

TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

*INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO NA ADESÃO DO  
REVESTIMENTO DE TINTA EM UMA CHAPA DE AÇO.*

Luiza Tanaka Leães  
00261984

Jane Zoppas Ferreira

Agosto, 2024

## AGRADECIMENTOS

Poucas coisas na vida são experiências individuais, a grande maioria é vivida como um ato colaborativo. Por isso, não apenas por esse trabalho, mas por tudo que a finalização dele representa, gostaria de deixar um agradecimento especial:

- ❖ À minha mãe, Mitsu R. Teixeira Tanaka, por seu amor e incentivo incondicionais e por ter, desde sempre, me ensinado a voar;
- ❖ Ao meu pai, Jorge Luis de Mello Leães, por seu carinho, sua paciência (quase)ilimitada e seus conselhos sempre sensatos e objetivos;
- ❖ À minha avó, Nadir Teixeira Tanaka, por seu cuidado e suas orações.  
Sem vocês, eu não seria.

- ❖ À minha dinda e primeira professora, Lândia Maria A. Cunha, por ter iniciado a jornada escolar;
- ❖ Ao meu parceiro, Lucas M. Barbosa Pereira, por ter trazido harmonia e equilíbrio;
- ❖ Ao meu melhor amigo, Rodrigo Canario, por ter trazido leveza.
  
- ❖ À minha orientadora, Jane Zoppas Ferreira, que mesmo antes do convite oficial já aconselhava esse e outros projetos;
- ❖ À minha amiga e mentora do estágio, Michele Cipolatto, com as melhores críticas construtivas;
- ❖ À toda equipe do projeto, vocês tornaram tudo mais divertido e possível.

E a todos aqueles que não foram nomeados aqui, mas que ainda assim fizeram parte da trajetória.

## ÍNDICE

### RESUMO

1. INTRODUÇÃO
2. OBJETIVOS
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
  - 3.1. Aço 4150
  - 3.2. Pintura
  - 3.3. Adesão
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL
  - 4.1. Material
  - 4.2. Pintura
  - 4.3. Variáveis dos testes
  - 4.4. Ensaios realizados
    - 4.4.1. Teste acelerado em câmara úmida
    - 4.4.2. Teste com diclorometano
    - 4.4.3. Teste *cross-cut*
    - 4.4.4. Testes de resistência ao meio
    - 4.4.5. Teste de campo
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO
  - 5.1. 1ª rodada de testes: influência da preparação mecânica e química da superfície
  - 5.2. 2ª Rodada de Testes: influência da espessura de camada e temperatura de cura da tinta
  - 5.3. 3ª Rodada de Testes: influência do desengraxante e tamanho de grão da escova
6. CONCLUSÕES
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## RESUMO

O estudo investiga a influência de variáveis de processo na adesão de tintas à base de água em chapas de aço SAE 4150. O objetivo é otimizar as condições de aplicação para maximizar a resistência do revestimento. O método de Design de Experimentos (DOE) foi utilizado para analisar variáveis como preparo mecânico da superfície, temperatura de cura, velocidade da esteira, tipo e concentração de desengraxantes, e uso de conversor de camada. Os resultados indicam que a preparação mecânica da superfície com lixas de granulação adequada melhora a adesão. A temperatura de cura foi crítica, com a melhor adesão ocorrendo a 160°C por 15 minutos. A velocidade da esteira influenciou a espessura do revestimento, afetando a aderência. O desengraxante básico (D2) mostrou melhores resultados em comparação ao desengraxante neutro (D1). O uso de nanoconversor de camada (NC) aumentou a adesão do revestimento, porém a melhora não se mostrou suficiente para justificar seus custos elevados. Conclui-se que a combinação de desengraxe básico, temperatura de cura otimizada e preparo mecânico adequado resulta em uma adesão superior do revestimento, proporcionando maior durabilidade e desempenho. Este estudo contribui para a substituição de tintas à base de solvente por alternativas mais sustentáveis, alinhando-se às exigências ambientais e de segurança.

**Palavras-chave:** adesão; tinta à base de água; aço SAE 4150; design de experimentos; preparação da superfície; desengraxante; rugosidade.

## ABSTRACT

The study investigates the influence of process variables on the adhesion of water-based paints on SAE 4150 steel sheets. The objective is to optimize application conditions to maximize coating resistance. The Design of Experiments (DOE) method was used to analyze variables such as mechanical surface preparation, curing temperature, conveyor speed, type and concentration of degreasers, and the use of a layer converter. The results indicate that mechanical surface preparation with appropriate grit sanding improves adhesion. Curing temperature was critical, with the best adhesion occurring at 160°C for 15 minutes. Conveyor speed influenced the coating thickness, affecting adhesion. The basic degreaser (D2) showed better results compared to the neutral degreaser (D1). The use of a nanocoating (NC) increased the adhesion of the coating, but the improvement did not prove sufficient to justify its high cost. It is concluded that the combination of basic degreasing, optimized curing temperature, and adequate mechanical preparation results in superior coating adhesion, providing greater durability and performance. This study contributes to replacing solvent-based paints with more sustainable alternatives, aligning with environmental and safety requirements.

**Keywords:** adhesion; water-based paints; SAE 4150 steel; Design of Experiments, surface preparation; degreaser; roughness.

## 1. INTRODUÇÃO

A adesão de revestimentos de tinta em substratos metálicos, como o aço, é um aspecto crítico em diversas aplicações industriais, que atendem desde necessidades específicas de proteção e funcionalidade, até estética e decorativa. É o caso de setores como indústria automotiva, aeroespacial, naval e construção civil, nos quais a busca por revestimentos que ofereçam alta durabilidade e resistência mecânica é essencial para garantir tanto o melhor desempenho, quanto a maior durabilidade dos produtos.

A diversidade de revestimentos disponíveis no mercado é vasta, com propriedades específicas que atendem a diferentes necessidades, sendo a escolha adequada dependente das condições de serviço e das exigências específicas de cada aplicação. Nesse sentido, a pintura de superfícies metálicas ultrapassa os critérios estéticos, tornando-se também uma forma de proteção contra a corrosão, aumento da resistência ao desgaste e facilitadora do processo de manutenção do componente. A eficiência dessa proteção depende diretamente da adesão da tinta ao substrato, o que pode ser afetado por uma variedade de fatores durante o processo de aplicação.

Uma tendência crescente na indústria de revestimentos é a substituição de tintas à base de solvente por tintas à base de água. Essa mudança é impulsionada por questões ambientais e de saúde. As tintas à base de solvente contêm altos níveis de compostos orgânicos voláteis (VOCs), que são liberados na atmosfera durante a aplicação e a cura da tinta. Os VOCs contribuem significativamente para a poluição do ar, formação de *smog* e problemas respiratórios em humanos. Além disso, a exposição prolongada aos solventes pode causar sérios problemas de saúde, incluindo doenças respiratórias e irritações na pele.

Por outro lado, as tintas à base de água emitem significativamente menos VOCs, tornando-se uma opção muito mais sustentável e segura tanto para os trabalhadores quanto para o meio ambiente. A redução da emissão de VOCs não só contribui para a melhoria da qualidade do ar, mas também ajuda a cumprir as regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas. Além disso, as tintas à base de água são menos inflamáveis e apresentam menor risco de acidentes durante o armazenamento e a aplicação.

Sendo assim, a motivação para realização deste estudo está na necessidade de substituição da tinta à base de solvente para uma à base de água no revestimento de chapas de aço, em um componente de uma empresa de ferramentas motorizadas. Para isso, será necessário a compreensão detalhada dos efeitos das variáveis de processo para melhor adesão da tinta, permitindo resultados com melhor desempenho e durabilidade.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho foi investigar e entender a influência de diferentes variáveis de processo na adesão do revestimento, identificando o conjunto otimizado para melhor resistência da tinta à base d'água em uma chapa de aço.

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Avaliar como alterações no preparo mecânico da superfície afetam a adesão da tinta;
- Avaliar como alterações na temperatura de cura da tinta afetam sua adesão;

- Avaliar como alterações na velocidade da esteira afetam a espessura da camada de tinta;
- Avaliar como alterações no tipo e concentração dos desengraxantes afetam a adesão da tinta;
- Avaliar a influência do uso de conversor de camada na adesão da tinta.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda os fundamentos teóricos essenciais para o entendimento do presente trabalho, iniciando pela caracterização do aço 4150, o substrato utilizado nos experimentos. Em seguida, discute-se a pintura, explorando os tipos de revestimentos, especialmente os à base de água, e suas propriedades relevantes. Finalmente, são analisados os mecanismos de adesão, tanto mecânicos quanto químicos, que influenciam a performance e a durabilidade do revestimento aplicado ao substrato de aço. Este embasamento teórico é crucial para compreender as interações entre as variáveis de processo e a qualidade final do revestimento.

#### 3.1 Aço 4150

O substrato avaliado durante o estudo foi um aço carbono baixa liga SAE 4150, conhecido por suas excelentes propriedades mecânicas devido à adição de elementos de liga. Este tipo de aço é classificado como um aço médio-carbono, contendo aproximadamente 0,5% de carbono e quantidades significativas de manganês, o que permite seu uso em diversas aplicações industriais.

A classificação dos aços carbono e baixa liga, como o SAE 4150, baseia-se amplamente na sua composição química. A adição de elementos como níquel, cromo e molibdênio confere a esses aços uma resistência mecânica superior em comparação aos aços carbono simples. Esses elementos de liga melhoram significativamente as propriedades mecânicas, tornando o SAE 4150 adequado para componentes que exigem alta resistência e durabilidade, como eixos, acoplamentos, virabrequins, engrenagens e forjados (ASM Handbook, Volume 1).

Aços tratados termicamente, como o SAE 4150, oferecem uma variedade de propriedades melhoradas em termos de resistência, ductilidade e dureza. O tratamento térmico isotérmico pode gerar microestruturas bainíticas no aço 4150, combinando alta resistência com melhor ductilidade, superior resistência ao desgaste, maior tenacidade ao impacto e vida útil mais longa à fadiga (ZHU, 2019). Em particular, a empresa na qual o trabalho foi realizado já utiliza este aço considerando tais propriedades.

#### 3.2 Pintura

A pintura é um processo essencial na proteção e estética de superfícies, especialmente em aplicações industriais. Os termos "pintura" e "revestimento orgânico" são frequentemente usados de forma intercambiável para designar revestimentos com base orgânica. A maioria dos revestimentos orgânicos é composta por um formador de filme ou aglutinante dissolvido ou disperso em um solvente ou água, no qual os pigmentos são adicionados para conferir cor, opacidade e outras propriedades ao filme seco (ASM Handbook, Volume 5).

As tintas podem ser classificadas em dois grandes grupos: tintas à base de solvente e tintas à base de água. As tintas à base de solvente, também conhecidas como tintas à base de óleo, utilizam compostos orgânicos como solventes, proporcionando um acabamento durável e resistente. Este tipo de tinta é menos suscetível a condições ambientais como temperatura e umidade durante o processo de cura (GNECCO, MARIANO, FERNANDES, 2003). No entanto, devido a preocupações ambientais e de saúde, há uma tendência crescente em reduzir ou eliminar compostos orgânicos voláteis (VOCs) e solventes considerados poluentes atmosféricos perigosos. Essa transição inclui a mudança para revestimentos com altos sólidos, baixo teor de solvente e à base de água, conforme exigências legislativas (KWAAMBWA, H., 2013).

As tintas à base de água utilizam água como solvente para solubilizar a resina, resultando em um produto mais amigável ao meio ambiente. Estas tintas são preferidas devido à sua menor emissão de VOCs, menor risco de incêndio e facilidade de limpeza (BYUNG, Kind. 2011). Contudo, enfrentam desafios como menores propriedades mecânicas e resistência às intempéries em comparação com tintas à base de solvente (JUDEINSTEIN, P., SANCHEZ, Clément, 1996). No presente estudo, a tinta à base de água foi escolhida para substituir a tinta à base de solvente devido aos seus benefícios ambientais e de segurança, alinhando-se com a demanda crescente por soluções mais sustentáveis (MOHANTY et al., 2023).

A preparação adequada da superfície metálica é um passo crítico antes da aplicação da pintura. Durante os processos de fabricação, como laminação, estampagem, conformação, forjamento, usinagem e tratamento térmico, as superfícies metálicas podem acumular contaminantes que interferem na adesão da tinta ou permitem a progressão da corrosão sob o filme de tinta, causando falhas prematuras. Métodos de limpeza de superfícies metálicas podem ser classificados como mecânicos e químicos. De acordo com o *ASM Handbook*, a limpeza mecânica inclui escovação com força, esmerilhamento e jateamento abrasivo, enquanto a limpeza alcalina é eficaz para remover óleos, graxas e outros resíduos inorgânicos. Neste estudo, foi realizado um processo de limpeza minucioso para garantir a melhor adesão possível da tinta à superfície do aço.

O método de pintura utilizado foi o de cortina de tinta, um processo eficiente para aplicar acabamentos em alta velocidade com mínima perda de material. Neste método, tiras e chapas são movidas por uma esteira transportadora sob um reservatório alimentado por bomba, com uma abertura ajustável que proporciona uma cortina contínua de revestimento fluindo sobre o material. Este método assegura a aplicação de um filme úmido uniforme e suave, sem as irregularidades que podem ocorrer com outros métodos de aplicação, como a pintura por rolo ou imersão.

A cura é o processo final de conversão de um revestimento aplicado em um filme seco, essencial para garantir a durabilidade e eficácia do revestimento. Revestimentos termofixos requerem um agente de cura, sendo que em alguns casos esse agente é o calor, enquanto os termoplásticos, que secam por evaporação do solvente são secados ao ar. O uso de fornos para fornecer a energia necessária para a cura é comum em aplicações industriais, garantindo que o revestimento atinja suas propriedades finais de resistência e durabilidade (ASM Handbook, Volume 5B).



### 3.3 Adesão

A adesão eficaz de revestimentos em superfícies metálicas depende da preparação meticulosa e adequada da superfície. Esta etapa inicial não apenas influencia diretamente a qualidade do revestimento, mas também determina sua durabilidade e desempenho ao longo do tempo. Superfícies metálicas, após processos de fabricação como laminação, tratamento térmico e usinagem, podem acumular contaminantes como óleos, graxas e partículas de poeira. Esses contaminantes não apenas interferem na adesão do revestimento, mas também podem acelerar o processo de corrosão se não forem removidos adequadamente.

A preparação da superfície não é apenas a etapa mais crítica, mas também a mais cara em projetos de revestimento. A limpeza e o aumento da rugosidade da superfície garantem que o revestimento tenha uma vida útil prolongada. Deficiências nessa etapa são a causa mais comum de falhas prematuras no revestimento, reforçando sua importância (ASM Handbook, Volume 5B), visto que contaminantes como óleos e graxas formam camadas que agem como barreiras entre o metal e o revestimento, comprometendo a adesão.

Métodos de limpeza podem ser mecânicos, como escovação e jateamento abrasivo, ou químicos, como a limpeza alcalina, que remove óleos e outros resíduos (BALDAN, A. 2012). O desengraxe, com solução alcalina, é um método amplamente utilizado devido sua eficiência na remoção de óleos e graxas. Nesse processo, as peças metálicas podem ser imersas ou passar por uma série de *sprays* para limpeza, tornando o método com bom custo-benefício e flexibilidade. É importante finalizar com o enxágue para remover completamente os resíduos, garantindo uma superfície livre de contaminantes que possam comprometer a adesão (L.F.M, Silva et al, 2011).

Além da limpeza, o tratamento mecânico da superfície, como lixamento, é utilizado para aumentar a rugosidade e, conseqüentemente, a área de intertravamento mecânico com o revestimento. Lixas de diferentes granulações são utilizadas para preparar a superfície, com as lixas mais finas proporcionando uma limpeza ideal e uma rugosidade adequada para a adesão das tintas. O uso de lixas adequadas é crucial para evitar falhas prematuras no revestimento (GNECCO, MARIANO e FERNANDES, 2003).

Entre os principais mecanismos de adesão estão o entrelaçamento mecânico, a adsorção e a ligação química. O acoplamento ou entrelaçamento mecânico baseia-se na ancoragem do revestimento na superfície do substrato, e é fonte de debate visto que alguns pesquisadores defendem que proporciona de fato maior adesão através do aumento de interações químicas e físicas, enquanto outros acreditam que é apenas um aumento de área superficial disponível (CHEN, P., 2018). Independente disso, é conhecido que a rugosidade tem grande influência na adesão, que são fatores diretamente proporcionais até o limite de rugosidade que causa concentração de tensões e leva a falha prematura sob carga externa (WEI, H. et al., 2020).

Outro tipo de preparo que vem sendo investigado é a conversão de camada a partir de técnicas como imersão, *spray*, sol-gel e outros, como mostra Zaro (2013). A partir desse preparo, forma-se uma camada cerâmica nano estruturada sobre o substrato, proporcionando melhor adesão do revestimento orgânico à superfície, com vantagens de custo e simplicidade de operação quando comparado com tratamentos eletroquímicos (WEI, H. et al., 2020).

Portanto, a combinação de uma superfície limpa e adequadamente preparada, com os mecanismos de adesão mecânica e química, é essencial para garantir a

durabilidade e a eficácia dos revestimentos aplicados em substratos metálicos. As técnicas de preparação de superfícies e os mecanismos de adesão são cruciais para alcançar a performance desejada dos revestimentos em aplicações industriais.

#### 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este estudo integra um projeto mais amplo de alteração no tipo de impressão utilizado no processo de pintura do componente (chapas de aço). Originalmente, utilizava-se uma tinta base a base de solvente nas chapas para posterior impressão por serigrafia. No entanto, devido à necessidade de maior flexibilidade e qualidade do produto, a impressão passará a ser realizada por meio da tecnologia *inkjet*, tecnologia que utiliza impressoras equipadas com cabeçotes que contém centenas de orifícios capazes de depositar milhares de gotículas de tinta por segundo na peça.

Para viabilizar essa mudança e atender a preocupações ambientais, se mostrou necessária a substituição da tinta base utilizada para uma com base de água. Além disso, justamente para atender e assegurar a premissa de maior qualidade final do produto, a peça já pintada deveria ser submetida a uma série de testes e ensaios conforme a norma interna da empresa (SWN 46161).

Assim, o presente estudo teve como objetivo investigar a influência de diferentes variáveis do processo sobre a adesão do revestimento de tinta à base de água em um substrato de aço SAE 4150. Para atingir esse objetivo, utilizou-se uma forma adaptada do método de Design de Experimentos (*Design of Experiments, DOE*), com o intuito de determinar as condições ótimas do processo.

##### 4.1 Materiais

O substrato utilizado foi um aço SAE 4150 austemperado, cuja composição está descrita na Tabela 1. A tinta aplicada é uma tinta à base de água, com resina composta por uma combinação de poliéster/amina e 47-50% de sólidos. De acordo com o fabricante, a espessura da camada já curada não deve exceder 40µm, e a cura deve ser realizada por 30 minutos a uma temperatura de 140 °C ou por 15 minutos a uma temperatura de 160 °C.

Tabela 1: Composição química AISI/SAE 4150

SAE 4150	%C	%Mn	%P	%S	Si	Cr	Mo
Mínimo	0,48	0,75	-	-	0,15	0,8	0,15
Máximo	0,53	1,00	0,030	0,040	0,35	1,10	0,25

Foram testados dois desengraxantes de diferentes fornecedores:

- D1: desengraxante neutro com pH de aproximadamente 8,6, composto por tensoativos, sais de ácidos orgânicos e hidrotropos;
- D2: desengraxante básico com pH entre 13 e 14, formulado à base de sais de sódio, glicóis, dispersantes e tensoativos aniônicos (D2).

O nanoconversor de camada (NC) testado é um produto livre de fosfatos e componentes orgânicos voláteis, contendo ácido hexafluorzircônio em sua composição e com pH ácido na faixa de 1,5 a 2.

As escovas industriais utilizadas no preparo mecânico eram compostas por grãos abrasivos de óxido de alumínio (alúndio), enchimento de carbonato de cálcio natural,

resina fenólica e costado de algodão, conforme mostra a Figura 1. Foram utilizadas escovas com três diferentes granulometrias: 80, 100 e 120 MAVEX (E1, E2 e E3, respectivamente).



Figura 1: Foto exemplo da escova utilizada, entre os diferentes tamanhos de grão altera-se apenas a cor para facilitar identificação.

## 4.2 Pintura

A máquina de pintura em questão consiste em uma única esteira, responsável pelo transporte das peças através das áreas destinadas à aplicação da tinta e sua cura dentro da estufa. Devido à geometria simplificada das peças em questão (conforme representado na Figura 2), a aplicação da tinta é realizada por meio de uma cortina, na qual ela é despejada continuamente sobre a peça que se desloca pela esteira. Tal método garante uma cobertura rápida e uniforme da superfície.

A etapa de cura é breve, fazendo com que cada peça demore 24min para percorrer o percurso, este tempo é determinado pela velocidade da esteira, que permanece inalterada em toda a linha de produção em função das necessidades do restante da linha. Destaca-se que a estufa em questão não dispõe de um sistema de controle de temperatura por zonas. Ao invés disso, suas extremidades de entrada e saída permanecem abertas, sendo complementadas por um sistema de ventilação equipado com filtros em duas localidades próximas às aberturas. Este arranjo resulta em três zonas com temperaturas distintas e não ajustáveis: a temperatura é mais baixa nas proximidades das aberturas, atinge valores próximos aos parâmetros predefinidos no centro da estufa e permanece em níveis intermediários em outras regiões. Por conseguinte, foram realizados testes com três diferentes temperaturas-alvo: 150, 165 e 175°C, com uma margem de variação de +/- 5°C em cada uma.

O processo de pintura ocorre em ambos os lados da peça em momentos distintos: inicialmente um dos lados é submetido à aplicação da tinta seguida pela etapa de cura para, posteriormente, um braço robótico virar a peça e reposicioná-la no início da esteira, permitindo que o lado oposto passe pelo mesmo fluxo em sequência. Em decorrência disso, o primeiro lado a ser pintado passa pela estufa de cura duas vezes.

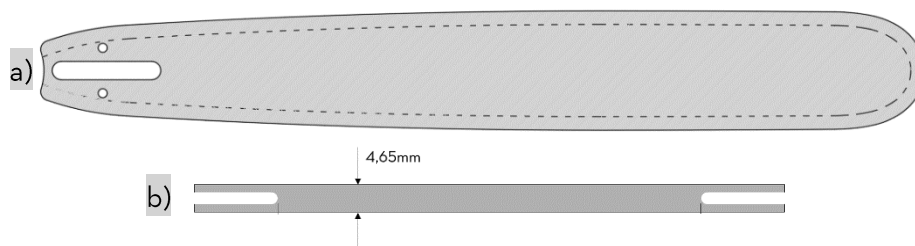


Figura 2: Desenho esquemático da peça: a) vista superior; b) vista lateral.

### 4.3 Variáveis dos testes

A organização dos testes foi altamente dependente do cronograma de produção da fábrica, pois era necessário interromper a linha atual para realizar ajustes nos *setups* das máquinas, especialmente na máquina de pintura, a fim de possibilitar a produção das amostras. Considerando essa dificuldade e para minimizar o número de variáveis, a cada parada de produção para realização das rodadas foram produzidas aproximadamente 300 peças, permitindo a estabilização do processo após o *setup* e eliminando as primeiras peças que poderiam apresentar influências externas nos resultados.

Esse número de amostras também garantiu quantidade suficiente para todos os ensaios exigidos. Inicialmente, cerca de 30 peças eram separadas para os ensaios de laboratório, cada peça era segmentada em amostras de cerca de 5cm de largura. Foram realizadas três rodadas de testes para alcançar o resultado de otimização, conforme ilustrado na Figura 3.

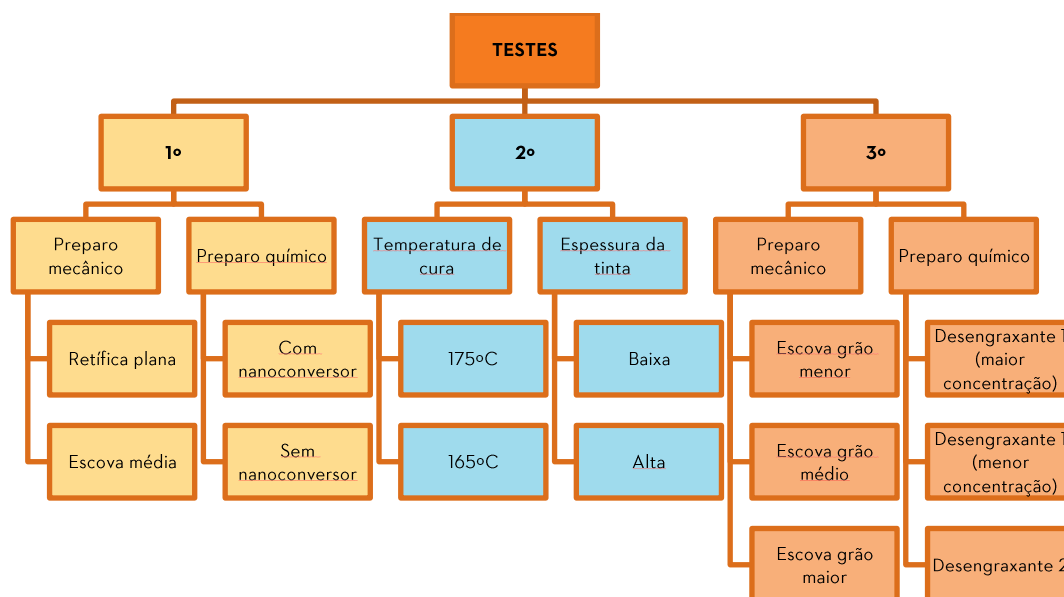


Figura 3: Fluxograma geral das três rodadas de teste realizadas e suas respectivas variáveis.

A linha de produção onde foram realizados os testes é complexa, abrangendo várias etapas, desde o tratamento térmico das peças até a aplicação e cura da tinta. No entanto, o DOE englobou apenas as etapas que colaboram diretamente para a adesão do revestimento: o preparo da superfície e a pintura propriamente dita.

A primeira rodada de testes buscou avaliar a influência do preparo da superfície, tanto mecânico quanto químico.

- No preparo mecânico, testaram-se duas variáveis distintas: a retífica plana e escova industrial. A retífica plana era a condição original do processo, pensada apenas para remoção de carepa após o tratamento térmico de austêmpera das chapas. Contudo, após o início dos estudos para melhor adesão da nova tinta, percebeu-se a necessidade de maior rugosidade da superfície, a qual não era possível atingir com a operação de retífica. Sendo assim, foi implementado um sistema de escovação automática com 4 escovas rotatórias (duas na parte superior e duas na parte inferior) e uma esteira passante para movimentação das chapas.
- No preparo químico, avaliou-se a possibilidade de aplicação de um nanoconversor de camada.

Como dito anteriormente, a retífica plana era a condição original do processo, utilizada principalmente para remoção da carepa do material e uniformizar a superfície. Contudo, foi possível perceber que as chapas ficavam praticamente polidas, sem ancoramento mecânico para a tinta. Então, testou-se a retífica plana e a escova com grãos médios. Também, foi proposto pelo fornecedor do desengraxante inicial um preparo com nanoconversor de camada. As condições testadas nesta rodada estão descritas na Tabela 2 abaixo.

*Tabela 2: Condições testadas a partir das variáveis analisadas na 1ª rodada de testes.*

<b>1ª Rodada</b>		<b>Preparo Químico</b>	
		Com nanoconversor	Sem nanoconversor
<b>Preparo Mecânico</b>	Retífica Plana	RP+NC	RP-NC
	Escova 100	E100+NC	E100-NC

Com a falha de todas as condições testadas na primeira rodada, a segunda buscou foco na etapa de pintura propriamente dita. Além disso, tentou-se reproduzir a condição de processo de outra unidade da empresa, que já havia obtido sucesso sem a aplicação de nanoconversor de camada. Para as variáveis da etapa de pintura e cura da tinta, houve algumas limitações na liberdade de alterar os parâmetros. O fabricante estipula um determinado tempo à uma certa temperatura para a cura adequada da camada de tinta, contudo, a linha de pintura é interligada com o restante das etapas da produção das chapas, e não é possível alterar o tempo pré-estipulado em função dos níveis de produtividade da fábrica.

Além disso, a estufa de secagem não possui controle de temperatura por seções, e tem um comprimento de percurso limitado. Visto que o investimento seria muito alto para um novo equipamento mais versátil com o pouco espaço físico disponível, a estufa de cura permaneceu a mesma que era utilizada para a tinta original à base de solvente. Sendo assim, variou-se apenas a temperatura do *setpoint* geral da estufa, e tentou-se alterar a espessura da camada de tinta com pequenas alterações na velocidade com que a peça atravessava a cortina de tinta. Sendo assim, buscou-se controlar melhor a espessura da camada de tinta e a variável principal foi a temperatura do *setpoint* da estufa de cura (Tabela 3).

Também foi nesta rodada que se percebeu a necessidade de realizar os mesmos testes com a condição anterior, na qual era utilizada a tinta à base de solvente. Dessa forma, seria possível comparar os resultados de cada condição com o que seria obtido no passado. Essa condição foi chamada de Condição 0.

Tabela 3: Condições testadas a partir das variáveis analisadas na 2ª rodada de testes.

2ª Rodada		Espessura da Camada	
		Menor (~30 µm)	Maior (~40 µm)
<b>Temperatura da estufa</b>	165°C	165°C/30	165°C/40
	175°C	175°C/30	175°C/40

A terceira e última rodada de testes (Tabela 4) permaneceu na linha de replicar o processo da fábrica-irmã e focar no preparo da superfície novamente:

- No processo mecânico: considerando os resultados da 1ª rodada e os investimentos feitos o sistema de escovas foi mantido. Como variável para definir o melhor tipo de escova, foram testados 3 tamanhos de grão distintos.
- No processo químico: como o tipo de desengraxante e fornecedor ainda era uma diferença entre as duas plantas, foi testado o mesmo produto utilizado. Também foram testadas diferentes concentrações do desengraxante utilizado nas rodadas anteriores.

Tabela 4: Condições testadas a partir das variáveis analisadas na 3ª rodada de testes.

3ª Rodada		Tamanho de grão da escova		
		E1 80	E2 100	E3 120
<b>Desengraxante</b>	D1 1%	D1.1/E80	D1.1/E100	D1.1/E120
	D1 3%	D1.3/E80	D1.3/E100	D1.3/E120
	D2 2%	D2/E80	D2/E100	D2/E120

#### 4.4 Ensaios realizados

##### 4.4.1 Teste acelerado em câmara úmida

Este ensaio submeteu os corpos de prova a um ambiente saturado de umidade, mantidos a 40°C e 100% de umidade relativa por um período de 500 horas. Após a remoção das amostras da câmara, uma inspeção visual foi realizada para verificar a presença de descascamento de tinta e corrosão. Eventuais bolhas superficiais que possam surgir imediatamente após o teste são observadas durante um período adicional de 24 horas. No caso de persistirem após esse intervalo, o resultado é considerado negativo.

##### 4.4.2 Teste com diclorometano

Este ensaio foi desenvolvido para simular a limpeza do produto com solventes comuns contendo diclorometano. Utilizou-se um pano limpo fixado em uma base rígida de cortiça para aplicar uma força uniforme durante 30 ciclos de ida e volta em uma área de 50mm na superfície do revestimento. A avaliação considera a ausência de descamação da tinta para que a amostra seja aprovada.

##### 4.4.3 Teste *cross-cut*

O método de corte transversal, conforme estabelecido pela norma DIN EN ISO 2409:2013, empregou um dispositivo com seis lâminas para avaliar a aderência do revestimento. A classificação 0 ou 1 indica um resultado positivo, enquanto qualquer classificação acima de 1 é considerada negativa.

#### 4.4.4 Testes de resistência ao meio

Este conjunto de testes teve como objetivo avaliar a capacidade do revestimento em resistir aos diferentes agentes químicos aos quais pode ser exposto durante seu uso por parte do cliente final. Para isso, as amostras foram cortadas com aproximadamente 5cm de altura e submetidas à imersão (pelo menos 2/3 da sua altura) em recipientes contendo os respectivos produtos químicos por períodos determinados, conforme descrito a seguir (Figura 4). Esses períodos são estipulados pelas normas internas da empresa, considerando a frequência e tempo de exposição a cada um dos produtos avaliados:

- Q1: produto de limpeza alcalino com pH=13, recomendado para remoção de sujidades orgânicas do produto, 120h de teste;
- Q2: produto de limpeza ácido, com pH=1, simulando a limpeza com produtos domésticos comuns no mercado, 120h de teste;
- Q3: combustível de laboratório, destina-se a simular possível contato com combustível durante a utilização do produto, 120h de teste;
- Q4: lubrificante de origem vegetal em contato direto e constante com o produto ao longo de sua vida útil, 1.000h de teste;
- Q5: utilizado como emulsão para preservação da lubrificação do componente, 120h de teste.



Figura 4: Foto da condição que ficam as amostras durante o teste de resistência ao meio.

A avaliação foi realizada com base na aderência da tinta à superfície da amostra após o teste de arranhão. A ausência de descamação ou remoção significativa da tinta foi considerada um resultado positivo (Figura 5).

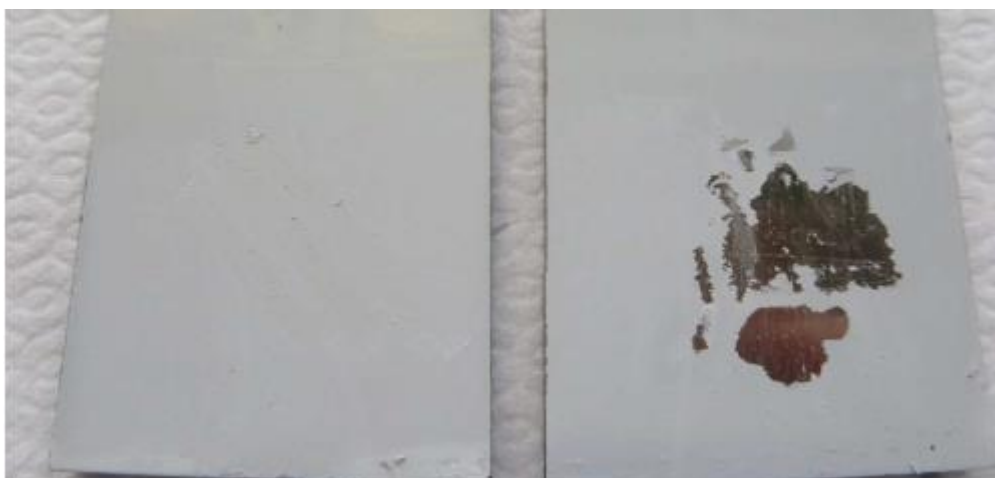


Figura 5: Foto das amostras após o teste de resistência ao meio. À esquerda uma peça aprovada (OK) e à direita uma peça na condição reprovada (NOK).

#### 4.4.5 Testes de campo

Teste intensivo simulando a utilização do produto, é considerado o teste final, feito apenas após aprovação de todos os demais, tendo em vista seu alto custo associado. Envolve colocar a peça em uso contínuo e intensivo na máquina por aproximadamente 1 mês e, após, reavaliar a condição da pintura.

### 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES



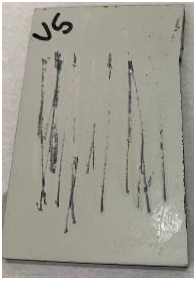



Os resultados serão apresentados de acordo com a ordem cronológica dos testes realizados, visto que foram analisados separadamente para que fosse possível seguir para a rodada seguinte. Foram utilizados os mesmos critérios de análise para todas as amostras, e todos os ensaios foram realizados em laboratório com as mesmas condições ambientais (temperatura, umidade etc.). Os métodos de cada ensaio foram descritos entre os itens 4.4.1 e 4.4.5.

As Tabelas 5 a 9 mostram os testes que foram realizados em cada rodada, indicando o resultado para cada uma das condições com imagens das condições reprovadas.

#### 5.1 1ª rodada de testes: influência da preparação mecânica e química da superfície

A primeira rodada de testes teve foco em avaliar os preparos mecânico e químico da superfície das chapas de aço, com e sem a presença de nanoconversor de camada e alternando entre retificação plana e escova de grão menor. Nessa etapa, não houve variação controlada das condições de pintura, a espessura da camada apresentou valores entre 40 e 45µm e a temperatura da estufa de cura estava em 165°C.

Tabela 5: Resultados dos ensaios realizados com as condições da 1ª rodada de testes.

Ensaio	Condições			
	RP+NC	RP-NC	E100+NC	E100-NC
Q1				
Q2	OK	OK	OK	OK
Q3			OK	OK
Q4	OK	OK	OK	OK
Q5	OK	OK	OK	OK



<b>Câmara úmida</b>	OK	OK	OK	OK
<b>Diclorometano</b>	OK	OK	OK	OK
<b>Cross-cut</b>	OK	OK	OK	OK

A partir da Tabela 5, é possível observar que os testes de resistência ao meio são os únicos reprovados, enquanto testes padrão como câmara úmida, *cross-cut* e diclorometano aprovam em todas as condições. Ambas as condições com a retífica plana (RP), com ou sem nanoconversor, reprovaram não apenas no produto Q1, mais severo, como também no produto Q3. Além disso, é possível observar que o nível de remoção de material nessas condições é mais acentuado do que nas condições escovadas (E100+NC e E100-NC), reforçando a teoria de que uma maior rugosidade da superfície favorece a adesão da tinta ao substrato através do mecanismo de ancoramento mecânico.




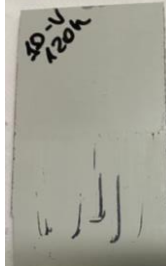

Também é possível observar, entre as condições escovadas ou retífica plana, uma melhora na condição na qual foi utilizado o nanoconversor de camada (RP+NC e E100+NC), visto que esse proporciona também uma adesão por mecanismo de atração química somada à ancoragem mecânica resultante de uma maior superfície de contato da escovação (considerando a camada com características nano).




Entretanto, embora tenha proporcionado uma melhora na adesão, essa melhoria não se mostrou suficiente para cumprir todos os critérios de desempenho necessários. Além disso, a implementação dessa etapa adicional implicaria em maior impacto econômico, com aumento significativo nos custos operacionais, a necessidade de controles adicionais e dos cuidados necessários. Considerando esses fatores, decidiu-se não prosseguir com o estudo e a implementação do conversor de camada no processo.

## 5.2 2ª Rodada de Testes: influência da espessura de camada e temperatura de cura da tinta

Para a segunda rodada de testes, a condição 0 foi adicionada a fim de servir de comparativo do processo antigo com a tinta à base de solvente e as evoluções que estavam sendo obtidas com os estudos de otimização para a tinta à base de água. Nessa rodada foram investigadas duas temperaturas de cura (165 °C e 175 °C) e duas espessuras de camada (30 e 40 µm). É notável que, mesmo as demais condições não tendo sido aprovadas em todos os testes (em especial no teste Q1) todas estavam apresentando resultados consideravelmente melhores do que a condição 0.

Tabela 6: Resultados dos ensaios realizados com as condições da 2ª rodada de testes.

<b>Ensaio</b>	<b>Condições</b>				
	<b>165°C/30</b>	<b>165°C/40</b>	<b>175°C/30</b>	<b>175°C/40</b>	<b>0</b>
<b>Q1</b>					
<b>Q2</b>	OK	OK	OK	OK	OK

Q3	OK		OK	OK	
Q4	OK	OK	OK	OK	OK
Q5	OK	OK	OK	OK	OK
Câmara úmida	OK	OK	OK	OK	
Diclorometano	OK	OK	OK	OK	OK
Cross-cut	OK	OK	OK	OK	OK

No teste Q1, na condição 0, tem-se a remoção de praticamente toda a cobertura de tinta da peça após a raspagem, não limitando-se apenas ao local onde ocorreu o atrito. É possível obter a mesma conclusão com o resultado do teste Q3, no qual ocorreu o deslaque completo da tinta, que não mostrou adesão com o substrato. Importante ressaltar que essa condição não teve presença de qualquer preparo com nanoconversor de camada, e o preparo mecânico foi feito com a retífica plana. No teste de câmara úmida, é possível observar pontos de corrosão nas extremidades das peças, e bolhas permanentes na superfície da tinta, como mostra a Figura 6.



Figura 6: Foto aproximada da superfície de uma peça na condição 0 após retirada da câmara úmida.

Para as demais condições, a única que reprovou no teste Q3 foi a com temperatura menor e espessura de camada maior ( $\sim 40\mu\text{m}$ ), condição  $165^\circ\text{C}/40$ , com performance ainda melhor do que as condições RP+NC e RP-NC, reprovadas em Q3 na 1ª rodada. Esse resultado pode ser consequência do melhor controle da temperatura e da espessura de camada, fatores que não estavam sendo controlados e avaliados anteriormente. Também pode ter sido um resultado de fatores externos da linha de produção e do ambiente local.

Ainda assim, todas as condições reprovaram no teste mais crítico, o Q1. É possível observar que a melhor condição nesse cenário foi a com temperatura mais elevada no *setpoint* da estufa ( $\sim 175^\circ\text{C}$ ), e menor espessura de camada (condição  $175^\circ\text{C}/30$ ). O segundo melhor resultado foi também da temperatura mais elevada, mesmo que com espessura um pouco maior (condição  $175^\circ\text{C}/40$ ). Dessa forma, é possível concluir que configurar a temperatura da estufa para  $\sim 175^\circ\text{C}$  apresentaria melhores resultados, aproximando-se do que é recomendado pelo fornecedor da tinta

### 5.3 3ª Rodada de Testes: influência do desengraxante e tamanho de grão da escova

Na primeira rodada de ensaios foi verificado que a preparação da superfície utilizando escovamento foi fundamental para obtenção de bons resultados nos testes de adesão da tinta, quando comparado com o processo de retífica plana. Assim, a terceira rodada de ensaios foi planejada para investigar com mais atenção a influência da gramatura das escovas. Foram testadas gramaturas de 80, 100 e 120.



Além disso, também se buscou avaliar a influência da concentração do desengraxante D1, alternando entre 1 e 3%. Adicionalmente, testou-se o desengraxante D2, que já havia demonstrado bons resultados em um processo semelhante realizado em outra fábrica. O objetivo foi verificar se D2 poderia proporcionar resultados superiores ou comparáveis aos obtidos com D1, considerando as especificidades do processo em estudo.

Também, após a segunda rodada de testes, na qual se avaliou a influência da espessura da camada e da temperatura de cura da tinta, surgiu a preocupação com o fato de que um lado da peça era pintado e curado antes do lado oposto. Essa diferença faz com que o lado pintado primeiro permanecesse mais tempo, ao total, na estufa de cura, visto que passaria duas vezes. Para investigar o impacto dessa possibilidade no resultado do teste Q1, considerado o mais crítico para a aprovação, foi decidido marcar o lado que era pintado primeiro e avaliar seu desempenho.

Foi realizada maior amostragem, permitindo acompanhar a evolução do teste em intervalos intermediários de tempo: 72h, 96h e 120h. É importante ressaltar que, independentemente do resultado do acompanhamento intermediário, o resultado considerado para aprovação do novo processo foi o final de 120h, conforme a norma interna da empresa, sendo os demais apenas para fins de estudo.

Além disso, manteve-se a temperatura de cura em 175°C e a espessura da camada de tinta em 30 µm para esta terceira rodada. Essa decisão baseou-se na otimização previamente alcançada.

Tabela 7: Resultados dos ensaios realizados com as condições da variável D1 1% da 3ª rodada de testes.




Ensaio	Condições		
	D1.1/E80	D1.1/E100	D1.1/E120
Q1		OK	
Q2	OK	OK	OK
Q3	OK	OK	OK
Q4	OK	OK	OK
Q5	OK	OK	OK
Câmara úmida	OK	OK	OK
Diclorometano	OK	OK	OK
Cross-cut	OK	OK	OK

Os resultados apresentados na Tabela 7 detalham as condições de ensaio utilizando o desengraxante D1 a uma concentração de 1%. Todas as amostras foram processadas sob uma temperatura de aproximadamente 175°C e com uma espessura de camada reduzida. Entre as condições testadas, a condição D1.1/E100 destacou-se como a melhor, sendo aprovada em todos os testes. Esta condição utilizou uma escova de tamanho de grão médio.

Já a condição D1.1/E120 evidencia que uma rugosidade excessiva pode criar uma superfície desfavorável para a ancoragem da tinta, resultando em uma adesão inferior. Essa observação corrobora a teoria de que existe um ponto ótimo de rugosidade para a superfície que maximiza a adesão da tinta. Quando a rugosidade é aumentada além desse ponto, como demonstrado pela condição D1.1/E120, a adesão fica novamente prejudicada.

Na Tabela 8, são apresentados os resultados das condições com o desengraxante D1 em uma concentração de 3%, ainda dentro dos limites de uso recomendados pela ficha técnica fornecida pelo fabricante. A condição D1.3/E120 obteve resultados muito satisfatórios, apresentando apenas um pequeno arranque isolado, que pode ter sido causado por alguma sujidade ou contaminação da própria linha de produção. Em contrapartida, as condições D1.3/E80 e D1.3/E100 falharam completamente nos testes.

Tabela 8: Resultados dos ensaios realizados com as condições da variável D1 3% da 3ª rodada de testes.

Ensaio	Condições		
	D1.3/E80	D1.3/E100	D1.3/E120
Q1			
Q2	OK	OK	OK
Q3	OK	OK	OK
Q4	OK	OK	OK
Q5	OK	OK	OK
Câmara úmida	OK	OK	OK
Diclorometano	OK	OK	OK
Cross-cut	OK	OK	OK




As condições D1.1/E120, D1.3/E120 e D2/E120 foram todas preparadas utilizando escovas de tamanho de grão maior, no entanto, a condição D1.3/E120 apresentou um desempenho superior no teste Q1 em comparação com as condições D1.1/E120 e D2/E120. Para entender melhor essa diferença no comportamento, seria interessante realizar medições quantitativas da rugosidade da superfície que cada uma dessas condições obteve.

É importante levar em conta que o ambiente fabril é suscetível a variações nas condições ambientais e outros fatores externos, em comparação com um ambiente controlado de laboratório. Essas variações podem ter influenciado os resultados dos

testes e não foram completamente mapeadas, o que ressalta a importância de replicar os testes em condições controladas.

Na Tabela 9, são apresentados os resultados das condições com o desengraxante D2 em uma concentração de 2%, que foi testado por ter mostrado bons resultados em um processo semelhante em outra fábrica da empresa. No entanto, os resultados não foram satisfatórios para nenhuma das escovas utilizadas quando combinadas com esse produto. Isso sugere que, apesar de utilizar o mesmo desengraxante, o restante do processo pode ter diferenças significativas que influenciam o desempenho final, reforçando que a aprovação ou reprovação nos ensaios é resultado da combinação de todos os parâmetros do processo, mesmo aqueles que não foram abordados nesse trabalho, e não apenas de uma variável isolada.



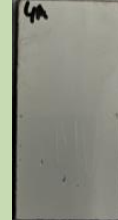
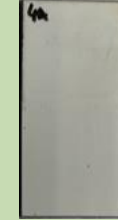


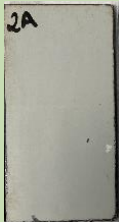
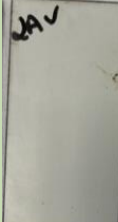








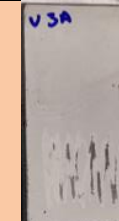







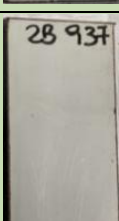
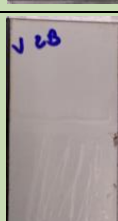

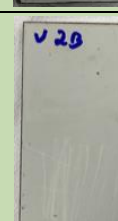

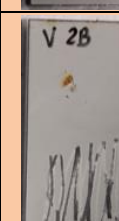

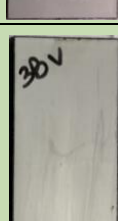
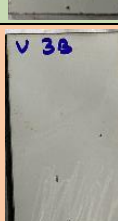
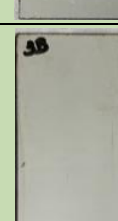

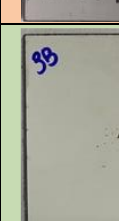
Tabela 9: Resultados dos ensaios realizados com as condições da variável D2 2% da 3ª rodada de testes.


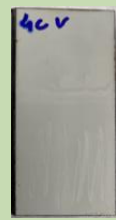

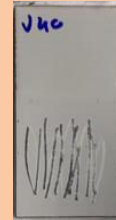





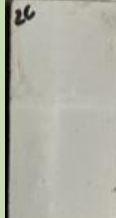








Ensaio	Condições		
	D2/E80	D2/E100	D2/E120
Q1			
Q2	OK	OK	OK
Q3	OK	OK	OK
Q4	OK	OK	OK
Q5	OK	OK	OK
Câmara úmida	OK	OK	OK
Diclorometano	OK	OK	OK
Cross-cut	OK	OK	OK

Na Tabela 10, são apresentados os resultados intermediários do teste Q1 para ambos os lados da peça (o que foi pintado primeiro e passou duas vezes na estufa de cura, e seu oposto), considerado o mais severo e crítico para a aprovação da nova tinta e, conseqüentemente, do novo processo. Os resultados comparativos entre os lados da peça não apresentaram nenhuma tendência, visto que em alguns casos o lado que passou duas vezes pela estufa de cura apresentou desempenho inferior ao que passou apenas uma vez, e em outras amostras ocorreu o oposto. Dessa forma concluiu-se que, embora a temperatura de cura seja importante, o tempo adicional após a primeira cura não tem influência significativa para os resultados, não sendo necessária a implementação de alterações na linha de produção nesse ponto.

Observa-se que as piores performances foram das condições com o desengraxante D2 a 2%, possivelmente porque o processo não estava otimizado para o uso desse produto, já que as primeiras rodadas foram baseadas no desengraxante D1 a 1%.

Tabela 10: Resultados intermediários dos ensaios de resistência ao meio Q1 da 3ª rodada de testes, considerando a diferença entre o lado que passou 1x na estufa de cura e o que passou 2x.

Condição	72h		96h		120h	
	1x	2x	1x	2x	1x	2x
D1.1/E80						
D1.1/E100						
D1.1/E120						
D1.3/E80						
D1.3/E100						
D1.3/E120						

<b>D2/E80</b>						
<b>D2/E100</b>						
<b>D2/E120</b>						

As condições D1.1/E80, D1.3/E80 e D1.3/E100 apresentaram falhas somente no período final de teste, em 120 horas, sendo aprovadas nas etapas intermediárias de 72 e 96 horas. As condições D1.1/E80 e D1.3/E80 utilizaram a escova E1, com grãos menores, variando apenas a concentração do desengraxante D1 de 1% para 3%, respectivamente. Entre elas, a condição D1.3/E80 teve um desempenho inferior ao da condição D1.1/E80, o que pode ser associado à concentração mais elevada do desengraxante, sendo esse o ponto de diferença.

A condição D1.3/E100, por outro lado, diferia da D1.3/E80 apenas no tamanho dos grãos da escova, utilizando grãos médios, enquanto o desengraxante permanecia o mesmo. Essa alteração resultou em um desempenho melhor, indicando que a maior rugosidade proporcionada pela escova de grãos médios favoreceu a adesão da tinta. É importante ressaltar que o ataque alcalino gerado pelo produto químico do teste Q1 fragilizou a aderência da tinta, resultando nessa diferença de resultados. Sem a ação do meio, nesse caso, seriam necessários outros métodos para avaliação da influência da rugosidade, visto que o *cross-cut* teve aprovação em todas as condições.

A condição D1.1/E120, com escova de grãos maiores e desengraxante D1 1%, apesar de falhar logo em 72 horas de teste, não apresentou um comportamento de piora ao longo do restante do período. Pelo contrário, o resultado com 120 horas foi melhor do que o das condições D1.1/E80 e D1.3/E80, por exemplo, sugerindo que, apesar da falha inicial, manteve uma estabilidade relativa. Essa estabilidade pode ser devido a uma combinação mais equilibrada de preparação da superfície e condições de teste.

A condição D1.3/E120 (desengraxante D1 a 3% e escova E3 de granulometria 120), que foi a segunda melhor em termos de resultado às 120h, teve sua falha já em 72h de ensaio. As falhas em 96h e 120h, porém, foram pequenas e localizadas, com pequenos arranques próximos da extremidade da amostra, sendo a maior parte da falha composta por remoção parcial da camada de tinta e não do revestimento por completo.

A amostra D1.1/E100 (desengraxante D1 1% e grão 199 da escova) foi aprovada em todos os testes prévios exigidos pela norma interna, e apesar de ter tido um arranque pontual em um dos lados em 96h, foi considerada aprovada no teste Q1 em 120h e levada para testes de campo, que teve duração de 100 tanques completos da máquina. O resultado foi positivo visto que as peças não apresentaram remoção ou descascamento em larga escala da tinta base.

Também, é importante considerar que o ambiente fabril é suscetível a mudanças no ambiente e condições externas, em comparação com testes em laboratório, que podem ter influenciado nos resultados e não terem sido mapeadas. Isso explica o comportamento de pequenos arranques da tinta localizados, como aconteceu com a amostra D1.1/E100 em 96h, ou com a amostra D1.3/E120 em 96h e 120h, que podem ter sido consequência de pequenas sujidades oriundas da fábrica mesmo após o processo de limpeza com desengraxante. No geral, os testes mostram a importância de um bom preparo da superfície, tanto mecânico quanto químico, para a otimização da adesão da tinta.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Conforme apresentado na teoria, existe uma rugosidade da superfície ideal para a adesão da tinta ao substrato;
- Condições de peças preparadas com retífica plana reprovaram nos testes com produto de limpeza alcalino (Q1) e com o combustível de laboratório (Q3), indicando que maior rugosidade superficial favorece a adesão da tinta;
- Nanoconversor de camada melhorou a adesão química, mas não foi suficiente para aprovação em todos os testes e não foi adotado por motivos econômicos;
- Novas condições, embora não aprovadas em todos os testes, apresentaram melhor desempenho que a condição anterior do processo, que utilizava tinta à base de solvente com superfície retificada e sem uso de desengraxante;
- Configurar a estufa para  $\sim 175^{\circ}\text{C}$  mostrou resultados satisfatórios para o processo estudado;
- Menor espessura de camada, de  $\sim 30\mu\text{m}$ , apresentou resultados satisfatórios para o processo estudado;
- Desengraxante neutro (D1) tanto a 1% quanto a 3% de concentração, mesmo apresentando variação nos resultados, teve melhor performance do que o desengraxante alcalino para o processo estudado;
- Desengraxante alcalino (D2) a 2% não apresentou resultados satisfatórios para o processo estudado;
- A adesão da tinta à base de água em substrato de aço pode ser otimizada através do controle de rugosidade superficial, temperatura de cura e espessura de camada;
- A escolha dos preparos mecânicos e químicos, assim como a concentração do desengraxante, são cruciais para a adesão e desempenho do revestimento;
- Os resultados comparativos entre o lado da peça que passou uma vez na estufa de cura e o que passou duas vezes não apresentaram nenhuma tendência de comportamento;
- Embora a temperatura de cura seja importante, o tempo adicional conferido por uma segunda passagem na estufa de cura não tem influência significativa para os resultados;



## 7. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos durante as rodadas de testes, a escolha final para o novo processo foi definida considerando as condições que se mostraram mais eficientes para garantir a adesão da tinta e a durabilidade do revestimento. A temperatura de cura foi otimizada para um nível mais elevado, estabelecendo-se em 175°C, mais próximo do recomendado pelo fabricante e no limite máximo da capacidade do equipamento.

A espessura da camada de tinta foi reduzida para aproximadamente 30  $\mu\text{m}$ , visando compensar a limitação de temperatura da estufa. O desengraxante D1, em sua concentração de 1%, demonstrou ser o mais eficaz, garantindo uma limpeza suficiente sem comprometer a adesão da tinta nem aumentar os custos do processo.

Além disso, o escovamento com a escova E2, de grão médio, mostrou-se ideal para promover a ancoragem da tinta na superfície, sem causar rugosidade excessiva. Por fim, decidiu-se não utilizar um conversor de camada, visto que o processo otimizado já alcançava os requisitos de adesão e qualidade esperados, dispensando essa etapa adicional. Esses parâmetros combinados estabeleceram uma solução robusta para a implementação do novo processo.

## 8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o efeito das diferentes escovas na rugosidade da superfície a partir de medições quantitativas;
- Avaliar o efeito direto do nanoconversor de camada com as otimizações da etapa de pintura (temperatura e camada);
- Explorar a adesão de tintas à base de água em diferentes tipos de aço e outros metais;
- Correlacionar a composição química da tinta com a adesão ao substrato de aço;
- Avaliar diferentes curvas de temperatura controladas da estufa de cura na resistência do revestimento;
- Avaliar o efeito de passar duas vezes a peça na estufa de cura;
- Simular os diferentes parâmetros e condições em ambiente laboratorial controlado, para isolar totalmente as variáveis estudadas e sua influência no resultado;
- Entender o impacto do produto Q1 nas peças e o motivo pelo qual é o mais severo dentre os testes de resistência química;
- Correlacionar a composição química dos desengraxantes com diferentes níveis de limpeza da superfície.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASM Handbook Committee. ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. p. 126-139. DOI: 10.31399/asm.hb.v01.a0001008.
2. BALDAN, R. Adhesion phenomena in bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 38, p. 95-116, 2012.
3. COTELL, C.M.; SPRAGUE, J.A.; SMIDT, F.A., Jr., eds. ASM Handbook, Volume 5: Surface Engineering. p. 421-447. DOI: 10.31399/asm.hb.v05.a0001277.
4. CHEN, P.; WANG, Y.; LI, J.; WANG, H.; ZHANG, L. Adhesion and erosion properties of epoxy resin composite coatings reinforced with fly ash cenospheres and short glass fibers. *Progress in Organic Coatings*, 2018.
5. GNECCO, C.; MARIANO, R.; FERNANDES, F. *Tratamento de Superfície e Pintura*. Instituto Brasileiro De Siderurgia Centro Brasileiro Da Construção Em Aço, 2003.
6. HONGYU, W. et al. Adhesion and cohesion of epoxy-based industrial composite coatings. *Composites Part B: Engineering*, v. 193, 2020. ISSN 1359-8368.
7. JUDENSTEIN, P.; SANCHEZ, C. Hybrid organic–inorganic materials: a land of multidisciplinary. *J. Mater. Chem.*, v. 6, p. 511-525, 1996.
8. KIM, B. VOC Emissions from Automotive Painting and Their Control: A Review. *Engineering Research*, v. 16, p. 1-9, mar. 2011. DOI: 10.4491/eer.2011.16.1.001.
9. KWAAMBWA, H.M. A review of current and future challenges in paints and coatings chemistry. 2013. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:102279839>.
10. MOHANTY, D.; KANNY, M.K.; MOHANTY, S. et al. Characteristic properties of base coat of automobile paint: enhancement in scratch and abrasion resistance by nanoscale reinforcement—a review. *Polym. Bull.*, v. 80, p. 185–240, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04081-w>.
11. SILVA, L.F.M.; ÖCHSNER, A.; ADAMS, R. *Handbook of Adhesion Technology*. 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-01169-6\_1.
12. ZARO, G. Influência dos parâmetros de deposição do ácido hexafluorzircônio sobre aço galvanizado. 2013. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).
13. ZHU, J.; SUN, X.; BARBER, G.; HAN, X.; QIN, H. Effect of Carbon Content on Bainite Transformation Kinetics and Microstructure of 4140/4150 Steels. *European Scientific Journal ESJ*, v. 15, 2019. DOI: 10.19044/esj.2019.v15n9p518.