



## ANÁLISE DE FALHAS EM REVESTIMENTOS DE ZINCO ELETRODEPOSITADOS EM AÇO TEMPERADO E REVENIDO

### 1 INTRODUÇÃO

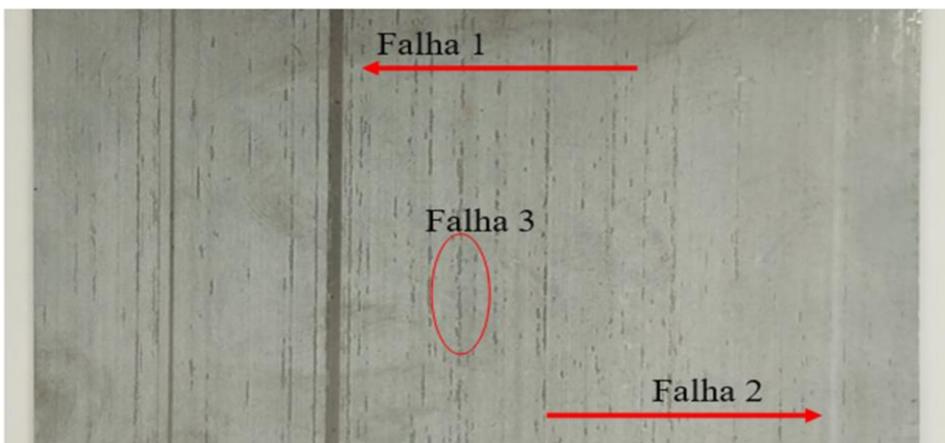
Um revestimento é uma camada aplicada a um objeto, visando melhorar sua estética e resistência, entre outras características. No caso do aço, a aplicação de revestimentos de zinco por eletrodeposição protege o substrato pela proteção catódica sacrificial. Este método é preferível por seu baixo custo operacional, capacidade de depositar uniformemente o revestimento e facilidade de controle do processo. O processo de revestimento inclui etapas importantes como desengraxe e ativação da superfície do aço para remover impurezas e preparar a base para o zinco. O tratamento térmico também modifica as propriedades dos aços, aumentando resistência mecânica e à corrosão. A combinação desses processos, como tratamento térmico seguido de revestimento, é comum para aumentar a durabilidade do material. Estudos analisam a influência da superfície formada durante tratamentos térmicos no subsequente processo de revestimento por eletrodeposição, visando minimizar defeitos e falhas no revestimento.

### 2 METODOLOGIA

#### 2.1 INVESTIGAÇÃO DA FALHA

O material analisado passa por têmpera, revenimento e revestimento por eletrodeposição, um processo padrão para clientes que precisam de materiais com propriedades de tratamento térmico e resistência do revestimento de zinco. Após o tratamento térmico, falhas de aderência do revestimento são observadas durante a eletrodeposição, manifestando-se como arrancamento da camada de zinco. As causas dessa falha podem ser uma camada de óxido formada durante os processos térmicos ou contaminantes na superfície após tratamentos térmicos. A falta de um tratamento superficial adequado entre os processos permite que esses elementos permaneçam, comprometendo o revestimento. A introdução de uma etapa de polimento com pasta abrasiva mostrou-se positiva, melhorando a aderência do zinco e reduzindo problemas de arrancamento, evidenciando a importância da preparação da superfície.

Figura 01 – Amostra com falha



Fonte: Autor, 2024.

Figura 02 – (a) Amostra sem polimento e (b) Amostra com polimento.



Fonte: Autor, 2024.

#### 2.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental consiste em analisar as falhas ocorridas nos materiais revestidos com zinco por meio da eletrodeposição, após o tratamento térmico e o revenimento. A análise do desprendimento na superfície do material, que ocorre durante o processo de revestimento, será realizada e comparada com materiais que atendam às especificações do cliente e estejam em conformidade com o processo. A análise visual é de extrema importância, pois fornece a evidência mais relevante de possíveis problemas durante o processamento do material. Além da análise visual, serão conduzidas medições de espessura do revestimento em pontos onde ocorreram as falhas, comparando com pontos onde não houve falhas.

Também serão realizados ensaios de Fluorescência de raio-X (XRF) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para identificar possíveis discrepâncias nas áreas afetadas pelas falhas, além de verificar a presença de óxido e/ou contaminantes como chumbo e bismuto entre a camada de revestimento e o substrato metálico base, por meio de MEV com Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS).

Um teste de laboratório amplamente reconhecido e validado é a célula de Hull, na qual o analista pode avaliar o banho utilizado e as modificações necessárias para alcançar a superfície desejada de revestimento. No entanto, neste trabalho, o teste da célula de Hull será empregado para avaliar a eficiência da aderência do revestimento no substrato.

Assim como no processo de produção, a chapa utilizada como substrato na célula de Hull deve estar devidamente desengraxada e limpa.

Para o estudo em questão, utilizaremos o banho em condições e concentrações típicas do processo, variando apenas as superfícies das amostras temperadas e revenidas. O objetivo é entender como o revestimento reagirá em cada tipo de condição de superfície.

#### 2.3 ENSAIOS REALIZADOS

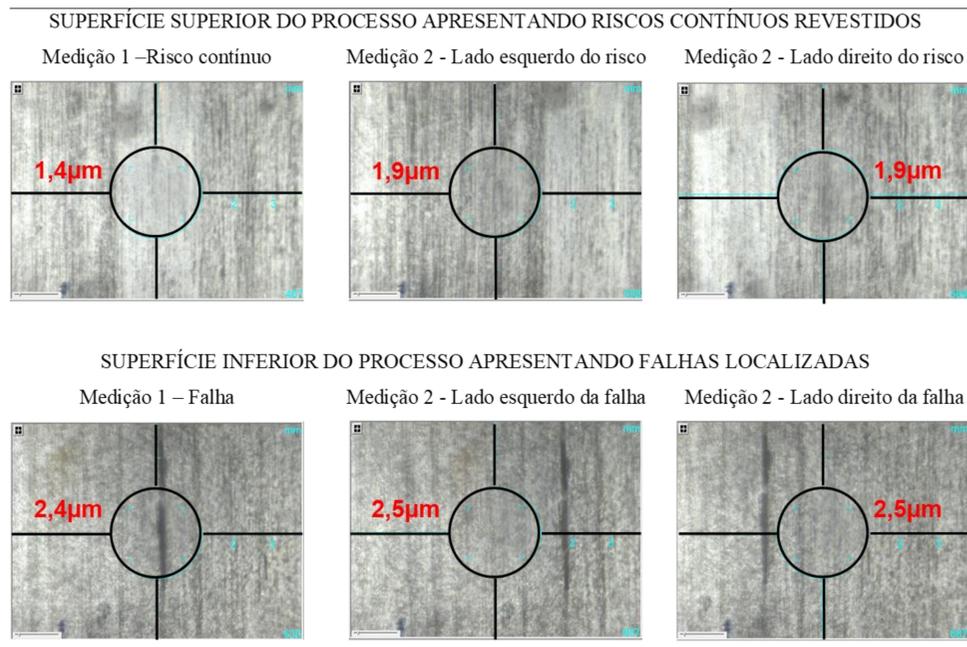
- XRF – Fluorescência de raio-x
- Ferritoscópio
- Rugosidade
- Célula de Hull
- Análise macro
- MEV – Microscopia eletrônica de varredura
- Medição de camada revestida



## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 MEDIÇÃO DA CAMADA DEPOSITADA

Figura 03 – medição de camada revestida



Fonte: Autor, 2024

Os resultados das medições indicam que a camada na superfície superior do processo é menor em comparação com a superfície inferior, isto pode ser proveniente de variações no processo como densidade de corrente aplicada entre outras variações. Além disso, observa-se uma diferença de 0,5 micrômetros na superfície superior entre a medição realizada sobre a falha 2 da figura 1 e aquela feita ao lado da falha, e diferença de 0,1 micrômetros na superfície inferior nas falhas localizadas (falha 3).

Considerando que a área de medição do raio x abrange uma área maior do que a própria falha localizada (falha 3), não podemos considerar que a camada seja medida no ponto exato da falha. No entanto, na superfície superior, onde há o risco contínuo (falha2), ou seja, onde o perímetro de medição está totalmente dentro do risco, a camada ali presente é validada.

A variação de 0,1 ou 0,2 micrometros não é considerável quando comparada com a ampla faixa solicitada pelo cliente. No entanto, a diferença de 0,5 micrômetros na camada superior torna-se relevante quando consideramos uma amostra de um material que deveria ter 2,5 micrômetros de camada de zinco depositada e é processada em cinco tanques de zinco, onde a proporção da camada depositada por tanque é de 0,5 micrômetros, equivalente a falta de espessura de camada no risco. Portanto, o risco gerado por arrancamento mecânico foi revestido no tanque seguinte, demonstrando que mesmo após o revestimento, há uma variação na espessura da camada ao longo da sequência dos tanques processados.

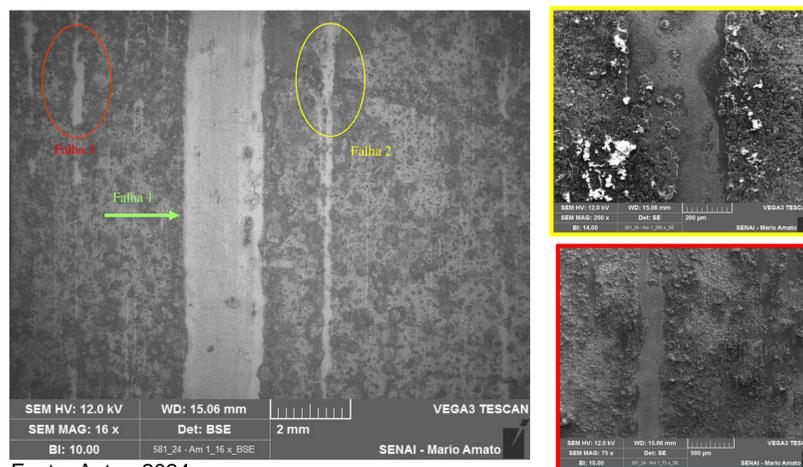
A discrepância da camada revestida nas falhas de revestimento foi observada e verificada no ensaio de MEV.

### 3.2 MEV – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

As imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das amostras analisadas e discutidas na seção de análise de falhas (Figura 1) revelaram características notáveis da camada revestida. Na Figura 4, as falhas 1 e 3 correspondem às mesmas falhas apresentadas na Figura 1, enquanto a falha 2 é semelhante ao risco contínuo observado nas células de Hull.

Ao observar com maior aumento as falhas 2 e 3 (Figura 4), verifica-se a descontinuidade da camada revestida nesses pontos, além de uma profundidade significativa nas ilhas de zinco depositado. Nos locais onde as falhas foram indicadas, nota-se que a superfície é mais lisa em comparação com a superfície ao seu redor.

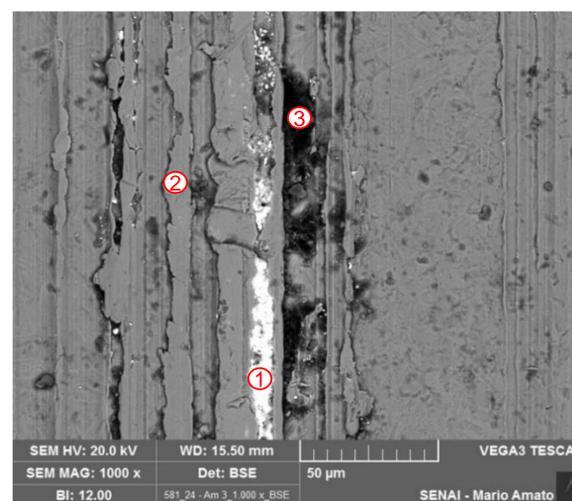
Figura 4 – Amostra temperada, revenida e revestida – MEV, 16x.



Fonte: Autor, 2024

A presença de chumbo e bismuto (1), foram caracterizados por EDS, além da presença de regiões com alta concentração de ferro em forma de patamares amassados (2), e algumas regiões com excesso de carbono (3). Observou-se que, em sua maioria, esses elementos não estavam localizados sobrepostos ou em colônias, mas dispersos pela superfície. Uma explicação plausível para esse fenômeno é que o excesso de chumbo e bismuto, após o contato com o material na cabine correspondente, não foi totalmente retido pela prensa de saída, o ferro seja proveniente de alguma transferência por contato com alguma peça do processo e o carbono seja explicado devido o contato do material com placas de grafite durante seu processamento.

Figura 5 – Amostra temperada, revenida e revestida – MEV, 1000x.



Fonte: Autor, 2024

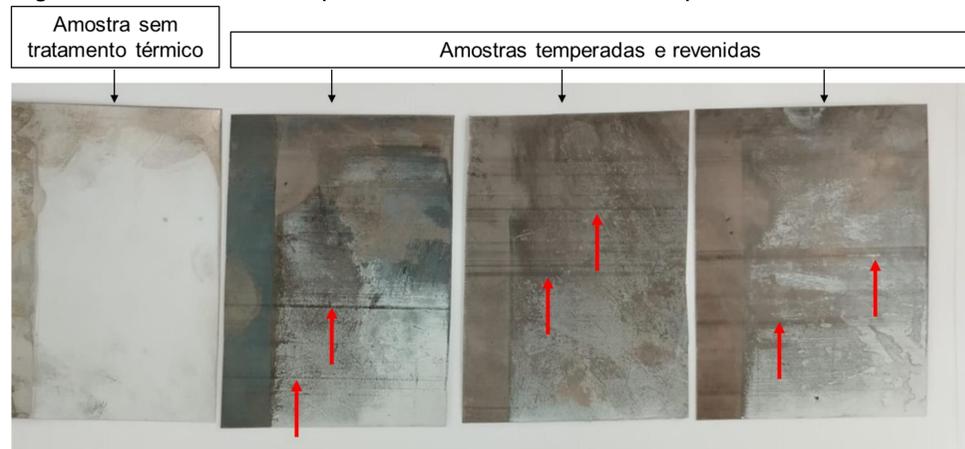


### 3.3 CÉLULA DE HULL

Os resultados obtidos por meio do ensaio de célula de hull, revelam uma dificuldade de aderência da camada de zinco ao substrato em ambas as amostras com tratamento térmico, apresentando um aspecto de não uniformidade. A figura 06 visualmente demonstram essa dificuldade, com o zinco sendo depositado apenas no início da chapa, havendo interrupção da deposição à medida que se distância da borda da amostra próxima ao ânodo.

Conforme indicado na revisão bibliográfica (ARAÚJO, 2023), a densidade de corrente aplicada na célula de Hull é distribuída da borda próxima ao ânodo com maior densidade de corrente por decímetro quadrado, diminuindo proporcionalmente à distância crescente em relação ao ânodo, sendo assim há possibilidade de que alta corrente aplicada force uma deposição, contudo, sem continuidade.

Figura 06 – Amostras temperada e revenida, revestidas por célula de Hull.



Fonte: autor, 2024.

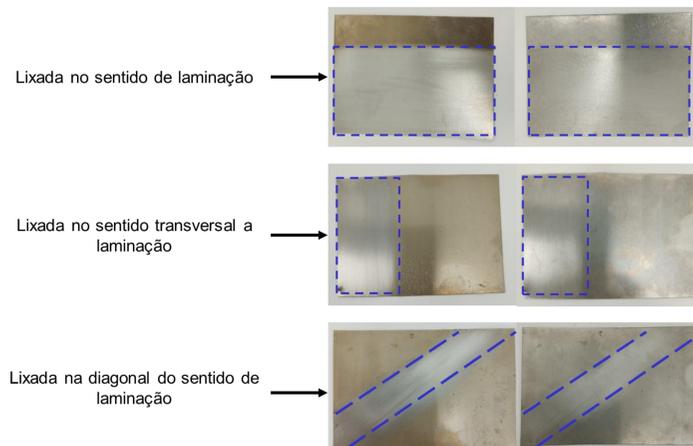
A Figura 07 representando amostras lixadas em diferentes direções, mostram que nas áreas lixadas com auxílio de um Scotch Brite, a camada de zinco foi depositada de forma contínua, independentemente da distância do ânodo e da diminuição da densidade de corrente por decímetro quadrado. No entanto, quando a camada atinge a interface entre a superfície lixada e a não lixada, a deposição é interrompida.

Observa-se também que, após a decapagem em solução de ácido clorídrico a 30%, as amostras não lixadas apresentam uma rugosidade visualmente diferente da parte lixada.

A Figura 08 apresenta as três amostras com indicações de revestimento, com setas amarelas indicando o depósito da camada de zinco e as linhas pontilhadas indicando o momento em que a deposição foi interrompida, permanecendo com um revestimento com aspecto falhado.

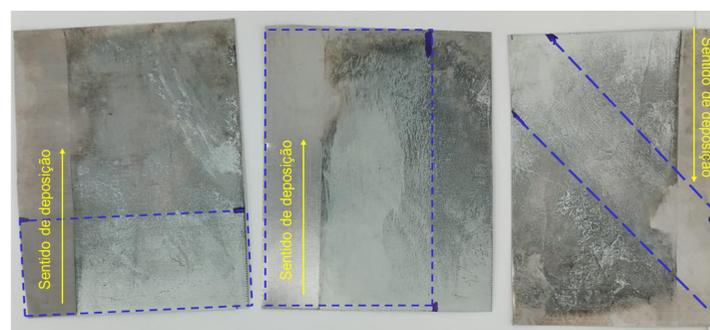
Esses ensaios demonstram que a superfície dos materiais temperados e revenidos, mesmo após desengraxe químico e decapagem em soluções de ácido sulfúrico ou ácido clorídrico, não são eficazes na preparação da superfície do substrato para receber o revestimento eletrodepositado.

Figura 07 – Amostra temperadas e revenidas lixadas com Scotch Brite.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 08 – Amostra temperadas e revenidas, revestidas em célula de Hull.



Fonte: Autor, 2024.

Os resultados indicam uma influência significativa da superfície formada durante o tratamento térmico. As amostras sem têmpera e revenimento, quando revestidas, apresentaram boa aderência e homogeneidade, ao contrário das tratadas termicamente, que mostraram falta de aderência e uma camada descontínua. Isso se deve à formação de óxidos, arraste na cabine de chumbo-bismuto e contato com outros materiais. Ensaio de MEV e EDS identificaram substâncias que inibem a eletrodeposição, resultando em um revestimento falho. A célula de Hull revelou problemas de adesão, mesmo com desengraxe e decapagem controlados. A camada de óxido e partículas de chumbo e bismuto, podem ser as principais causas da ineficácia do revestimento. O uso de ácidos mais concentrados não resolveu a questão, sugerindo a necessidade de remoção mecânica. Na indústria, a falta de aderência inicial leva ao arrancamento mecânico, devido a um pré-tratamento ineficaz da superfície formada nos fornos de tratamento térmico.

### 4 CONCLUSÕES

A presença de óxidos formados na superfície da chapa durante tratamento térmico inibem o revestimento, como mostrado na célula de Hull que após lixamento houve deposição de zinco.

O pré-tratamento atual do processo de revestimento é ineficaz para a superfície com os contaminantes após tratamentos térmicos.

Contaminantes de chumbo e bismuto, ferro e carbono em excesso permanecem na superfície após tratamentos térmicos, levando a inibição da eletrodeposição na etapa de revestimento, gerando as falhas analisadas.