e concentração de cloreto de sódio de 50 g/L;
- Intervalos entre avaliações de 24h.

A Figura 21 apresenta a disposição dos corpos de prova dentro da câmara salina, com a separação recomendada, evitando a contaminação dos produtos de corrosão entre eles.

Figura 21: Disposição dos corpos de prova na câmara para iniciar o ensaio.



6.5.4 Registros dos corpos de prova

Os corpos de prova foram identificados e foi feito o registro fotográfico da sua situação inicial antes de submetidos ao ensaio de névoa salina (Figura 22 e Figura 23).

Figura 22: Registro fotográfico inicial dos corpos de prova da primeira parte do trabalho.

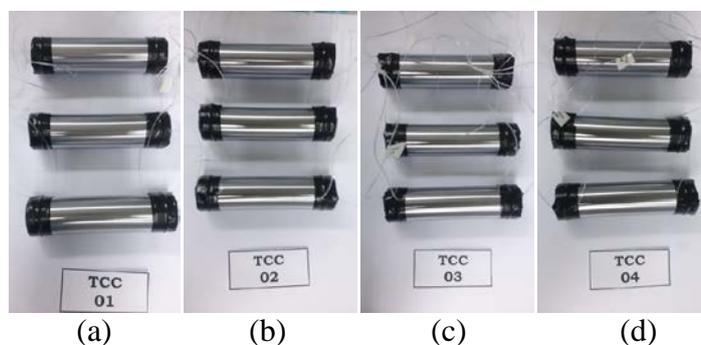
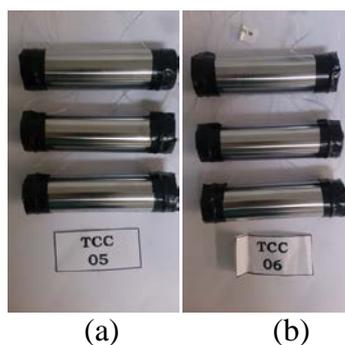


Figura 23: Registro fotográfico inicial dos corpos de prova da segunda parte do trabalho.



As avaliações foram feitas a cada 24 horas. Os corpos de prova foram retirados da câmara quando apresentaram marcas de corrosão, finalizando o ensaio e registrando o tempo de exposição até aquele momento.

Após o ensaio, os corpos de prova foram lavados em água corrente, secos e pesados para posterior análise de perda de massa. Também foram realizados os registros fotográficos dessas amostras ao final do ensaio, mostrando os pontos de corrosão.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Primeira parte: TCC 01, TCC 02, TCC 03 e TCC 04

Durante o ensaio de névoa salina, os corpos de prova foram avaliados a cada 24 horas, abrindo a câmara e verificando a ocorrência de corrosão nas amostras. Caso apresentassem marca de corrosão, os mesmos eram retirados do ciclo de ensaio. Ao serem retirados eram realizados: os registros do tempo de resistência à corrosão nas condições da câmara, registro fotográfico, pesagem e observação das corrosões com lupa.

A pesagem é realizada para cálculo de perda de massa dos corpos de prova. O cálculo de perda de massa é uma ferramenta interessante para avaliar a intensidade da corrosão porém, em corrosão localizada, a perda de massa tende a ser bastante pequena. A equação utilizada para determinar a porcentagem de perda de massa durante a exposição à névoa salina foi:

$$\% \text{ perda de massa} = \frac{(M_i - M_f)}{M_i} \times 100 \quad (16)$$

Onde,

M_i = massa do corpo de prova antes da exposição à névoa salina (g);

M_f = massa do corpo de prova após a exposição à névoa salina (g).

Na primeira parte do trabalho foi tomada como ponto de investigação a corrosão na superfície metálica antes da preparação dos corpos de prova, devido à exposição no ambiente fabril. A investigação consistiu em retirar uma camada do metal base dos corpos de prova com uso de um rebolo e, após, executar o polimento com lixas. O uso do rebolo permitiu uma limpeza maior das barras de metal, antes do polimento tradicional. Após a preparação, os corpos de prova foram pesados e colocados na câmara de névoa salina.

Com 48 horas de ensaio, a câmara foi desligada, baixada a pressão de trabalho e então aberta, verificando as condições dos corpos de prova. Nesse tempo, foi verificado que não havia ocorrência de corrosão em nenhum corpo de prova presente no ensaio e, então, a câmara foi novamente fechada e ligada, sendo regulada a pressão necessária. O tempo de interrupção do ensaio para verificação dos corpos de prova é o menor possível.

Após 72 horas, ao desligar a câmara e abri-la para verificação, os corpos de prova TCC 02 e TCC 03 apresentaram marcas de corrosão e, por isso, foram então retirados da câmara. Como os corpos de prova TCC 02 e TCC 03 não apresentaram corrosão em 48 horas, mas no intervalo de 24 horas subsequentes houve início do processo corrosivo, foi

determinado que sua resistência à corrosão em névoa salina é de 48 horas. Os corpos de prova foram então retirados da câmara, sendo pesados e realizados os registros fotográficos (Figura 24).

Figura 24: Registro fotográfico final dos corpos de prova TCC 02 e TCC 03 da primeira parte do trabalho após 72 horas de exposição ao ensaio de névoa salina.



Com 96 horas de ensaio, os corpos de prova TCC 01 e TCC 04 apresentaram marcas de corrosão, sendo concluído que os mesmos resistem à corrosão por um período de 72 horas. As amostras foram então retiradas da câmara, pesadas e registros fotografadas (Figura 25). A câmara foi então desligada, encerrando os ensaios.

Figura 25: Registro fotográfico final dos corpos de prova TCC 01 e TCC 04 da primeira parte do trabalho, após 96 horas de exposição ao ensaio de névoa salina.



A partir das massas obtidas antes e depois do ensaio, foi possível calcular a perda de massa dos corpos de prova utilizando a equação (16). Os valores medidos e resultados obtidos estão registrados na Tabela 4. A perda de massa calculada é a média das perdas de massa das três amostras que constituem um tipo de corpo de prova, já que os ensaios foram feitos em triplicata.

Os resultados obtidos indicam que os corpos de prova polidos com pasta de polimento apresentaram os menores índices de rugosidade e o maior tempo de resistência à corrosão em

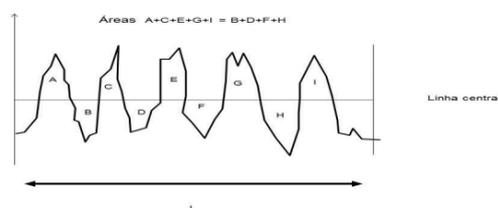
névoa salina, além de apresentarem superfícies com marcas de corrosão menos agressivas, como mostram os registros fotográficos.

Tabela 4: Dados iniciais e finais de alguns parâmetros medidos nos corpos de prova destinados ao ensaio de névoa salina na primeira parte do trabalho.

Identificação	Polimento	Rugosidade Preparação (Ra, μm)	Peso Inicial (g)	Peso final (g)	% perda de massa	Tempo de Resistência à Corrosão
TCC 01	com pasta	0,097	604,15	604,10	0,008	72 horas
TCC 02	sem pasta	0,123	604,10	604,02	0,013	48 horas
TCC 03	sem pasta	0,122	603,58	603,49	0,015	48 horas
TCC 04	com pasta	0,108	605,10	605,06	0,007	72 horas

A adesão do revestimento de cromo ao substrato metálico é influenciada por diversos fatores, como o material do revestimento, a condição do substrato, a rugosidade, a limpeza e a temperatura durante o processo de eletrodeposição. A rugosidade é definida como um conjunto de desvios microgeométricos caracterizado pelas pequenas saliências (picos) e reentrâncias (vales) presentes em uma superfície. As superfícies, depois de trabalhadas, apresentam essas irregularidades, que tendem a formar um padrão de textura específico, ou seja, uma textura superficial decorrente do processo de polimento [10-15]. A Figura 26 apresenta um perfil de irregularidades de uma superfície onde, a partir de uma linha média, a área total superior é igual à área total inferior.

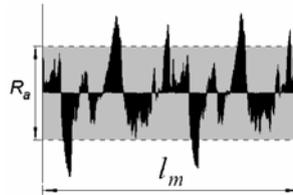
Figura 26: Perfil de irregularidades de superfície [11].



A medição da rugosidade de uma superfície é feita através da determinação do fator Ra, determinado no Brasil pelas Normas NBR ISO 4287/2002 e NBR 8408/1988. A medição é feita através do Sistema M, que consiste em determinar a linha média que divide a área do perfil de rugosidade, conforme apresentado na Figura 23. A partir da linha média, é

avaliado o parâmetro Ra, definido como rugosidade aritmética ou média. A Figura 27 apresenta as áreas a partir das quais Ra é avaliado.

Figura 27: Ilustração do parâmetro de rugosidade Ra [14].



A determinação é feita através de:

$$Ra = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y| dx = \frac{A}{l_m} \quad (17)$$

As vantagens para a utilização de Ra para a determinação da rugosidade consistem em ser o parâmetro mais utilizado, apresentado por praticamente todos os equipamentos de medição e aplicável à maioria dos processos de fabricação. No entanto, a presença de um pico ou de um vale atípicos não é identificada e pode ocultar um defeito. Seu valor não define o formato da irregularidade nem tão pouco distingue picos de vales.

No presente trabalho, foram mantidas constantes a composição do banho e os parâmetros para a eletrodeposição, como voltagem, corrente e temperatura. Portanto, o único fator que influencia a resistência do material no ensaio da câmara de névoa salina é a preparação da superfície, ou seja, da rugosidade obtida a partir das diferentes etapas de polimento. Os resultados indicam que o uso de pasta de polimento diminuiu a altura tanto dos picos quanto das reentrâncias das irregularidades da superfície metálica. Essa maior uniformidade permitiu a formação de uma camada de cromo eletrodepositado mais aderente e com maior efeito barreira ao ataque de cloreto proveniente na névoa salina.

Quando um potencial é aplicado ao cátodo de um material que vai receber a eletrodeposição de cromo, a corrente gerada na reação (Equação 10) é função do sobrepotencial catódico (η_c), isso é, a diferença entre o potencial aplicado (E_{apl}) e o potencial de equilíbrio (E_{equil}) da semirreação de redução do Cr (VI) (Equação 18) [7]:

$$\eta_c = E_{apl} - E_{equil} \quad (18)$$

A corrente de redução aumenta exponencialmente com o sobrepotencial aplicado, de acordo com a equação de Butler-Volmer (Equação 19):

Para sobrepotenciais catódicos:

$$i_c = i_o \left[\exp \frac{(-\alpha)nF\eta_c}{RT} - \exp \frac{(1-\alpha)nF\eta_c}{RT} \right] \quad (19)$$

Onde i_c corresponde à resposta em corrente catódica, i_o é a corrente de troca no potencial de equilíbrio (E_{equil}), α é a fração da barreira de energia de ativação vencida para o processo catódico, n é o número de elétrons trocados, F é a constante de Faraday, η_c é o sobrepotencial catódico aplicado (sobrepotencial de ativação), R é a constante universal dos gases e T é a temperatura absoluta.

O aumento contínuo do sobrepotencial catódico não produz um aumento de corrente, portanto, pode levar a um alto custo sem resultado no tempo ou qualidade da eletrodeposição. Isso ocorre porque, a partir de um determinado valor de sobrepotencial de ativação, a espécie a ser reduzida rapidamente se esgota na superfície do cátodo e por mais que o sobrepotencial aumente, a corrente tende a um valor constante, denominado corrente limite de difusão. Esse valor constante de corrente é limitado pela difusão dos íons $Cr_2O_7^{-2}$ do seio da solução para a superfície do cátodo. O eletrólito auxilia esse transporte, mas, a partir da camada externa de difusão, é a diferença de concentração dos íons $Cr_2O_7^{-2}$ entre a parte externa da camada de difusão e a superfície do cátodo que atua como força motriz para o transporte de massa. A corrente limite de difusão é dada por (Equação 20):

$$i_{lim} = \frac{n F D_o C_o^\alpha}{\delta} \quad (20)$$

Onde n é o número de elétrons, F é a constante de Faraday, D_o é o coeficiente de difusão da espécie a ser reduzida, C_o^α é a concentração de $Cr_2O_7^{-2}$ no seio da solução e δ é a espessura da camada de difusão.

Durante o processo de eletrodeposição, o cromo se deposita preferencialmente nas elevações (picos A, C, E, G e I da Figura 23), gerando dendritas que rapidamente coalescem a uma camada contínua. Desta forma, a camada de cromo eletrodepositada nas elevações é mais espessa, enquanto que a depositada nas reentrâncias (vales B, D, F e H da Figura 23) é mais fina e com falhas. Quanto maior a diferença de altura entre a elevação e a reentrância, maior a heterogeneidade na espessura e menor a resistência à corrosão da camada eletrodepositada.

A eletrodeposição ocorre mais rapidamente nas elevações porque o caminho difusional das espécies a serem depositadas ($Cr_2O_7^{-2}$) entre a superfície onde ocorre a deposição e o plano externo da camada de difusão é menor do que nas reentrâncias [20]. Além disso, no topo de uma elevação, as condições difusionais são próximas à de difusão esférica, que é sempre maior do que a difusão linear, devido ao maior campo difusional. Na região plana, a corrente limite de difusão para a redução e deposição do cromo é dada pela Equação 20 enquanto que na região de elevação é dada por (Equação 21):

$$i_{lim} = \frac{n F D_o C_o^\infty}{\delta-h} \quad (21)$$

Onde h é a altura da elevação.

Portanto, a densidade de corrente limite para a difusão de $\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}$ na região de elevação é maior do que na região plana, produzindo uma camada mais espessa de cromo metálico [22-25]. Além disso, nos substratos polidos, os depósitos gerados possuem granulação fina, enquanto que em substratos mais rugosos, a granulação é mais grosseira, mais porosa e menos aderente.

Os resultados mostrados até aqui mostram claramente o efeito benéfico de uma superfície mais polida e uniforme para a qualidade da camada eletrodepositada de cromo. Entretanto, as 72 horas sem corrosão alcançadas pelos corpos de prova com polimento à base de pasta no ensaio de névoa salina ainda não atendem a especificação necessária para a cromagem. Por isso, foi decidido aumentar o grau de polimento dos corpos de prova e repetir os ensaios de câmara de névoa salina.

7.2 Segunda parte: TCC 05 e TCC 06

Baseado nos resultados obtidos na primeira parte, foi feito um aumento do grau de polimento dos corpos de prova para obtenção de um menor grau de rugosidade da superfície. Para confecção dos corpos de prova TCC 05 e TCC 06, foi mantido a composição dos banhos e os demais parâmetros do processo de eletrodeposição, alterando apenas os processos utilizados na preparação da superfície para eletrodeposição. Para isso foi mantida a etapa de remoção do metal base dos corpos de prova com uso de um rebolo anterior às etapas de polimento com lixas.

A partir das diferentes etapas de polimento realizadas, foram obtidos corpos de prova com rugosidades menores, conforme apresentado na Tabela 5. Após a preparação, os corpos de prova foram pesados e colocados na câmara de névoa salina.

Tabela 5: Dados iniciais e finais de alguns parâmetros medidos nos corpos de prova destinados ao ensaio de névoa salina na segunda parte do trabalho.

Identificação	Polimento	Rugosidade Preparação (Ra, μm)	Peso Inicial (g)	Peso final (g)	% perda de massa	Tempo de Resistência à Corrosão
TCC 05	Lixas + graxa animal e pasta	0,014	603,16	602,80	0,060	192 horas
TCC 06	Com lixas de baixa granulometria	0,060	604,63	604,30	0,055	144 horas

Com 144 horas de ensaio, a câmara foi desligada, baixada a pressão de trabalho e então aberta, verificando as condições dos corpos de prova. Nesse tempo, foi verificado que não havia ocorrência de corrosão em nenhum corpo de prova presente no ensaio e, então, a câmara foi novamente fechada e ligada, sendo regulada a pressão necessária.

Após 168 horas, os corpos de prova TCC 06 apresentaram marcas de corrosão e, por isso, foram então retirados da câmara. Como os corpos de prova TCC 06 não apresentaram corrosão em 144 horas, mas no intervalo de 24 horas subsequentes houve início do processo corrosivo, foi determinado que sua resistência à corrosão em névoa salina é de 144 horas. Os corpos de prova foram então retirados da câmara, sendo pesados, realizados os registros fotográficos (Figura 28) e analisados com lupas de mesa de aumento de 5x e lupa de bolso com aumento de 20x.

Figura 28: Registro fotográfico final dos corpos de prova TCC 06 da segunda parte do trabalho, após 168 horas de exposição ao ensaio de névoa salina.



Com 216 horas de ensaio, os corpos de prova TCC 05 apresentaram marcas de corrosão, mostrando sua resistência à corrosão por um período de 192 horas. Apesar de um corpo de prova do conjunto TCC 05 não apresentar pontos de corrosão, o ensaio é encerrado

porque os outros corpos de prova, que receberam o mesmo tratamento superficial, apresentaram manchas. As amostras foram então retiradas da câmara, pesadas e registros fotografadas (Figura 29).

A partir das massas obtidas antes e depois do ensaio na câmara de névoa salina, foi possível calcular a perda de massa dos corpos de prova utilizando a equação (16). Os valores medidos e resultados obtidos estão registrados na Tabela 4.

Figura 29: Registro fotográfico final dos corpos de prova TCC 05 da segunda parte do trabalho, após 216 horas de exposição ao ensaio de névoa salina.

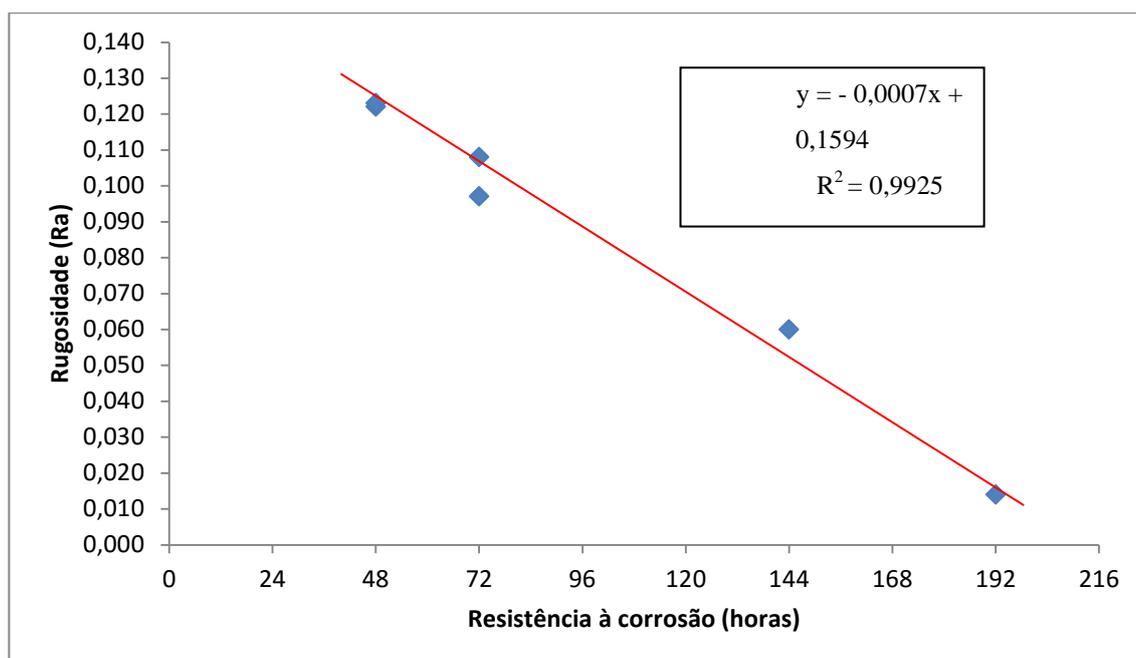


Os resultados indicam que a obtenção de uma superfície espelhada a partir de polimento com graxa animal e pasta levou a uma redução no valor de Ra. Comparando os resultados das Tabelas 4 e 5, fica evidente a associação entre a redução da rugosidade e o aumento do tempo na câmara de névoa salina, ou seja, da resistência à corrosão por cloreto. Entretanto, as Tabelas mostram que a perda em massa, por corrosão, da camada de cromo eletrodepositada foi maior nas amostras TCC 06 e 05, que foram mais resistentes à corrosão. Isso ocorre porque a corrosão nas amostras mais rugosas (TCC 01 a 04) ocorreu por ataque do cloreto nos vales e depressões da superfície, que receberam uma camada de cromo mais fina e incompleta. Os produtos de corrosão gerados, marcantemente FeCl_3 , têm dificuldade de difundir para a névoa úmida, ficando presos ao fundo dessas arestas. Isso resulta em uma falsa menor perda de massa, já que produtos de corrosão estão sendo pesados como metal base. Já em superfícies mais polidas, o ataque por cloreto da névoa salina, após um maior tempo de indução em relação às amostras mais rugosas, ocorre em uma superfície mais plana, impossibilitando acúmulos e facilitando a passagem dos produtos de corrosão para a névoa úmida.

A partir dos dados obtidos na primeira e segunda parte do trabalho foi possível traçar um gráfico entre a rugosidade da superfície em função das diferentes metodologias de preparação e a resistência à corrosão que esses corpos de prova apresentaram (Figura 30). O

gráfico mostra um comportamento linear com coeficiente de correlação linear $R^2 = 0,9925$, ou seja, o tempo de permanência na câmara de névoa salina ou a resistência à corrosão por cloreto e o parâmetro de rugosidade Ra são inversamente proporcionais.

Figura 30: Gráfico da relação entre a rugosidade dos corpos de prova com diferente preparação da superfície e tempo de resistência à corrosão.



Comparando os seis resultados de resistência à corrosão frente à rugosidade decorrente da preparação dos corpos de prova TCC 01, TCC 02, TCC 03, TCC 04, TCC 05 e TCC 06, pode ser observado que os corpos de prova TCC 05 apresentam um aumento de 75% no tempo de resistência a corrosão em relação aos TCC 02 e TCC 03. Esse resultado é devido à diminuição da rugosidade superficial obtida a partir de mudanças na preparação da superfície dos corpos de prova. Estes resultados indicam que a diminuição da rugosidade (através de polimento) gera uma maior resistência à corrosão. Portanto, a preparação realizada nos corpos de prova TCC 05 se mostrou a mais adequada para a solução de atendimento de exigência de horas de *Salt Spray* sinalizada por clientes em potencial. A partir desses resultados, é proposto um protocolo de preparação de barras de aço SAE 1045.

7.3 Protocolo de preparação de barras SAE 1045

1. Retirar a barra SAE 1045 de diâmetro desejado do feixe recebido da usina;

2. Fixar a barra entre os dois extremos de uma retífica, utilizando um rebolo branco.
3. Remover aproximadamente 0,03 mm de material base, utilizando refrigeração durante o processo;
4. Encaminhar para o torno polidor;
5. Realizar polimento com a sequência de lixas #220, #320, #400, #600 e #1200;
6. Realizar polimento utilizando roda de polimento de pano e graxa animal;
7. Polir utilizando pasta de polimento rosa de composição: óxido de alumínio, óleo vegetal, Gordura animal hidrogenada e corante em pó;
8. Medir a rugosidade da peça com auxílio de um rugosímetro, verificando se obteve uma rugosidade de aproximadamente 0,015 Ra, caso necessário, polir mais até obter a rugosidade ideal;
9. Encaminhar imediatamente para o setor de montagem, evitando expor a peça preparada por muito tempo antes de realizar a eletrodeposição.

8 AVALIAÇÃO DE CUSTOS

Para o cálculo de custos para o atendimento do protocolo de preparação de barras SAE 1045, devem ser considerados os valores de custos hora/máquina e o tempo demandado para cada etapa do processo. O valor de hora/máquina considera o custo do trabalho da máquina (energia elétrica gasta), valor da hora trabalhada do operador especializado em operar o maquinário e o material utilizado e gasto nesse período (rebolo, óleo solúvel, lixa, pasta de polimento, etc.). Esses cálculos de custo de hora/máquina são definidos pela empresa, sendo eles:

- Retífica: R\$ 50,00/hora
- Torno Polidor: R\$ 110,00/hora

Considerando que o tempo necessário para remoção de aproximadamente 0,03 mm de material base de uma barra de seis metros de comprimento, utilizando a retífica, é de 1,5 horas, e que o processo de polimento com a sequência de lixas e polimento com graxa animal e pasta leva em torno de 2 horas, visto que é necessário um polimento manual, o custo de preparação de uma barra de aço SAE 1045 de 30 mm de diâmetro e 6 metros de comprimento é de:

$$(R\$ 50,00 \times 1,5 \text{ h}) + (R\$ 110,00 \times 2 \text{ h}) = \mathbf{R\$ 295,00/barra}$$

Para cálculo de preço de venda deve ainda acrescentado os valores de cromagem correspondente a camada solicitada. A prática de venda de barra é realizada por kg, onde existe um cálculo teórico de quanto pesa uma unidade de barra. Uma barra de diâmetro de 30 mm e 6 metros de comprimento equivale a aproximadamente 33,30 kg.

Para atendimento de clientes que buscam melhor resultados frente à corrosão, deverá ser realizada a cobrança de um preço maior do que praticado hoje, visto que o novo procedimento é acrescido da etapa de retífica e um maior tempo na etapa de polimento.

9 CONCLUSÃO

Mesmo atendendo as necessidades dos clientes atuais, ainda há a necessidade de atender ao requisito de *salt spray* mínimo de 96 horas sinalizado por alguns clientes potenciais. A preparação da barra antes de ser cromada é de suma importância para que a corrosão ocorra somente após romper a camada do revestimento. Nesse sentido, foram feitos testes com alterações no processo de polimento para o desenvolvimento de um método de preparação da matéria-prima eficiente e que garanta a avaliação apenas do revestimento nos testes de névoa salina. A partir desse trabalho, no qual foram estudados os processos de preparação de barras SAE 1045, as seguintes conclusões podem ser feitas:

- A diminuição da rugosidade na etapa de preparação, obtida através do uso de um maior número de lixas de diferentes granulometrias durante o polimento, mostrou um aumento no número de horas de resistência à corrosão;
- A utilização de pastas de polimentos leva à diminuição da rugosidade e ao aumento da resistência a corrosão, de acordo com uma função linear inversamente proporcional entre Ra e o tempo de exposição à névoa salina;
- Uma superfície mais polida e uniforme mostrou um efeito benéfico para a qualidade da camada eletrodepositada de cromo, comprovada;
- O cromo é eletrodepositado de forma diferente nos picos e nos vales de uma superfície rugosa. Essa heterogeneidade da camada depositada tem uma menor resistência à corrosão do que camadas mais homogêneas.

A diminuição da rugosidade da superfície de preparação alcançou o objetivo de mínimo de 96 horas de resistência à corrosão. Frente aos resultados, para o sucesso no atendimento de maior número de clientes, deve ser realizada a alteração do processo de preparação de barras SAE 1045, conforme o protocolo proposto no presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BUZZONI, H. A. **Galvanoplastia**. São Paulo: Ícone, 1988. 68 p.
2. ENGELBERG, J. **Noções fundamentais de galvanotécnica**. São Paulo: Orientador, 1967.
3. ARAÚJO, N. V. S. **Galvanoplastia com cromo: diagnóstico das condições ambientais e ocupacionais em pequenas empresas**. 2006. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.
4. LAUSMANN, G.A. **Chromium Plating**. Stuttgart, 2006. 348p.
5. PASQUALINI, A. **Estudo de Caso Aplicado a Galvanoplastia**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC. Florianópolis, 2004.
6. REIS, L. G. **Tecnologia aplicada a processos galvânicos**. São Paulo: Ed. SENAI-SP, 2015. 324 p.
7. GENTIL, V. **Corrosão**. 3 ed. São Paulo: LTC, 1996. 210p.
8. BURGESS, W. A. **Identificação de Possíveis Riscos à Saúde do Trabalhador nos Diversos Processos Industriais**. Belo Horizonte: Ergo Editora, 1997.
9. CONSEMA N° 128: Dispõe sobre a fixação de Padrões de Emissão de Efluentes Líquidos para fontes de emissão que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul. 24 DE NOVEMBRO DE 2006.
10. TEIXEIRA, I. O., BARBOSA, A. H. A. **Estudo dos Parâmetros e das Técnicas de Medição de Rugosidade em Produtos Laminados a Frio**. Relatório final de estudo de P&D – RPPQ4436, 2004.
11. TEIXEIRA, I. O., BARBOSA, A. H. A., SANTOS, A. A.; ZACARIAS, J. J. **Análise da Influência dos Parâmetros Operacionais de Eletro galvanização na Rugosidade e no “Waviness”**. Relatório final de estudo de P&D – RPPR4410, 2006.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287**. Termos, Definições e Parâmetros de Rugosidade, Especificações Geométricas do produto (GPS) – Rugosidade – Método do Perfil, 18p., 2002.
13. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM B 117**: Standard Method of *Salt Spray* (FOG), ASTM Standards, 1973.
14. AMORIM, H.J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

15. MACHADO, A. R.; SILVA, M. B.; COELHO, R. T; ABRÃO, A. M. **Teoria da Usinagem dos Materiais**, 1. Ed., São Paulo: Blücher, 2009.
16. GABRIELSON, G. Complex ions in chromium plating solution. **Metal Finishing**, v.53, n.5, p. 56-58, 1955.
17. NUNES, L. T., **Análise estatística da influência dos parâmetros de corte na rugosidade no torneamento do aço microligado DIN 38MnSiVS5**. Dissertação (mestrado) em Engenharia Mecânica, FEMEC, Universidade Federal de Uberlândia, UFU, MG, 79 p. 2011.
18. SOUZA, D.O.; HAMMEL, N.P.; SANTOS, W.I.A.; RAMIREZ, A.H.; ROJO, N.; COSTA I. **Investigação da corrosividade do ensaio de névoa salina segundo Norma ISO 9227**. In: EBRATS, 2012, São Paulo.
19. WOLFART. M. J. **Nitreção a plasma do aço ABNT 316L em baixas temperaturas**. 2002. 91 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
20. DANILOV. F. I., PROTSENKO. V.S., BUTYRINA T.E., KRASINSKII V.A., BASKEVICH A.S., KWON S.C., LEE J.Y., Electrodeposition of Nanocrystalline Chromium Coatings from Cr(III) Based Electrolyte Using Pulsed Current. **Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces**, v. 47, n. 5, p. 598–605, 2011.
21. DANILOV. F. I., PROTSENKO. V.S. , BUTYRINA T.E., KRASINSKII V.A., BASKEVICH A.S., KWON S.C., LEE J.Y., Electrodeposition of Nanocrystalline Chromium – carbon Alloys from Electrolyte Based on Trivalent Chromium Sulfate Using Pulsed Current. **Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces**, v. 48, n. 3, p. 328–333, 2012.
22. DINGREMONT, N.; BERGMANN, E.; HANS, M.; COLLIGNON, P. Comparison of the corrosion resistance of different steel grades nitrided coated and duplex treated. **Surface and Coatings Technology**, v. 76-77, p. 218-224, 1995.
23. HORDIENKO, V. O.; PROTSENKO, V. S.; KWON. S. C.; LEE, J. Y.; DANILOV. F. I. Electrodeposition of chromium coatings from sulfate-carbamide electrolytes based on Cr(III) compounds. **Materials Science**, v. 46, n. 5, p. 647-652, 2011.
24. SALINA-BRAVO, V.M.; NEWMAN, R.C., An Alternative Method to Determine Critical Pitting Temperature of Stainless Steels in Ferric Chloride Solution, **Corrosion Science**, v. 36, n.1, p. 66-77, 1994.
25. SVENSON, E. **DuraChrome Hard Chromium Plating**. Flórida, 2006. p. 40.