

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA CAMADA ELETRODEPOSITADA DE COBRE SOBRE CHAPAS DE AÇO SAE 1045

Fabrcio Zimmer (autor), engfzimmer@gmail.com¹

Daniela Lupinacci Villanova (orientadora), daniela.villanova@farroupilha.ifrs.edu.br²

^{1,2}Instituto Federal de Educao, Cincia e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Av. So Vicente, 785, Cinquentenrio, Farroupilha/RS

Resumo: Os materiais ferrosos tendem a se decompor de modo natural quando expostos a uma atmosfera reativa, seja em ambiente natural ou algum meio artificial como na indústri. Desta caracterstica decorre o processo de corrosao, responsvel por significativo valor de perdas materiais e imateriais, evitvel atravs de diversas formas de proteo de superfcies. Neste trabalho discorre-se sobre a galvanizao, processo de recobrimento de superfcie ferrosa atravs de eletrodeposio metlica, bastante comum no meio industrial devido ao seu vantajoso custo benefcio. Realiza-se como forma de reproduo da teoria proposta um banho eletroltico de nove amostras de ao 1045 em soluo salina de CuSO_4 , seguido de avaliao quanto ao seu aspecto superficial, pesagem de massa em excesso, descolamento de camada e espessura de camada. Os resultados encontrados foram melhores para uma relao de maior tenso e tempo de banho, dentro do espectro analisado.

Palavras – chave: sulfato de cobre, ao, eletrólise, linha galvânica.

1. INTRODUO

A natureza dos materiais ferrosos é de conhecida degradao em ambientes naturais em funo de seu baixo potencial de reduo (facilidade em doar eltrons) quando em contato com espécies químicas como O_2 e H_2O . O impacto desse fenômeno pode ser percebido através de seus efeitos, que são destrutivos, perigosos e caros. Quando se calculam as perdas ocasionadas com os custos de manuteno de metais em diversas aplicaes, devido à ausncia de medida protetiva, chegam-se a valores bastante significativos. Um estudo realizado pela empresa americana *CC Technologies* apontou que a corrosao consome em média 5% do PIB de um país. Para o caso brasileiro, em estudo da IZA (*International Zinc Association*) junto com a USP, o valor apontado é de 4%, representando em 2015 R\$236 bilhões. Considerando-se pelo mesmo estudo que no litoral o nível de corrosao é até 150 vezes maior que no interior e que o Brasil possui mais de 7,4 mil quilômetros de costa atlântica, pode-se ter uma ideia da necessidade de tecnologias que proporcionem maior durabilidade para todo o ao exposto nessas condies. Mesmo assim, o país não desponta como grande aplicador de técnicas que aumentem a longevidade do ao e diminuam seu custo de manuteno.

Em outro estudo de 1998 nos Estados Unidos, realizado em parceria da *Federal Highway Administration (FHWA)* com a *National Association of Corrosion Engineers (NACE)* e a empresa *CC Technologies* calculou-se uma perda em 3,1% do PIB – US\$ 276 milhões – à época. Estima-se ali, também, que a adoo de técnicas simples e prticas de proteo contra corrosao poderia reduzir em torno de 25% dessa perda (Jambo & Fofano, 2008). Pensando de modo mais estrito, tomam-se exemplos das áreas que lidam com transferncia de calor e massa, nas quais tubulaes são parte fundamental e grandes vítimas da corrosao metlica; ou na relao da aplicao de estruturas e mecanismos, sejam motores à combustao sejam pontes móveis, o conhecimento sobre corrosao e formas de controlá-lo é essencial. Devido a essa presena constante na cadeia produtiva, seja qual for a natureza da indústria tal matéria é parte do cotidiano de um Engenheiro Mecânico.

Para lidar com esta caracterstica de modo a impedir ou ao menos retardar o processo de degradao por oxidao ou corrosao, existem técnicas diversas. Pode-se recobrir a área de interesse com tinta ou polímero, adicionar à mesma um ânodo de sacrifcio, realizar recobrimento metlico ou não-metlico, entre outras. De modo menos genérico, sabe-se que a eletrodeposio ou Galvanoplastia é comum nos meios descritos. Por isso tratar da mesma incide em atuar sobre fatores determinantes para o domínio das variáveis que conduzem a uma aplicao ótima, ou seja, que tornem o processo lucrativo e eficaz. Este tipo de deposio é comumente utilizado, pois se consegue revestir uma superfcie com uma camada muito fina e

livre de poros (Gentil, 2014). Esta é a técnica utilizada neste experimento. A mesma faz o uso de revestimento metálico da amostra com uma fina camada de cobre, fenômeno que ocorre em solução eletrolítica. Essa técnica é predominante nas indústrias do setor metal-mecânico, por fabricantes de componentes automotivos, máquinas e equipamentos agrícolas e motores em geral. Setores como o eletroeletrônico, calçadista e de ferramentas também utilizam peças com revestimentos, seja para melhorar a durabilidade dos componentes ou para efeito decorativo (TOCCHETTO 2004, *apud* WIERCINSKI, 2015), além da construção civil e da linha branca (CAVALCANTE, 2010). Entende-se, assim, que sua importância econômica esteja ligada à possibilidade de obter a proteção adequada com uma camada bastante fina, evitando-se o excesso de material depositado, o qual muitas vezes é bastante caro (Gentil, 2014).

Materiais também diversificados são utilizados para fazer o recobrimento ou receber a camada de eletrodeposição. Assim, têm-se o zinco, cobre, ouro, estanho, prata, cádmio (Gentil, *ibidem*) usados como metais para recobrimento, funcionando como ânodos e as ligas metálicas ferrosas são as mais comumente recobertas, fazendo o papel de cátodos. O resultado que normalmente se quer obter é o aumento da resistência à corrosão do metal base ao meio em que se encontra e/ou agregar acabamento superficial com finalidade estética. Com isso, cada processo tem sua metodologia, receita específica, o que implica no uso de aditivos que auxiliam na obtenção do resultado desejado.

Além disso, valores de tensão/corrente aplicados e tempo de banho também influenciam no produto final e devem ser controlados. Para a análise do parâmetro da tensão elétrica, muitas vezes usa-se um dispositivo, conhecido por Célula de Hull, através do qual se varia a densidade de corrente e avalia-se a qualidade das deposições. Neste trabalho, utilizou-se tal dispositivo para orientar quais valores de tensão apresentam os melhores resultados.

Assim, com aplicação em larga escala nos meios de produção dos mais diversos setores, logo, com impacto econômico inquestionável, entende-se a importância de compreender e aplicar as variáveis do processo. Para o profissional desta área este conhecimento é fundamental.

2. OBJETIVOS

O cobreamento não é apenas uma forma de promover proteção por si só, mas também faz parte de outros processos de recobrimento metálico, como a cromagem. Por apresentar reatividade com os outros metais aplicados, faz-se uso do cobre como uma camada base antes da aplicação do metal principal. Desta forma, ao se estudar o cobreamento, fala-se também em uma ampla gama de banhos eletrolíticos. Assim, este trabalho pretende demonstrar o funcionamento de uma linha de cobreamento em escala laboratorial através da definição da mais eficaz faixa de tensão aplicada ao banho com o uso de uma célula de Hull e apresentar a análise de deposições de cobre em placas de aço SAE 1045 sob três densidades de corrente relacionadas com a ideal em banho salino, em três diferentes tempos de exposição ao banho, avaliando a espessura de camada, aderência e a massa de cobre que foi adicionada ao metal base.

3. REVISÃO

3.1. Galvanoplastia

Consiste na redução de cátions metálicos presentes na solução eletrolítica e/ou provenientes do ânodo, que pode ser do metal a ser depositado sobre a superfície metálica que se quer revestir - em meio a um banho salino, contendo os sais do metal a ser depositado, no qual é aplicado uma diferença de potencial, que gera uma corrente elétrica. No processo, o metal doador é ligado à fonte elétrica como ânodo e o metal a ser revestido, como cátodo. Em função do custo é empregada para revestimentos de pequenas espessuras (1 a 30 μm) (Nunes, 2007).

3.2. Célula de Hull

Trata-se de uma unidade de pequena escala de um sistema de eletrodeposição projetada de modo a oferecer resultados de deposição que registram características de diversas densidades de correntes dentro da faixa de tensão adotada (Gezerman & Corbacioglu, 2010), neste caso, cerca de 15 V. Segundo Martins (2009), realizando-se um único ensaio com intensidade de corrente constante, obtém-se resultados equivalentes a inúmeros ensaios com densidade de corrente diversas. Isso ocorre em função da geometria e dimensões da célula (Fig. 1), cuja inclinação da parede onde se encontra o ânodo favorece tal variação.

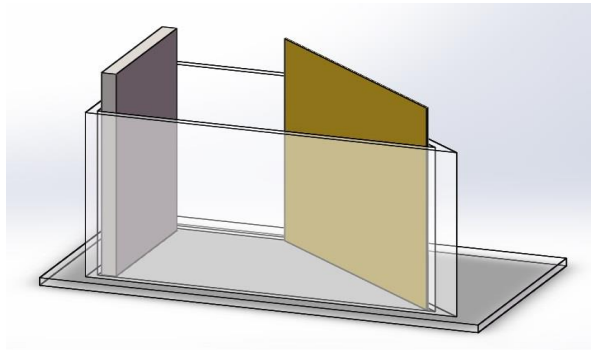


Figura 1: Célula de Hull
Fonte: própria

Porém, uma análise empírica da situação pode trazer resultados consideráveis: a existência de curvas de densidade de corrente traz precisão suficiente para aplicações práticas, pois a distribuição de corrente, que ocorre no sentido longitudinal da placa, é mais uniforme independente do eletrólito. Durante o desenvolvimento da célula, Hull propôs uma função logarítmica que determina as densidades de corrente que atingem cada região do ânodo para uma corrente aplicada. É assim descrita pela Eq. (1) (Lima et al, 2012):

$$I_c = I(5,1 - 5,24 \log x_c) \quad (1)$$

Onde,

I_c = densidade de corrente catódica (A/dm²);

I = corrente total na célula de Hull (A);

x_c = comprimento ao longo do painel de eletrodeposição (cm).

A partir dessa função foram criadas escalas que, colocadas sobre a placa eletrodepositada fornecem as densidades de correntes que atingiram diferentes regiões. Esse comportamento pode ser visto através do gráfico exposto na Fig. 2, que mostra uma vista de topo de uma célula de 275 ml, na qual percebe-se que a intensidade de corrente é maior próxima ao ânodo, diminuindo conforme aumenta a distância entre ânodo e cátodo.

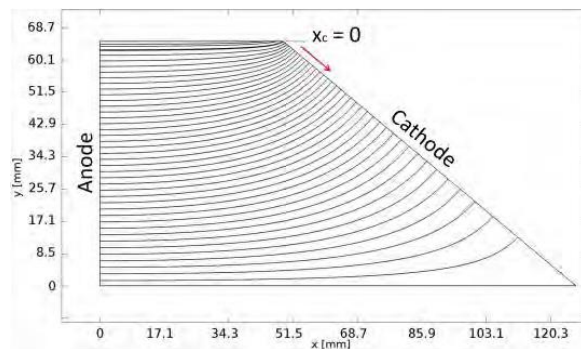


Figura 2: Linhas de densidade de corrente em célula de Hull

Fonte: Lima et al, 2012

3.3. Lei de Faraday da Eletrólise e equação da massa equivalente

O físico americano Robert Andrews Millikam determinou, em 1909, que a carga elétrica de um elétron é igual a $1,602189 \times 10^{-19}$ C. Sabendo que um mol de elétrons corresponde a $6,02214 \times 10^{23}$ e⁻, a quantidade de carga transportada pela passagem de um mol de elétrons é dada pelo produto entre esses dois valores, ou seja:

$$1,602189 \times 10^{-19} \times 6,02214 \times 10^{23} = 9,6485 \times 10^4 \text{C}$$

ou 96485 coulombs, que é a quantidade de carga elétrica transportada por um mol de elétrons, sendo denominada como Constante de Faraday. A importância em se conhecer tal constante recai sobre a possibilidade de se estimar a quantidade de massa transportada no processo do banho eletrolítico. Então, para se calcular a massa, primeiramente se desenvolve as duas leis de Faraday que tratam do tema (Atkins & Jones, 2012):

- I. A massa formada em um dos eletrodos é diretamente proporcional a carga elétrica que percorre o circuito;
- II. A massa formada em um dos eletrodos é diretamente proporcional ao equivalente de oxirredução da substância;

O *equivalente de oxirredução* (Eq) é a massa de um elemento que ganha ou perde um mol de elétrons. Tendo por base o enunciado das duas Leis, estabelece-se, pela Eq. (2):

$$Eq = \frac{A \text{ (massa atômica do material)}}{Nox \text{ (número de elétrons que variaram)}} \quad (2)$$

Deste termo, que é a portanto a relação entre a massa atômica do elemento com seu número de oxidação alimenta-se a Eq. (3):

$$m = \frac{Eq * i * t}{96485} \quad (3)$$

Onde,

m = massa (g);

Eq = equivalente de oxirredução;

i = corrente (A);

t = tempo de deposição (s);

Neste trabalho os valores previstos foram calculados e apresentados como boa prática quando da realização de banhos eletrolíticos. Porém, a confecção das amostras não permitiu que se obtivessem modelos absolutamente idênticos, de modo que a pesagem após o banho não foi realizada; somente aquela do material retirado em excesso, que tem outra finalidade e não pode ser livremente comparado com esta equação.

4. METODOLOGIA

4.1. Materiais utilizados

Para a realização dos banhos utilizaram-se os seguintes materiais:

- 0,5 m² de Policarbonato® e adesivo para confecção da linha galvânica;
- 3 L de água destilada para a utilização nos recipientes de decapagem básica e ácida, água de lavagem e banho salino;
- 100 mL de sabão neutro líquido para remoção de sujidades e camada de óleo;
- 1kg de Sulfato de Cobre (CuSO₄);
- Fonte de tensão 30 V - CC;
- Cabos de cobre como ânodo;
- Chapas de aço SAE 1045 com 90 mm por 70 mm como cátodo;
- Cabos de ligação para ânodo e cátodo;
- Célula Hull de 275 mL;
- Solução de ácido nítrico 2% para decapagem P.A.;
- Hidróxido de Sódio para Base P.A.

4.2. Confeção da linha galvânica

A chapa de Policarbonato®, com 8 mm de espessura, foi inicialmente cortada em peças de 100 mm x 100 mm em máquina de corte laser, de modo que suas arestas estivessem uniformes o suficiente para facilitar o encaixe e a colagem com suas iguais, em formato cúbico. As medidas adotadas levaram em conta o tamanho de uma célula de Hull disponível onde se testaram os banhos e a variação da densidade de corrente como atividades preliminares ao projeto. Assim, com volume 50% maior, considerou-se o uso de uma amostra que permita razoável variação de área de recobrimento a olho nu, melhor manuseio e utilização de material disponível.

Foram montados cinco recipientes para a linha, consistindo em:

- 1 para decapagem ácida
- 2 para águas de lavagem
- 1 para decapagem básica
- 1 para o banho eletrolítico

4.3. Análise de densidade de corrente em célula Hull – Pré-teste

A preparação do banho (Fig. 3) contou com 50 g de sulfato de cobre como agente salino diluídos em 275 ml de água destilada. Para a galvanoplastia foram empregados 50 g de fio de cobre como ânodo e uma chapa de aço SAE 1040 como cátodo. Efetuou-se a variação da tensão entre 5 V e 30 V para que se definisse qual seria a faixa com melhor recobrimento. Após testes realizados, observou-se que as tensões deveriam girar próximo aos 15 V, por apresentar um recobrimento com boa adesão e com menor excesso de deposição, isto é, aquele que não adere à superfície.

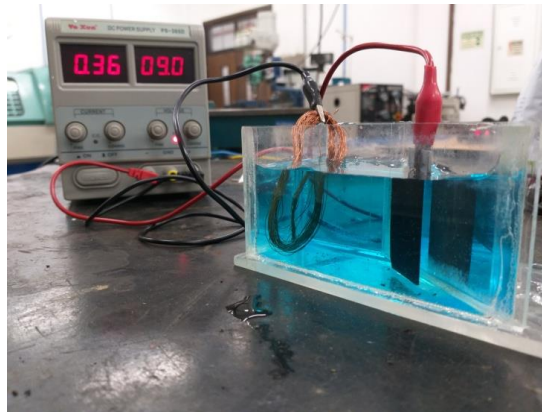


Figura 3: Determinação da faixa de corrente ideal do banho em célula de Hull.
Fonte: autor

4.4. Preparação da linha galvânica

Os recipientes foram colocados em linha de modo a seguir uma sequência, conforme se observa na Fig. 4. Em cada um foi adicionado o líquido correspondente e a ordem seguida foi a da aplicação do produto, intencionando preparar a peça para a eletrólise. Dessa forma, a ordem observada foi: desengraxe químico com água e sabão, decapagem ácida, água de lavagem, decapagem básica, água de lavagem e banho eletrolítico.

Para a eletrólise, conforme visto na Fig. 4, garras jacaré seguraram as amostras. Para o uso das demais etapas as amostras foram manuseadas com luvas nitrílicas. Salienta-se que a utilização de um ânodo de cobre mais o cobre presente no sulfato é intencional para reforçar a presença do elemento no processo.

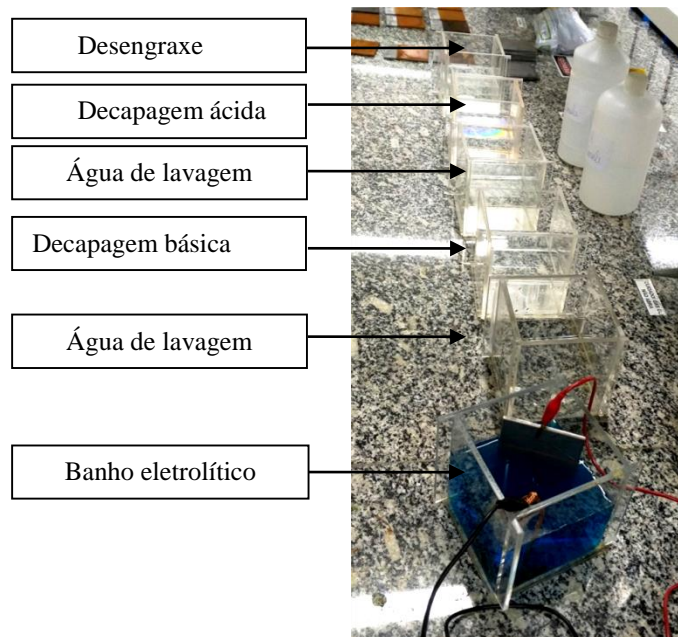


Figura 4: Linha galvânica montada.
Fonte: autor

4.5. Execução dos banhos

O primeiro passo consistiu em passar a amostra em água e sabão para desengraxe, aumentando a molhabilidade da mesma. Realizou-se um teste de molhabilidade para que se percebesse o quanto o desengraxe foi eficaz (Fig. 5). Conforme o autor percebeu, não houve significativa diferença entre o material antes e depois do desengraxe. Mesmo com o uso de esponja com sabão adsorvido não houve significativa diferença na superfície das amostras.



Figura 5: Amostra com gotas d'água antes do desengraxe.
Fonte: autor

O tempo de permanência nos tanques de decapagem foi de 2 min, movimentando-se a peça com o intuito de forçar o contato da superfície metálica com o ácido e a base.

Os tempos dos banhos eletrolíticos foram definidos em 5 min, 15 min e 30 min, sob três diferentes faixas de tensão (5 V, 10 V, 15 V). A escolha de três tensões não ocorreu a despeito do que se observou na célula de Hull, mas como conhecimento suplementar que permita fazer comparações entre os efeitos obtidos. Na Fig. 6 observa-se o banho de cobre.

Percebeu-se a ocorrência de carbonatos que se desprenderam das amostras durante os banhos, gerando camada sedimentada no fundo do recipiente de banho eletrolítico. Com o passar do tempo esses elementos passaram a causar diminuição na densidade de corrente do banho e consequente aumento da tensão pela fonte. Foi necessário fazer a retirada deste material não-reativo e corrigir a quantidade de CuSO_4 entre os banhos.

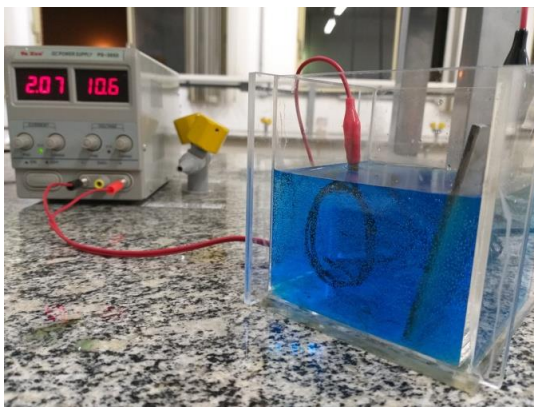


Figura 6: banho eletrolítico de sulfato de cobre
Fonte: autor

4.6. Caracterização

Os testes realizados para avaliar o cobre depositado sobre as amostras foram, de acordo com a ordem:

- Inspeção visual
- Raspagem e pesagem do cobre em excesso;
- Teste de aderência, segundo norma técnica NBR 7398:2015
- Profundidade de camada, através de medidor de espessura de camada MCT-401 Minipa

5. RESULTADOS

5.1 Inspeção visual

À primeira vista, a escolha por uma faixa de referência de tensão e de tempo, proposta com o uso de uma célula de Hull mostrou-se eficaz: as amostras de 5 V de exposição exibiram melhor resultado visual em relação as outras faixas de tensão, conforme Fig. 7. Porém, se observado o fator tempo, independentemente da tensão, aquelas com menor exposição ao banho parecem ter apresentado melhor adesão do ânodo com menor excesso. Também se percebe que o tempo faz adicionar camada sobre camada de cobre no cátodo, sendo que após as camadas iniciais já não há mais contato entre a superfície do aço e o cobre desprendido do banho. Isto pode ser verificado na quantidade de material que foi retirado no excesso de cobre obtido no processo de raspagem.

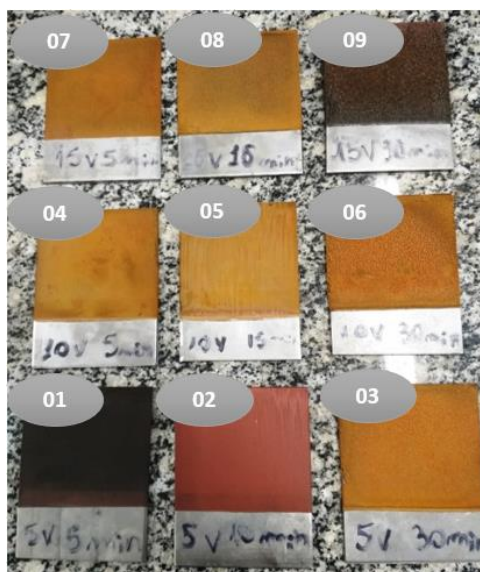


Figura 7: amostras prontas
Fonte: autor

Nota-se que existe diferença entre as amostras em relação às suas cores. Verificações posteriores não evidenciam relação entre as cores e a qualidade dos depósitos; portanto, aventou-se que essa coloração esteja relacionada com uma possível “queima” do banho, que ocorre quando há excesso de corrente no mesmo. Este fenômeno ocorre no ajuste inicial do banho e ao durante a troca de amostras, sendo necessário corrigir a tensão na fonte bem como a quantidade de cobre presente no sistema. Apesar da imagem não permitir que se veja, a textura e volume das peças vão se diferenciando conforme se alteram tempos de banho e tensões aplicadas. Observou-se que o aumento da tensão ou aumento do tempo de banho geraram uma camada de excesso de cobre de maior volume. Não é possível inferir, no entanto, que o excesso de camada seja devido somente a esses fatores.

5.2 Raspagem e pesagem do cobre em excesso

As amostras foram raspadas com uma lâmina (Fig. 8) e tiveram sua massa de cobre em excesso verificada em uma balança de precisão (Fig. 9 e 10).



Figura 8: Amostras de 30min após raspagem do excesso de cobre.

Fonte: autor



Figura 9: Amostra íntegra e espátula.

Fonte: autor



Figura 10: Excesso de cobre pesado em balança de precisão.

Fonte: autor

O cálculo da Massa Equivalente (Eq. 3) apresentou os resultados demonstrados na Tab. 1:

Tabela 1. Valores da massa equivalente (g).

Tensão (V)	Tempo (min)		
	5	15	30
5	0,49 g	1,48 g	2,96 g
10	0,98 g	2,96 g	5,92 g
15	1,48 g	4,44 g	8,88 g

Logo após a inspeção visual foi feita a raspagem do material em excesso das amostras com a espátula mostrada na figura 9. O material coletado com a raspagem foi pesado e exposto na Tab. 2. Percebe-se que, ao aumentar o tempo e a densidade de corrente aumentou também a massa de depósito, o que era esperado. É importante observar essa medição pois é o único parâmetro disponível neste experimento para comparar com os valores obtidos com o cálculo da Massa Equivalente, que mesmo com baixa precisão informam se o experimento está apresentando resultados coerentes com o previsto.

Tabela 2. Massa adicionada em excesso.

Tensão (V)	Tempo de banho (min)	Amostra	Massa em excesso (g)
5	5	01	0,21
	15	02	0,35
	30	03	2,41
10	5	04	0,34
	15	05	1,40
	30	06	4,59
15	5	07	0,15
	15	08	1,31
	30	09	7,10

A relação entre o cálculo realizado e o excesso de massa apresentado mostra que há mais fatores a serem considerados na deposição. A equação leva em consideração a variação da tensão e do tempo, implicando em uma maior influência no tempo do banho (Tab. 3) – posto que o mesmo é dado em segundos e é numericamente superior a tensão aplicada. Além disso, não avaliou a concentração do banho, cuja quantidade de cobre tende a diminuir ao longo do processo.

Tabela 3. Média de massa em excesso por tempo de banho.

Tempo (min)	Massa (g)
5	0,24
15	1,02
30	4,70

Nesse outro comparativo (Tab. 4), observa-se a média da massa em excesso em função da tensão.

Tabela 4. Média de massa em excesso por tensão.

Tensão (V)	Massa (g)
5	0,99
10	2,12
15	2,85

Na Tabela 5 os valores da média da massa em excesso das Tab. 3 e 4 foram compilados em duas colunas e foi obtida a razão entre os valores da amostra feita depois pela anterior, ou seja, verificando se houve uniformidade no surgimento da massa em excesso em um primeiro momento e em qual condição se manteve maior uniformidade num segundo momento. Como se observa, a variação entre amostras é maior quando se aumenta a tensão do banho em relação ao aumento do tempo de exposição ao banho.

Tabela 5. % de variação de massa em excesso entre amostras.

Média de massa em excesso por tensão (I)	% de variação da amostra seguinte pela anterior (I)	Média de massa em excesso por tempo (II)	% de variação da amostra seguinte pela anterior (II)
0,99	***	0,24	***
2,12	47%	1,02	24%
2,85	74%	4,70	22%

Por fim, a Tab. 6 mostra a relação entre massa em excesso obtida na pesagem e a Massa Equivalente prevista nos cálculos pela equação 3. Assim, os valores da Tab. 2 foram divididos pelos valores da Tab. 1, cada amostra pela sua correspondente (por exemplo, 5 V 5 min Tab. 2 pela 5 V 5 min Tab. 1, etc.) e o resultado apresentado de forma percentual, permitindo enxergar o quanto da massa em excesso faz parte da Massa Equivalente, isto é, daquela massa total transferida, ainda que de maneira aproximada. Percebe-se que maiores valores de corrente e maior tempo vão produzir excessos maiores, mas para este estudo, não necessariamente a menor corrente e tempo menor produzem menos desperdícios; de fato, a menor faixa de desperdícios encontra-se em 15 V.

Tabela 6. Relação entre massa em excesso e massa equivalente

Tempo (min)	% conforme tensão		
	5	10	15
5	44%	34%	11%
15	24%	48%	29%
30	82%	78%	80%

5.3 Teste de aderência

A realização deste teste se deu com base na NBR 7398:2015, que fornece os parâmetros para que se possa avaliar a aderência do metal depositado sobre o substrato metálico. São riscadas nas chapas metálicas, (Fig. 11) em baixo relevo e com uma punção aguçada, oito linhas verticais e outras oito linhas horizontais cruzando as primeiras ortogonalmente, com um intervalo de 1,5 mm de distância entre uma e outra. O adesivo não é especificado na norma, porém optou-se pelo que fosse mais largo e com maior adesividade à disposição, nesse caso, uma fita adesiva para embalagens.



Figura 11: Marcação de estrias seguindo norma NBR 7398:2015.
Fonte: autor

Após os riscos serem feitos, a fita adesiva é colada (Fig. 12) sobre o local grafado e retirada de maneira abrupta, levando consigo pequenos fragmentos de depósitos de cobre. Uma nova análise visual, permite comparar as quantidades retiradas da área quadriculada com todas as amostras. A Fig. 13 mostra como ficaram as amostras após o descolamento. Vale lembrar que o deslocamento ocorre na camada efetivamente depositada sobre a superfície metálica, pois já havia sido realizada a raspagem do material em excesso. A numeração mostrada nessa mesma figura segue a orientação mostrada na Tabela 2.



Figura 12: Fita adesiva sobre local estriado.
Fonte: autor

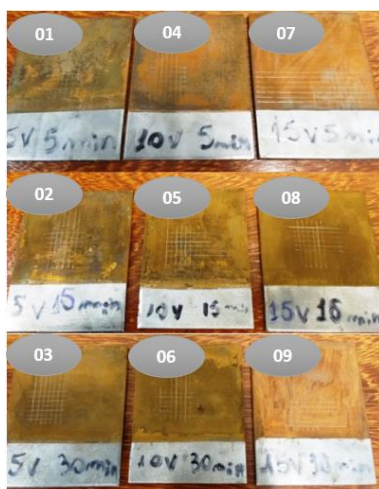


Figura 13: Amostras após descolamento.
Fonte: autor

Novamente é feita análise visual do estado da amostra e da fita destacada, procurando observar quantitativamente, o quanto de revestimento ficou aderido no aço e quanto ficou aderido na fita. A maior adesão é, portanto, percebida quando não ocorreu o deslocamento durante o procedimento. No entanto, a profundidade da camada só é dada no teste seguinte, o que ajuda a conferir se há de fato qualidade na deposição. Observou-se que a melhor resistência ao deslocamento se deu na amostra de 15V e 10 min e a pior resistência foi apresentada pela amostra de 5V e 5 min.

5.4 Espessura de camada

O primeiro passo para tal análise consiste na verificação do instrumento, que é realizada de acordo com o manual de instruções do mesmo. Após esta etapa foram realizadas medições em três pontos das amostras: na parte superior, central e inferior; de modo que se pudesse levar em consideração a variação na densidade de corrente e que um eventual excesso de deposição localizado não afetaria os resultados como um todo (Fig. 14).



Figura 14: medição de espessura
Fonte: autor

Com a análise dos resultados dessas medições (Tab.7) observa-se que o aumento na espessura não vem necessariamente com o aumento da tensão ou do tempo do banho. Para esta análise foi feito o somatório dos valores das colunas Alto, Médio e Baixo, referentes aos pontos em que foram feitas as medições em cada amostra e dividido pelo número de medições por amostra, 3, em uma média simples. Os resultados geram a coluna Média, que esta sim, ajuda a perceber a qualidade da espessura do recobrimento (quanto maior a camada, melhor foi o recobrimento).

Tabela 7. Espessura de camada adicionada medida em três pontos ao centro da peça (μm).

Tensão (V)	Tempo de banho (min)	Alto	Meio	Baixo	Média
5	5	115	218	105	146
	15	198	255	244	232
	30	165	254	219	213
10	5	205	221	237	221
	15	175	230	137	181
	30	244	168	201	204
15	5	253	230	213	232
	15	166	158	154	159
	30	258	238	237	244

Acredita-se, sim, que haja essa tendência, explicável pela equação da massa equivalente e a continuidade da adição enquanto haja o processo, tanto quanto também se aumentar a tensão (e por consequência a densidade de corrente); porém isso não fica claro. Separadamente, levando em consideração a variação do tempo de banho (Tab. 8) é possível notar que tempos maiores podem incidir em aumento de camada.

Tabela 8. Espessura média por tempo de banho (μm).

Tempo (min)	Alto	Meio	Baixo	Média
5	191	223	185	200
15	180	214	178	191
30	222	220	219	220

Quando é considerada a variação na tensão, o mesmo se aplica. Observa-se essa condição na Tab. 9.

Tabela 9. Espessura média por tensão aplicada no banho (μm).

Tensão (V)	Alto	Meio	Baixo	Média
5	159	242	189	197
10	189	243	233	222
15	182	235	198	205

5.5 Demais observações

A concentração de cobre no banho ao longo das nove amostras tende a diminuir, devido à formação de carbonatos, conforme observado no experimento de Sobral (*et al*), o que naquele caso implicou numa menor eficácia de deposição com o passar do tempo. Para corrigir este efeito, foi trocado o eletrodo de cobre, que apresentou desgaste após a quinta amostra por outro de mesmo material em estado intacto. Também observado pelos autores, ocorre a diminuição da corrente elétrica no banho devido ao mesmo motivo: presença de compostos que reagiram com o cobre e não são mais efetivos. Para tanto, observar a tensão no processo foi essencial para manter a uniformidade.

6 CONCLUSÕES

Após as análises apresentadas pôde-se chegar as seguintes conclusões:

- As análises visuais mostram que o excesso de cobre depositado aumenta conforme se aumenta a tensão ou o tempo de banho. Algumas amostras apresentaram coloração diferente do conjunto, mas tal diferenciação não se traduziu em dados distintos do conjunto.
- A raspagem realizada indicou que o aumento do tempo implicou em maior média de massa do cobre em excesso, em relação ao aumento da tensão;
- Os dados obtidos com a equação da massa equivalente mostram que o excesso de depósitos se sobrepõe significativamente a quantidade adicionada de fato ao aço;
- No teste de aderência de camada observa-se que, aparentemente, as maiores tensões parecem ter sido mais eficazes na durabilidade da cobertura;
- Se levado em consideração apenas o fator tempo ou densidade de corrente, ambos elevados, no limite apresentam a criação de uma superfície íntegra que não adere ao aço, podendo ser retirada com a mão;
- Quando avaliada a espessura em certos pontos da peça nota-se que a região central, que estava mais próxima do eletrodo de cobre, tem uma média de camada superior às duas outras regiões; isso indica que a distância entre ânodo e cátodo é fator relevante para uma melhor cobertura.
- Quando analisados separadamente tensão ou tempo de banho e suas camadas médias, pode-se notar com alguma clareza que, de fato, maiores tempos de exposição à eletrólise e maior tensão aplicada vão gerar maior espessura de camada e com ela maior perda de material.
- A diminuição na densidade de corrente causada pela maior presença de carbonatos incide em menor aderência do cobre na superfície da amostra;

7 REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7398: 2015. *Produto de aço e ferro fundido galvanizado por imersão a quente – Verificação da aderência do revestimento – Método de Ensaio*. ABNT, Rio de Janeiro 2015.
- CAVALVANTE, Tâmara S. L., *Avaliação da Resistência à Corrosão de Aços Revestidos ou não com Zinco Fosfatizados e Pintados*. Dissertação de mestrado, UFMG, Belo Horizonte, 2010.
- TOCCHETO, André Lopes, *et al – Indústria Galvânica do Rio Grande do Sul: avaliação do gerenciamento ambiental sob a ótica das melhores técnicas disponíveis (B.A.T)*. XIII SIMPEP, Bauru, São Paulo, 2006.
- NUNES, L. P., *Fundamentos de Resistência à Corrosão*. Editora Interciência, IBP ABRACO, São Paulo, 2007.
- LIMA, F. *et al.*, *Simulation of current density for electroplating on silicon using a Hull cell*. COMSOL Conference in Milan, 2012.
- GEZERMAN, Ahmet O. & CORBACIOGLU, Burcu D. *Analysis of the characteristics of nickel-plating baths*. International Journal of Chemistry, vol. 2, n° 2, agosto de 2010.
- NUNES, L. de Paula. *Fundamentos de Resistência à Corrosão – Rio de Janeiro*: Interciência: IBP: ABRACO, 2007.
- SILVA, Angélica I. F, AFONSO, Júlio C., GONZAGA, Luiz G. S., *Avaliação do efeito da concentração de carbonato na eletrodeposição de cobre sobre discos de aço carbono*. Química Nova, vol. 31, n° 7, São Paulo, 2008.
- Corrosão e degradação dos metais*.PMT-2100 Introdução à Ciência dos Materiais para Engenharia. USP, São Paulo, 2005.
- <https://abgalva.org.br/preco-de-metais/dados-do-setor>, visitado em 30 de julho de 2019.
- GENTIL, V. *Corrosão*. 6ª edição [Reimpr.]. LTC, Rio de Janeiro, 2014.
- JAMBO, H. C. M., FÓFANO, S., *Corrosão – Fundamentos, Monitoração e Controle*. Ed. Ciência Moderna Ltda, Rio de Janeiro, 2008.

EVALUATION OF THE QUALITY OF THE COPPER ELECTRODEPOSITED LAYER ON SAE 1045 STEEL SHEETS

ABSTRACT

Fabrizio Zimmer (autor), engfzimmer@gmail.com¹

Daniela Lupinacci Villanova (advisor), daniela.villanova@farroupilha.ifrs.edu.br²

^{1,2}Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Av. São Vicente, 785, Cinquentenário, Farroupilha/RS

Abstract: Ferrous materials tend to decompose naturally when exposed to a reactive atmosphere, either in a natural environment or in an artificial environment such as in industry. This characteristic results in the corrosion process, responsible for significant value of material and immaterial losses, avoidable through various forms of surface protection. This work discusses the galvanization, a process of coating of ferrous surface through metallic electrodeposition, quite common in the industrial environment due to its advantageous cost benefit. An electrolyte bath of nine 1045 steel samples in CuSO₄ salt solution is performed as a reproduction of the proposed theory, followed by evaluation of its surface appearance,

excess mass weighing, layer detachment and layer thickness. The results found are better when there is a relationship of higher voltage and bath time, within the analyzed spectrum.

Keywords: *copper sulfate, steel, electrolysis, galvanic line.*