



FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

AVALIAÇÃO DE PENETRAÇÃO DE BANHOS DE PINTURA EM ÁREAS FECHADAS COM PEQUENAS DISTÂNCIAS ENTRE CHAPAS

**Salvador
2011**

RICARDO LIMA TRAVASSOS

Dissertação apresentada ao Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial, uma parceria da Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Universidade Federal da Bahia e Instituto de Tecnologia Aeronáutica, como requisito para obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Carreira Neto,

Co-orientador: Prof. Dr Sergio Rodrigues Barra

**Salvador
2011**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Faculdade de Tecnologia
SENAI CIMATEC

T779a

Travassos, Ricardo Lima

Avaliação de penetração de banhos de pintura em áreas fechadas com
pequenas distâncias entre chapas/ Ricardo Lima Travassos. 2011.
89f.; il.; color.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Carreira Neto
Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial) - Faculdade de
Tecnologia Senai-CIMATEC, Salvador, 2011.

1. Corrosão. 2. Eletrodeposição. 3. Fosfatização. 4. Galvanização. 5. Pintura
I. Faculdade de Tecnologia Senai-CIMATEC. II. Carreira Neto, Manoel. III. Título.

CDD: 620.11223

"A vida é uma jornada, uma jornada para descobrir quem você é."

Robert Happé

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha querida esposa Sandra, pelos apoio, dedicação e amor dispensados.

Às minhas filhas Juliana e Carol pela ajuda, compreensão e peço desculpas pela ausência em muitos momentos.

Aos meus pais pelo apoio e incentivo para continuar a jornada em momentos difíceis.

Ao meu orientador e amigo Manoel Carreira pelo apoio, orientação e direcionamento em horas de decisão.

Ao Thiago Porto pelo apoio incondicional, boa vontade e motivação nas etapas de execução dos experimentos, sem o qual seria muito difícil a conclusão deste trabalho, bem como ao amigo Sebastião, pelo apoio nos experimentos.

Ao meus colegas de trabalho Afonso Filho, Gustavo Mota e Vladimir Farias pela ajuda e apoio dado.

Ao meu amigo Guilherme Luck, pela dedicação no apoio nas análises dos dados.

RESUMO

Devido à acirrada competitividade no ambiente automobilístico, se faz necessário melhorias do produto desde à sua concepção até à entrega ao consumidor. Como exemplo do peso do veículo aliado com a redução dos custos, através da redução da espessura e/ou do tipo material da chapa metálica utilizada. Para viabilização dessas ações são realizadas mudança no perfil, introdução de vincos e repuxos, além de outros recursos de engenharia, com significativas variações na forma das peças e redução das distâncias nas regiões da interface entre as peças envolvidas.

Essa redução na estrutura das carrocerias de automóveis, impacta negativamente no acesso dos banhos de pintura, afetando a qualidade da proteção à corrosão.

Fundamentado nessa premissa, esse trabalho busca avaliar, a influência das pequenas distâncias entre chapas, no processo de pintura por imersão, focado na proteção anticorrosiva da coluna central do habitáculo do veículo (coluna "B"). As análises realizadas necessitaram de conhecimento mais aprofundado de sistemas de proteção à corrosão, como pintura automotiva (pré-tratamento, eletrodeposição, tintas) e revestimento superficial (galvanização).

Para avaliação da influência da distância entre chapas, na proteção anticorrosiva, foram realizados experimentos, que simulassem a realidade de uma região de um conjunto estrutural dos automóveis (coluna "B" e reforços), incrementando-se a distância entre as chapas em 0,75 mm até atingir 5,25 mm. Após passagem pelos processos de pintura, foi observado o resultado da fosfatização e da pintura por Imersão (Eletrodeposição).

Após a realização dos experimentos, em instalações de pintura similares à automotiva, foi observado que há influência do acabamento superficial e do espaçamento entre as chapas, na formação da camada de fosfato e na distribuição da espessura camada da película de tinta. Foi gerada uma equação que pode-se prever a camada da película de tinta a ser aplicada para situações de pequenas distâncias entre chapas, como nas regiões internas e/ou caixas fechadas dos veículos, que poderá servir para futuras decisões no conceito dos projetos sob o ponto de vista de proteção anticorrosiva.

Palavras-chave: Corrosão, Eletrodeposição, Fosfatização, Galvanização, Pintura.

ABSTRACT

Due to the fierce competitiveness of the automotive environment, it is necessary improvements on the products since the conception until the delivery to the costumer. As an example of the weight of the vehicle together with the reduction of costs by reducing the thickness and / or the type of sheet metal material used. For feasibility of these actions are formed changes in the profile, introduction of creases, fountains and other engineering resources, with significant variations in the shape of the parts and reducing the interface distances between the parts involved.

This reduction in the structure of car bodies, negatively impacts on access on the baths of paint, affecting the quality of corrosion protection.

Based on this premise, this paper seeks to assess the influence of small distances between plates in the process of painting by dipping, focused on corrosion protection of the central column of the carrier vehicle (column "B"). The analysis performed required deeper understanding of corrosion protection systems, such as automotive paint (pre-treatment, electroplating, paints) and surface coating (galvanization).

To evaluate the influence of distance between plates in corrosion protection, experiments were performed, which simulate the reality of a region of a structural assembly of the car (column "B" and reinforcements), increasing the distance between the plates at 0, 75 mm up to 5.25 mm. After passing through the painting process, the result was observed in phosphating and immersion paint (Electroplating).

After the experiments in facilities similar to automotive paint, it was observed that, there is influence of the surface finish and the spacing between the plates, on the formation of the phosphate layer and the layer thickness distribution, of the film. It generated an equation that can predict the layer of the film, to be applied on situations of small distances between plates, as in the inner regions and/or closed boxes of vehicles, which may be useful for future decisions, on the concept of projects under point of view of corrosion protection.

Keywords: Corrosion, Electroplating, Phosphating, Plating, Painting

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Principais setores consumidores de chapas revestidas com zinco no mercado brasileiro. _____	7
Figura 3.2 - Composição química das tintas. _____	13
Figura 3.3 - Ilustração de alguns tipos de molhabilidade de sólidos por um líquido. _____	17
Figura 3.4 - Esquema das medidas de ângulo de contato e da tensão superficial _____	18
Figura 3.5 - Esquema ilustrativo de fatores que provocam a histerese do ângulo de contato ($\Delta\theta = \theta_{\max} - \theta_{\min}$): (a) rugosidade da superfície do substrato e (b) heterogeneidade química da superfície. _____	19
Figura 3.6 - Efeito da estrutura e dimensões da região do produto de reação nas medidas do ângulo de contato. L = material líquido, PR = produto de reação. _____	21
Figura 3.7 - Variação do ângulo de contato devido à evaporação do material resultando na diminuição do volume do líquido. _____	22
Figura 3.8 - Processo de fosfatização: seqüências dos banhos. _____	24
Figura 3.9 - Sistema de pintura por eletroforese anódica (Anaforese) _____	29
Figura 3.10 - Sistema de pintura por eletroforese catódica (Cataforese) _____	30
Figura 4.1- CP vista superior do CP com AL galvanizadas passadas pelo processo de pré-tratamento. _____	33
Figura 4.2 - CP vista de topo do CP com AL galvanizadas passadas pelo processo de pré-tratamento. _____	34
Figura 4.3 - Vista de topo do CP com 01 (um) espaçador (ES) _____	34
Figura 4.4 - Vista de topo do CP com 02 (dois) espaçadores (ES) _____	35
Figura 4.5 - CPs tipo A antes de iniciar o experimento fixados na gondula de processo por molas e gancheiras _____	38
Figura 4.6 - CPs tipo B antes de iniciar o experimento fixados na gondula de processo por molas e gancheiras _____	38
Figura 4.7 - CPs fixados na gondula de processo por molas e gancheiras _____	39
Figura 4.8 - Foto ilustrativa de uma instalação de processo de pintura "Stop and Go" – Etapa de Pré Tratamento _____	40

Figura 4.9 - Foto ilustrativa da instalação do processo de pintura	
"Stop and Go" – Pintura e-coat_____	40
Figura 4.10 - Máscara de medição_____	42
Figura 4.11 - Planilha de coleta de dados_____	43
Figura 4.12 - Medidor de espessura_____	43
Figura 5.1 - Comparação entre CPs de chapas fosfatizadas e pintadas em e-coat para aço não galvanizado_____	46
Figura 5.2 - Comparação entre CPs de chapas fosfatizadas e pintadas em e-coat para aço galvanizado_____	47
Figura 5.3 - Comparação do resultado do processo de fosfatização entre CPs de chapas não galvanizada e galvanizada_____	49
Figura 5.4 - Microscopia de varredura da camada de fosfato para aço não galvanizado._____	51
Figura 5.5 - Microscopia de varredura da camada de fosfato para aço galvanizado (Fosfofilita Modificada)._____	51
Figura 5.6 - Comparação entre CPs do resultado do processo de pintura para chapas não galvanizada e galvanizada._____	53
Figura 5.7 - Padrão utilizado para medição de espessura da camada de e-coat nas chapas pintadas._____	54
Figura 5.8 - Kit para teste de aderência mostrando lâmina riscadora, fita adesiva específica e lupa._____	55
Figura 5.9 - Resultado teste de aderência na borda e no centro da chapa não galvanizada._____	56
Figura 5.10 - Resultado teste de aderência na borda e no centro da chapa galvanizada._____	56
Figura 5.11 - Gráfico da distribuição da espessura de camada ao longo do CP para chapa de aço galvanizado._____	58
Figura 5.12 - Gráfico da distribuição da espessura de camada ao longo do CP para chapa de aço galvanizado._____	59
Figura 5.13 - Gráfico da distribuição da espessura de camada por ponto de medição em função do GAP para chapa de aço não galvanizado.____	59
Figura 5.14 - Gráfico da distribuição da espessura de camada por ponto de medição em função do GAP para chapa de aço galvanizado.____	60
Figura 5.15 - Gráfico da interação dos fatores do experimento: espaçamento, posição e acabamento superficial._____	62

Figura 5.16 - Influência do acabamento superficial na camada de e-coat,
onde (-1) Chapa Não galvanizada e (1) Chapa galvanizada. _____ 63

Figura 5.17 - Tela do Minitab: Parâmetros de análise dos fatores "espaçamento",
"posição" e "acabamento superficial" e interações do experimento. ____ 64

LISTA DE TABELAS

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Funções e requisitos das camadas de pintura.	12
Tabela 3.2 - Principais tipos de resina e suas características mais importantes.	14
Tabela 3.3 - Classificação dos pigmentos.	15
Tabela 3.4 - Fosfatos utilizados em fosfatização.	26
Tabela 4.1 - Planejamento do experimento.	36
Tabela 4.2 - Quantidade total de experimentos.	44
Tabela 5.1 - Coleta de dados do experimento para aço galvanizado.	57
Tabela 5.2 - Coleta de dados do experimento para aço não galvanizado.	58
Tabela 5.3 - Dados experimentais com espaçamentos de 4,5 mm (N6) e 5,25 mm (N7).	66

LISTA DE SIGLAS

Ecoat- Tinta para pintura por eletrodeposição

ES – Espaçadores

CP- Corpo de prova

AL – Alma (chapas de teste a serem avaliadas)

N*- Denominação corpo de prova não galvanizado.

Z*- Denominação de corpo de prova galvanizado

Ângulo θ – Ângulo de contato

λ – Tensão superficial

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Equação de Young _____	16
Equação 2: Equação para previsão da camada de ecoat _____	64
Equação 3: Equação para aços não galvanizados (-1) e posição (6) ponto de mínima espessura esperada. _____	64
Equação 4: Equação para aços galvanizados (1) e posição (6) ponto de mínima espessura esperada. _____	64

SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO

AGRADECIMENTOS

EPÍGRAFE

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS, TABELAS E QUADROS

LISTA DE SIGLAS

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	4
2.1	OBJETIVO GERAL	4
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1	A INDÚSTRIA AUTOMOTIVA E O AÇO CARBONO.	5
3.2	PROTEÇÃO	7
3.2.1	O processo de galvanização de uma chapa de aço carbono	8
3.3	PINTURA	8
3.3.1	Tipos de revestimento anticorrosivo	10
3.4	PROCESSO DE PINTURA AUTOMOTIVA -	16
3.4.1	FENÔMENO DE MOLHABILIDADE OU CAPILARIDADE	16
3.4.2	Ângulo de contato	17
3.4.3	Fatores que interferem na molhabilidade	18
3.4.4	Pré-tratamento	23
3.4.5	Pintura Eletroforética	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1	Materiais Utilizados	32
4.2	Corpos de Prova	33
4.2.1	Elaboração dos corpos de prova	33
4.2.2	Quantidade de corpos de prova	35
4.3	Elaboração de ensaios	37
4.3.1	Descrição dos ensaios	37
4.3.2	Processo de fabricação	39
4.3.3	Controle de processo	41

4.3.4	Avaliação dos ensaios	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1	Testes iniciais	44
5.2	Experimento definitivos	45
5.2.1	Análise Visual	45
5.2.2	Análise da aderência da película de tinta	55
5.2.3	Espessura da camada de e-coat e análise estatística das medições.	57
5.2.4	Experimento comprovatório	66
6	CONCLUSÕES	67
7	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	68
8	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	69

1 INTRODUÇÃO

Devido a uma estratégia do mercado automobilístico nacional que visa conquistar novos mercados internacionais, o aumento da competitividade e à maior exigência dos consumidores nacionais, se faz necessário a melhoria da qualidade dos veículos. Entre os itens a serem analisados, no que se refere à qualidade de um veículo, a vida útil é um dos mais importantes. Contudo, elevá-la não seria tarefa difícil se não tivesse que aliar a essa melhoria um baixo custo de produção.

Um dos problemas que diminuem a vida útil do veículo é a corrosão das carrocerias. Este é um fator que, além de gerar a insatisfação do cliente, pode comprometer o desempenho das peças, aumentar o custo em garantia do veículo e afetar negativamente a imagem da empresa e do produto. Atualmente, uma das técnicas mais utilizadas pela indústria automobilística para se evitar a corrosão das carrocerias é a galvanização de chapas de aço e o processo de pintura do veículo.

A galvanização trata-se do revestimento de chapas de aço por uma camada protetora de Zinco (Zn). Por meio dessa técnica, busca-se incrementar a proteção superficial das mesmas, melhorando seu desempenho contra a corrosão. Para a indústria automobilística são usadas diferentes espessuras de camada de Zn, geralmente entre 40 e 70 g/m², chegando à 90 g/m² em alguns pontos específicos (NACE, 2009, s.p.).

Contudo, como o resultado obtido é diretamente proporcional à espessura de camada aplicada, logo, o processo de galvanização gera uma elevação dos custos de produção do veículo. Segundo os principais fabricantes de chapa de aço galvanizados do Brasil, para o incremento da espessura da camada de Zn de 40 a 70 g/m² ocorre uma elevação no custo direto com proteção, na ordem de 5%.

A pintura que o veículo recebe, é composta de várias camadas como pré-tratamento, eletrodeposição, primer, fundos de efeitos (base) e verniz. Ela tem outra função além de trabalhar atributos de *design*, esta é aplicada também como uma camada protetora contra a corrosão, nas chapas de aço. Esse fator protetivo tem

fundamental importância, principalmente nas partes internas da carroceria, onde o acesso para o processo de pintura é mais difícil e serão aplicadas somente as primeiras camadas que são o pré-tratamento e a pintura por eletrodeposição. Garantir que as partes internas da carroceria sejam efetivamente protegidas por estes processos, é de fundamental importância para a qualidade total do veículo.

A forma de garantir a proteção das áreas internas (interno do assoalho, colunas estruturais e outros), é facilitar o acesso dos banhos de pintura à estas áreas, que é conseguido aumentando-se a quantidade ou dimensão de furos nas peças e/ou a distância entre as chapas. Porém essas ações seguem no sentido contrário ao das necessidades de projeto para a engenharia, pois o incremento de furações ou o aumento da dimensão dos furos existentes promove perda de resistência estrutural dos componentes e o aumento dos espaços entre as chapas (*Gaps*), além de reduzir a disponibilidade de espaço interno dos veículos.

Ao se projetar os veículos, ocorrem muitas discussões sobre a relação custos x benefícios. Utilizando-se maiores espaçamentos entre as peças ou adicionando-se furações, para melhorar a proteção à corrosão devido à melhor atuação dos banhos de pintura, pode haver diminuição da resistência estrutural do veículo. Além disso reduz-se as oportunidades de aumento de compactação dos espaços internos da carroceria, diminuindo-se as chances de introdução de novos dispositivos como por exemplo air bag e sensores.

Para realizar projetos mais robustos, afim de eliminar esses efeitos, tem-se que utilizar materiais de maior resistência mecânica, perfis de formas mais complexas ou chapas de maiores espessuras. Isso representa um incremento de custo do veículo que, na maioria das vezes, o cliente final não reconhece como valor agregado ao produto. Por outro lado, não se pode perder em desempenho com relação à resistência a corrosão, pois esse fator será certamente percebido pelo consumidor e retornará como custo em garantia do veículo, reduzindo-se dessa forma, o retorno financeiro para a empresa.

Uma das oportunidades existentes é utilizar o menor espaçamento entre chapas possível, de forma que permita o acesso dos banhos de pintura e a proteção necessária para obter uma camada de pintura homogênea. Baseado nessa premissa, foi desenvolvido o presente estudo, findando na análise dos resultados dos experimentos realizados.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar influência da redução das distâncias entre as chapas (*Gaps*), na proteção anti-corrosiva de automóveis.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar o processo de pintura automotiva;
- Analisar os impactos da redução das distâncias entre as chapas (*Gaps*), na coluna central de sustentação do habitáculo de veículos de passeio (Coluna "B"), quanto à formação da camada de fosfato e da película de e-coat, proteção anti-corrosiva do processo de pintura.
- Buscar uma distância mínima possível entre as chapas (*Gaps*), para obtenção de camada homogênea da película de e-coat.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A INDÚSTRIA AUTOMOTIVA E O AÇO CARBONO.

Existe na natureza, cerca de oitenta metais puros que podem gerar aproximadamente 40.000 ligas, cada uma representando suas características próprias (NACE, 1975, p.15). Essa diversidade proporciona ao projetista uma grande variedade de tipos de matéria-prima para a fabricação de um dado produto. Contudo, o mesmo projetista deve estar atento à escolha do material, pois a correta determinação no planejamento de um produto, deve levar em conta alguns fatores como por exemplo: processo de fabricação, esforços solicitantes, vida útil esperada, resistência ao meio de trabalho e, inclusive formas de proteção disponíveis do material.

O ferro e suas ligas, são muito usados na indústria automotiva, sendo a mais comum a liga Fe-C, também chamada de aço, ou aço carbono. O ferro é encontrado na natureza, na sua maioria, na forma de minério, ou seja, óxidos de ferro.

O aço-carbono, ou somente aço, é a liga que apresenta a melhor combinação de propriedades favoráveis para a engenharia. É um material versátil, proporciona resistência e rigidez, permite a fabricação em larga escala. Sua matéria prima é encontrada em abundância na natureza, apresenta excelente resistência à corrosão, quando revestidos, elevada capacidade de absorção de energia, boas propriedades de fadiga. Além disso ainda possui, bons requisitos de conformabilidade e soldabilidade, altas taxas de endurecimento de trabalho, capacidade de envelhecimento e excelente capacidade de ser pintada. Desse modo, o aço apresenta-se como um produto ideal para a indústria automotiva (AIS, 2000, p.211).

Para a indústria automobilística, a proteção do aço, às agressões do meio ambiente, é de suma importância, pois a mesma gasta bilhões de dólares por ano em reparos e manutenção dos problemas, como por exemplo, os gerados a partir da corrosão (PANOSIAN1993, p. 1).

O aço comum sem adição de elementos ligantes possui baixa resistência à corrosão, levando à formação de filmes de óxidos/hidróxidos ou sais com baixa aderência e sem capacidade de proteger a superfície contra o ataque dos meios agressivos. Dependendo da sua utilização, principalmente quando exposto à umidade, temperatura, condição severa de trabalho, além de outros fatores, pode sofrer o fenômeno da corrosão. Com o intuito de aumentar a resistência à corrosão dos aços, utiliza-se a aplicação de revestimentos protetores que formam um filme capaz de garantir a proteção contra a corrosão. Esses filmes podem ser formados pela adição de uma camada de Zn, ou de matérias orgânicas, como tintas (VAN VLACK, 1984).

Na indústria automobilística, onde é requerido fundamentalmente propriedades como conformabilidade e soldabilidade, são normalmente utilizadas aços galvanizados, com espessuras de camada de revestimento de Zn entre 40 à 90 g/m². A definição da espessura da camada protetora, dependerá da exposição da peça ao ambiente corrosivo, da expectativa do consumidor com relação ao tempo de vida do produto, das condições climáticas do local aonde o automóvel será utilizado. Para os veículos de maior valor agregado, torna-se viável a utilização de maiores camadas de revestimento. A medida mais utilizada é a de 60 g/m². (ALVARENGA; MOREIRA; BUONO, 2007, p.20).

A produção de aço galvanizado no Brasil iniciou-se há algumas décadas, mais foi a partir da década de 80, quando as indústrias começaram a procurar por novas matérias-primas para a fabricação de produtos mais duráveis, foi que a produção desta matéria-prima tomou-se de maior importância. Atualmente, a capacidade brasileira de produção de chapas revestidas com zinco é de 2.740 mil t/ano, dividida praticamente entre a CSN (54%), a Usiminas (28%) e a Vega do Sul (18%). No Brasil, o setor automotivo também é o grande responsável pela demanda de chapas revestidas, consumindo em 2005 foi de cerca de 780 mil toneladas (ALVARENGA; MOREIRA; BUONO, 2007, p.22). A participação no mercado interno dos principais usuários nacionais de chapas revestidas com zinco pode ser vista na figura 3.1

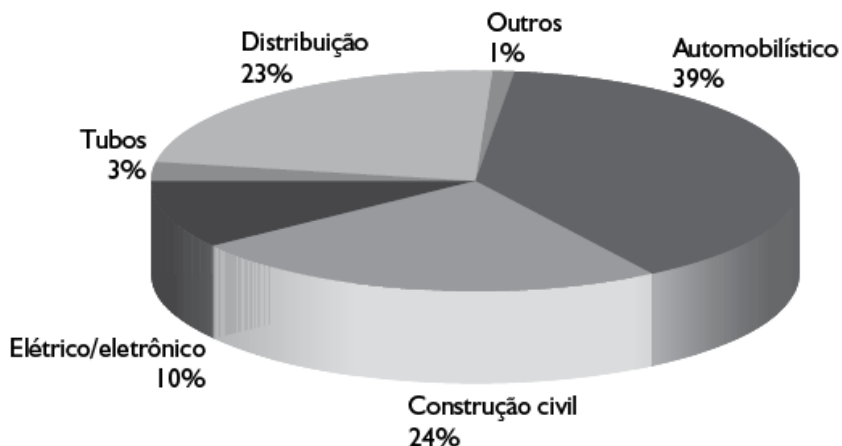


Figura 3.1: Principais setores consumidores de chapas revestidas com zinco no mercado brasileiro.

Fonte: Superintendência de Marketing do Sistema Usiminas, 2006, *apud* Alvarenga; Moreira; Buono, 2007.

O aumento da camada de Zn nas chapas, gera efeitos indesejáveis na produção do automóvel, como a diminuição da conformabilidade das chapas e aumento do tempo de soldagem, que por consequência aumentam o custo de produção. Ainda hoje, devido à competitividade do setor e as mudanças ambientais, discute-se qual a camada ótima de Zn, objetivando o equilíbrio entre os custos de produção e os de manutenção do automóvel, relacionados à corrosão.

Para fins desta pesquisa, será estudado o método de aplicação de Pintura, banhos de pré-tratamento e revestimentos orgânicos e inorgânicos (tintas), que serão detalhados em um próximo item.

3.2 PROTEÇÃO

Proteção contra corrosão consiste em controlar a velocidades de reação da mesma, por intermédio da aplicação de inibidores, proteção catódica ou anódica, aplicação e desenvolvimento de revestimentos, modificação estrutural da superfície, modificações e controle do meio corrosivo como, por exemplo, o controle de pH (OSÓRIO, 2004, p.64).

A proteção contra a corrosão pode ser feita de algumas formas. Para tal, é preciso ater-se à escolha do material mais adequado com relação às características do produto que se pretende produzir, ao meio que vai ser exposto e às técnicas de proteção anticorrosiva utilizadas. Existem materiais que possuem melhores comportamentos eletroquímicos quanto à corrosão que outros. No entanto, para aqueles que não apresentam um razoável desempenho, podem ter a resistência à corrosão melhorada se utilizados métodos ou técnicas de proteção que minimizam a ação e os efeitos corrosivos (OSÓRIO, 2004, p.64).

3.2.1 O processo de galvanização de uma chapa de aço carbono

O uso do Zn na indústria automobilística para proteção anticorrosiva do aço carbono se dá devido ao fenômeno da compatibilidade do aço e o zinco em todas as práticas usadas pela indústria (fabrico, montagem, pintura e acabamento final). Segundo Marques, Carreira e Ramos (2008, p.3); o Zn e as suas ligas protegem o aço da corrosão por três mecanismos: barreira, galvânico e produtos de corrosão do zinco. Por barreira, entende-se como revestimento que isola o aço do meio corrosivo; o mecanismo galvânico ocorre quando o aço exposto nas falhas do revestimento é protegido galvanicamente pela dissolução anódica preferencial do revestimento de zinco e, concomitante, a polarização catódica do aço. E os produtos de corrosão de Zn agem protegendo o aço exposto por falhas do revestimento, através de uma camada formada pelos sais e óxidos de zinco precipitados. O pH elevado da superfície do aço catodicamente protegida promove a deposição do zinco dissolvido, na forma de hidróxido ou compostos afins.

3.3 PINTURA

A pintura é conhecida pelo homem desde os tempos das cavernas com as pinturas rupestres. Os egípcios (1500 aC) utilizam as técnicas de pinturas produzindo resinas a partir de plantas, sendo pigmentadas com pedras semi preciosas. Foi aproximadamente no fim da idade moderna, no século XVII, que algumas técnicas de pintura e pigmentos começam a ser pesquisados e desenvolvidos mais

intensamente, chegando ao fim do século XIX com disponibilidade e produção industrial (ROBINS, 1997; HARLEY, 1970; BARNETTA et al, 2006; HARMMOND, 2003).

Na indústria automotiva, a cor preta era predominante inicialmente, a exemplo do lendário Ford T, ou Ford de Bigode, que em 1915, para cortar custos e popularizar o produto, passou a ser produzido exclusivamente na cor preta, situação que perdurou até 1926. Desta época, ficou célebre uma das muitas controvertidas frases de Henry Ford: "O carro é disponível em qualquer cor, contanto que seja preto.". Somente a partir dos anos de 1930 os revestimentos automobilísticos começaram a usar esmaltes sintéticos com pigmentação colorida, sendo a General Motors e a Ford Motor Company os principais responsáveis por desenvolver técnicas de pintura mais eficientes, alcançando menor tempo de pintura, com custos reduzidos, melhor acabamento e resistência. Foi somente ao final da década de 1970 que os carros começam a ser pintados com as resinas poliuretanas e as tintas eletroforéticas catódicas (Automotive Steel Design Manual, 2002).

A pintura automotiva está alicerçada em dois pontos: a proteção anticorrosiva e a aparência. A pintura, ou revestimento é um dos métodos mais utilizados para proteção anticorrosiva, isto porque trata-se de um método econômico, que além de proporcionar um bom resultado de proteção, garante também uma melhora no acabamento final do produto (VÉRGES,2005).

Para que um sistema de pintura possa apresentar melhor resultado tanto no aspecto estético como de proteção, é preciso que haja um bom preparo na superfície do aço. É preciso eliminar a camada de óxido de ferro, também conhecida como carepa de laminação, deixada sobre o aço. Esta tende acelerar a corrosão através do efeito galvânico e a ferrugem hidratada, que pode conter sulfatos solúveis poderão promover a falha prematura do revestimento (PANNONI, 2005). Outro ponto simples de se compreender é que as tintas não aderem sobre ferrugem, pois esta é porosa e se desintegra, devendo ser removida completamente antes da peça de aço receber a pintura (GINECO, 2000).

O desempenho anticorrosivo depende também da combinação do ambiente de exposição do metal com o tipo de tinta usada (FERNANDES, MARIANO, GNECCO, 2003). É preciso analisar o ambiente que se encontra a peça a ser protegida. Basicamente são cinco os tipos de ambiente, sendo eles: rurais, urbanos, industrial moderado, industrial agressivo e marinho. Os três primeiros utilizam-se um sistema de pintura e os dois últimos utilizam outro sistema mais robusto, além do número de demãos diferenciado (GNECCO, 2000).

3.3.1 Tipos de revestimento anticorrosivo

Existem três tipos básicos de sistemas de proteção anticorrosiva utilizados em aços. São eles: proteção anticorrosiva através de revestimento metálico, através de revestimento não metálico inorgânico e através de revestimento não metálico orgânico.

3.3.1.1 Revestimentos Metálicos

Os revestimentos metálicos são feitos com a formação de películas protetoras de óxidos, hidróxidos e outros compostos pela reação com os oxidantes do meio corrosivo, como é o caso do alumínio, cromo, níquel e zinco eletrolítico. Uma característica dos metais utilizados nos revestimentos é que esses apresentam valores elevados de sobretensão ou sobrevoltagem, sendo então mais resistentes ao ataque dos ácidos em meios não-aerados (estanho, chumbo, zinco, cádmio). As técnicas mais frequentes são imersão à quente, aspersão térmica, eletrodeposição, cementação e outras. (PANNONI, 2005). No caso dos aços para a indústria automobilística, os processos mais utilizados são imersão à quente e eletrodeposição.

3.3.1.2 Revestimentos inorgânicos

São obtidos por depósito de compostos inorgânicos feitos diretamente na superfície metálica ou formados sobre essa superfície. Os mais comuns são: esmaltes

vitrosos, vidros, porcelanas, cimentos, óxidos, carbetos, nitretos, boretos e silicetos (GENTIL, 1996).

3.3.1.3 Revestimentos orgânicos

Esse é o método de controle da corrosão mais comum, sendo usada em aproximadamente 90% de todas as superfícies metálicas e utilizado neste trabalho. Fatores como a variedade dos tipos de pintura, das cores, os processos de aplicação e a possibilidade de combinação das tintas com revestimentos metálicos, têm proporcionado o uso deste tipo de revestimento em larga escala (VÉRGES, 2005).

A tinta é uma composição líquida que depois de aplicada sobre uma superfície, passa por um processo de secagem ou cura e se transforma em um filme sólido, fino, aderente, impermeável e flexível (FERNANDES, MARIANO, GNECCO, 2003).

3.3.1.3.1 Classificação em função do tipo de tinta

Na indústria automobilística, o sistema de pintura utilizado é composto por quatro camadas, sendo elas: uma tinta primária (eletroforética), uma tinta intermediária (primer) e duas tintas de acabamento (finishing ou topcoat) (MAYNE, 1973 *apud* VÉRGES, 2005).

3.3.1.3.2 Tinta primária

É a base do sistema de pintura, aplicada primeiramente. Deve conter componentes com ação anticorrosiva, boa aderência à superfície de aço e ser compatível com a camada intermediária e/ou de acabamento (FERNANDES, MARIANO, GNECCO, 2003).

3.3.1.3.3 Tinta intermediária

Servem para complementar as características mecânicas e de impermeabilidade do sistema de pintura, permitindo alcançar maiores espessuras e resistência iônica. Deve ser compatível com a tinta primária e a tinta de acabamento (VÉRGES, 2005).

3.3.1.3.4 Tintas de acabamento

Tem como função fornecer um selamento resistente, formando uma barreira inicial ao ambiente, a agentes químicos e intempéries. Produz uma superfície resistente ao desgaste e fornece boa aparência com características estéticas de cor, textura e brilho (MAYNE, 1973 apud VÉRGES, 2005).

As características das pinturas estão organizadas na tabela 3.1:

Tabela 3.1: Funções e requisitos das camadas de pintura.

REVESTIMENTO	FUNÇÃO	REQUISITO ESPECÍFICO	REQUISITOS GERAIS
Primer	Aderência e proteção anticorrosiva	Aderência ao substrato Compatível ao intermediário	Aderência, coesão resistência, flexibilidade ligação interna
Intermediário	Espessura e estrutura	Compatível ao primer Compatível ao acabamento	Coesão, ligação entre camadas, espessura resistência química e elétrica.
Acabamento	Resistência a atmosfera	Resistência ao ambiente e/ou atmosfera Compatível ao intermediário	Selamento superficial, resistência, flexibilidade, aparência, dureza.

Fonte: Vêrges, 2005.

3.3.1.3.5 Composição das tintas

As tintas para recobrimento de chapa de aço são compostas por: solventes, resinas, pigmentos e aditivos como ilustrado na figura 3.2



Figura 3.2 - Composição química das tintas
 Fonte: Fernandes, Mariano, Gnecco, 2003.

3.3.1.3.6 Solventes:

São substâncias puras com capacidade de dissolver outros materiais sem alterar suas propriedades químicas. Empregados tanto para auxiliar na fabricação das tintas, solubilização da resina e no controle de viscosidade, durante sua aplicação e, quando necessário, na remoção (GENTIL, 1996).

Os diferentes tipos de solventes para aplicação em aço são: hidrocarbonetos alifáticos (aguarrás e naftas leves), hidrocarbonetos aromáticos (xileno e tolueno), glicóis (etil glicol, butil glicol, acetato de etilglicol, acetato de butil glicol), acetatos (acetato de etila, acetato de butila, acetato de isopropila), cetonas (metil etil cetona-MEK, metil isobutil cetona-MIBK e ciclohexanona) e álcoois (álcool isopropílico e álcool butílico) (FERNANDES, MARIANO, GNECCO, 2003).

3.3.1.3.7 Resinas

As resinas são formadoras da película da tinta e são responsáveis por características físicas e químicas desta como o brilho, a resistência química e física, a secagem, a aderência e outros. (GUIA TÉCNICO AMBIENTAL - TINTAS E VERNIZES, 2006).

A tabela 3.2, apresenta os principais tipos de resina, bem como suas características mais importantes.

Tabela 3.2: Principais tipos de resina e suas características mais importantes

TIPOS DE RESINA	FORMAÇÃO	VANTAGEM	DESVANTAGEM	UTILIZAÇÃO
Alquídicas	Polímero obtido pela esterificação de poliácidos e ácidos graxos com polialcoois.	Apresentam grande resistência mecânica e secagem rápida.	Baixa resistência à corrosão, baixa flexibilidade, não resistem ao molhamento constante ou à imersão em água.	Para fins decorativos e como primers anticorrosivos na indústria automobilística devido ao rápido tempo de secagem.
Epóxi	Formadas na grande maioria pela reação do bisfenol A com epícloridina.	Resistem à umidade, imersão em água doce ou salgada, lubrificantes, combustíveis e diversos produtos químicos.	Não são indicadas para a exposição ao intemperismo (ação do sol e da chuva) pois desbotam e perdem o brilho	Principal utilização é como primer ou como tinta intermediária.
Poliuretanas	Resultado da condensação de poliálcoois com isocianato, gerando uma unidade polimérica.	Resistentes ao intemperismo, a perda de cor e de brilho, alto grau de dureza, resistência a abrasão e grande resistência química.	Custo elevado	Indicadas para a pintura de acabamento em estruturas expostas ao tempo. Pinturas de substratos ferrosos sobre tinta de fundo epóxi.
Acrílicas	Polimerização de monômeros acrílicos e metacrílicos.	Resistentes ao intemperismo e possuem alto brilho.	Baixo padrão estético	São indicadas para pintura de acabamento. Amplamente utilizadas na indústria petroquímica.
Vinílicas	Copolimerização de cloreto de vinila e acetato de etila.	Resistência à abrasão, boa resistência química e à água, particularmente em condições ácidas. Resistência a corrosão depende de boa aplicação da pintura e espessura.	Em exteriores, tendência ao amarelamento e a calcinação (formação de poeira na superfície do filme), baixa resistência térmica.	Suas emulsões são utilizadas nas tintas latex vinílicas e vinil acrílicas.

Fonte:

Fonte:(GUIA TÉCNICO AMBIENTAL - TINTAS E VERNIZES, 2006).

3.3.1.3.8 Pigmento:

Os pigmentos têm aproximadamente 5 μm de diâmetro e estão dispostos em suspensão na tinta líquida, que são aglomerados pela resina após a secagem, formando uma camada uniforme sobre o substrato. Os pigmentos são responsáveis por dar a cor, opacidade, consistência, dureza, resistência e coesão da resina, além de também contribuem na inibição do processo corrosivo (PANNONI, 2005). Os pigmentos podem ser classificados em três grupos conforme sua função principal, podendo ser anticorrosivos, opacificantes ou extensores, como pode-se observar pela tabela 3.3 :

Tabela 3.3: Classificação dos pigmentos

<p><i>Anticorrosivos:</i> são os pigmentos que, incorporados às tintas, conferem proteção anticorrosiva ao aço por mecanismos químicos ou eletroquímicos como, por exemplo, zarcão (Pb_3O_4), cromato de zinco, molibdatos de zinco, fosfato de zinco e pó de zinco;</p>
<p><i>Opacificantes coloridos e tintoriais:</i> conferem cor e opacidade à tinta. É importante não confundir pigmentos opacificantes, com corantes que são solúveis no veículo da tinta, conferem cor, mas não conferem opacidade;</p>
<p><i>Cargas ou extensores:</i> não conferem cor nem opacidade às tintas. Apontam-se diversas razões para o seu emprego na composição das tintas, como reduzir o custo final do produto; melhorar as propriedades mecânicas da película, como abrasão pela composição de quartzo (SiO_2) ou óxido de alumínio ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$). Obter determinadas propriedades, como por exemplo, o fosqueamento de uma tinta, aumentar o teor de sólidos, no caso das tintas de alta espessura. São exemplos: mica, talco, caulim entre outras.</p>

Fonte: Autor adaptado de Gentil, 1996

3.3.1.3.9 Aditivos:

Esses são os de menor quantidade que compõem a tinta, na ordem de 0,1 a 1,0%, têm função de melhorar o processo de fabricação, de estocagem e de aplicação das tintas (FERNANDES, MARIANO, GNECCO, 2003).

3.4 PROCESSO DE PINTURA AUTOMOTIVA

Como a maioria dos processos de pintura automotiva é por imersão, o fenômeno de molhabilidade dos líquidos é de fundamental importância para o melhor entendimento das interações entre os banhos de pintura e os substratos a serem pintados.

3.4.1 FENÔMENO DE MOLHABILIDADE OU CAPILARIDADE

Um aspecto importante na pintura é o fenômeno da molhabilidade ou capilaridade, que é definido como a tendência de um fluido em espalhar-se ou aderir sobre uma superfície sólida, na presença de um outro fluido imiscível. Sendo assim, a molhabilidade reflete a afinidade relativa entre a superfície e as duas fases fluídas imiscíveis (MILER; NEOGI, 1985).

A molhabilidade pode ser representada pela equação de Young:

$$\gamma_{f_1f_2} \cdot \cos \theta = \gamma_{f_2s} - \gamma_{f_1s} \quad \text{Equação 1}$$

A equação estabelece a definição termodinâmica do ângulo de contato (θ), a partir das tensões interfaciais entre as três fases envolvidas: fase sólida (s), fase fluida 1 (f_1) e fase fluida 2 (f_2).

A equação de Young origina-se da análise mecânica das forças resultantes sobre a linha de contato entre as três fases coexistentes no equilíbrio, derivada com base em princípios termodinâmicos. Porém, sua confirmação prática, é impedida devido à impossibilidade da determinação experimental direta das tensões interfaciais sólida-fluido (GNECCO, 2003).

3.4.2 Ângulo de contato

O ângulo de contato de um líquido com outras fases condensadas é uma das principais características de um sistema imiscível que contém duas ou três fases, com duas delas condensadas e ao menos uma fase líquida (FERNANDES, MARIANO, GNECCO, 2003). Do ponto de vista desta pesquisa é interessante conhecer sobre as influências do ângulo de contato de líquido sobre superfícies sólidas, pois respondem muitas das perguntas a respeito de certas propriedades ou características da superfície sólida.

Ao depositar uma gota de um líquido sobre a superfície de um sólido, ela pode reagir espalhando-se uniformemente sobre toda a superfície sólida, quase como um filme, ou formar uma gota esférica sobre a mesma. Segundo, Fernandes, Mariano, Gnecco (2003), no caso do líquido formar um filme, o ângulo θ será zero e o sólido será completamente molhado pelo líquido, ou seja, a sua superfície terá propriedades hidrofílicas. Quando $0^\circ < \theta < 30^\circ$, o sólido pode ser descrito como parcialmente molhado ou “molhante”, quando $30^\circ \leq \theta \leq 89^\circ$, como “parcialmente molhante” e para $\theta \geq 90^\circ$, “não molhantes”, conforme mostrado na figura 3.3.

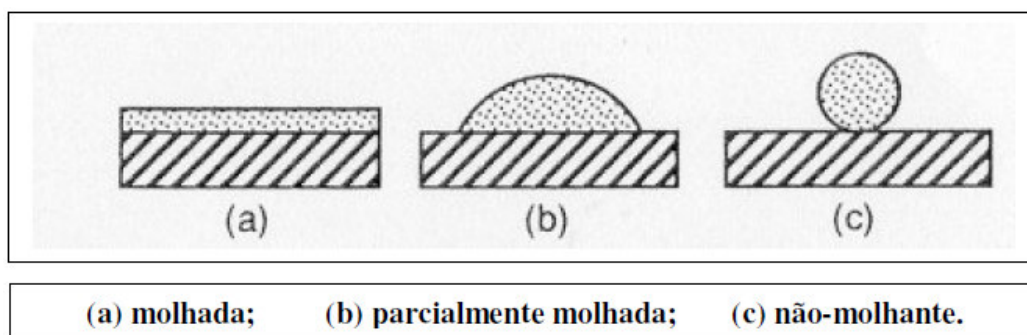


Figura 3.3: Ilustração de alguns tipos de molhabilidade de sólidos por um líquido
Fonte: Fernandes, Mariano, Gnecco, 2003.

Os líquidos tendem a apresentar formas esféricas, pois nesta situação, tem-se uma menor área superficial para um dado volume. Porém, outras forças atuam sobre uma gota tal como por exemplo a gravidade, tendendo a achatar as esferas. Para reduzir a atuação destas forças, é necessário que uma das fases como, por exemplo, a água, esteja dispersa em pequenas quantidades, gotículas, criando assim uma

elevada área superficial por unidade de volume. No caso das superfícies dificilmente molhadas por um líquido (hidrofóbicas), a gotícula assume uma forma quase que totalmente esférica.

Geométricamente, o ângulo de contato pode ser definido como ângulo formado pela intersecção dos dois planos tangentes entre as superfícies do líquido e do sólido e o contorno de contato entre as três fases, conforme figura 3.4

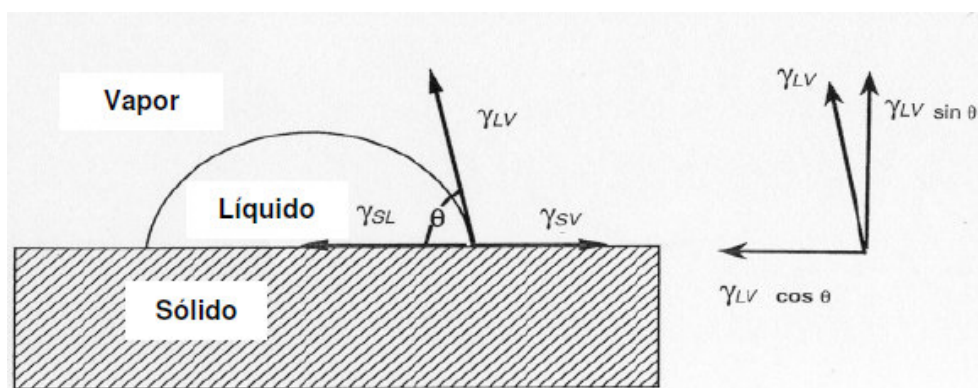


Figura 3.4: Esquema das medidas de ângulo de contato e da tensão superficial
Fonte: Fernandes, Mariano, Gnecco, 2003.

3.4.3 Fatores que interferem na molhabilidade

São cinco os fatores que interferem na molhabilidade de um sólido por um líquido. São eles: rugosidade e heterogeneidade da superfície, reações entre líquido e sólido, atmosfera do ensaio, tempo e temperatura.

3.4.3.1 Rugosidade e heterogeneidade da superfície

Nakae et al. (1998) mostraram, através de modelos matemáticos e de medidas de ângulo de contato, que a molhabilidade é influenciada pela rugosidade da superfície. Ao se fazer um teste de molhamento é possível alcançar superfícies lisas, planas, horizontais, quimicamente homogêneas, inertes e estáveis em altas temperaturas na atmosfera a ser testada. Contudo, em situações fora de laboratório as condições dos

sólidos não são perfeitas, o que pode gerar alterações locais nas energias superficiais, gerando valores de ângulo de contato diferentes numa dada condição de equilíbrio. Essas situações de variação do molhamento levam o nome de histerese do ângulo de contato, que é definida como a diferença entre o maior e o menor valor de θ para uma determinada condição experimental (LONG, et al, 2005; SOBCZAK, SINGH, ASTHANA, 2006; EUSTATHOPOULO, et al, 2005; HENNING, et al, 2004).

A histerese do ângulo de contato é causada principalmente por dois fatores (EUSTATHOPOULO, et al, 2005; SOBCZAK, SINGH, ASTHANA, 2006): heterogeneidade topográfica, por consequência da rugosidade do substrato ou porosidade superficial (Fig.3.5a); heterogeneidade química devido a presença de contaminantes, segregação e inclusões na superfície do sólido (Fig. 3.5b).

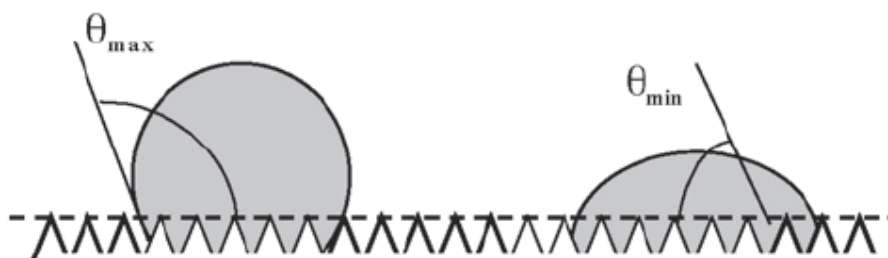


Figura 3.5 (a)

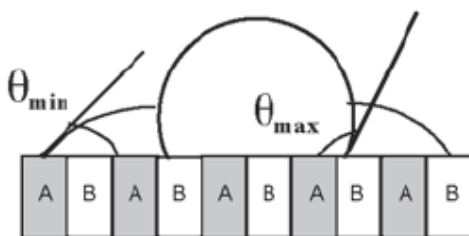


Figura 3.5 (b)

Figura 3.5: Esquema ilustrativo de fatores que provocam a histerese do ângulo de contato ($\Delta\theta = \theta_{\max} - \theta_{\min}$): (a) rugosidade da superfície do substrato e (b) heterogeneidade química da superfície.

Fonte: Fernandes, Mariano, Gnecco, 2003.

Após analisadas a influência da rugosidade e heterogeneidade de superfícies sólidas na molhabilidade, foram lançadas proposições de ajuste da equação de

Young, com um novo fator referente à rugosidade da superfície, considerado na determinação do ângulo de contato (SIDDIQ, et al, 2000; LONG, et al, 2005).

Quando se deseja uma melhor molhabilidade, a maioria dos estudos apresentados é realizada em superfícies polidas, e assim o fator rugosidade passa a ser desconsiderado nos resultados experimentais. A rugosidade da superfície dos substratos sólidos pode ser “polido com pasta de diamante até 1 μm ”, “superfície espelhada” e “acabamento óptico”, os quais levam a diferentes tipos de acabamentos e conseqüentemente a obtenção de diferentes valores de ângulo de contato para um mesmo sistema em estudo.

A porosidade na superfície dos substratos também é um fator que contribui para a histerese do ângulo de contato. Os poros superficiais contribuem para alterar o comportamento de espalhamento do líquido da mesma forma que a rugosidade, provocando alterações locais nas energias superficiais. (SIDDIQ, et al, 2000; LONG, et al, 2005).

3.4.3.2 Reações entre líquido e sólido

Sistemas reativos alteram o resultado da molhabilidade. Segundo GNECCO (2003), alguns efeitos podem ser identificados ao se observar a reação entre os materiais de um sistema analisado. O valor do ângulo de contato pode ser diminuído, devido à dissolução do substrato para dentro da gota, afetando assim o molhamento. A formação de produtos de reação interfaciais, com diferentes propriedades, quando comparadas ao substrato inicial, podem proporcionar um aumento do espalhamento do líquido sobre o sólido.

Conforme mostrado na Fig. 3.6, a medida do ângulo de contato pode ser determinada pelo produto de reação e não pelo substrato sólido em si, em alguns casos o líquido fica em contato direto com esta nova fase formada na interface (LUZ, RIBEIRO, 2006; CHIDAMBARAM, MEIER, EDWARDS, 1996).

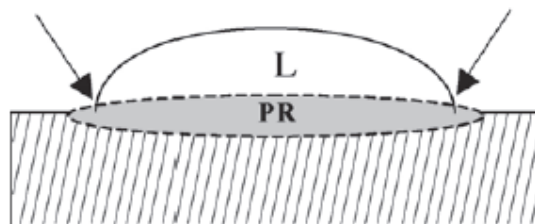


Figura 3.6: Efeito da estrutura e dimensões da região do produto de reação nas medidas do ângulo de contato. L = material líquido, PR = produto de reação.
 Fonte: Fernandes, Mariano, Gnecco, 2003.

O grau final da cinética de molhabilidade e espalhabilidade são controlados pelos novos componentes, os produtos da reação, formados na interface e não mais pelo substrato, com pode-se observar na figura 3.6. O ângulo de contato obtido em sistema reativo é o ângulo do substrato não reativado depois do estágio de transiência, onde é estabelecida a linha tripla (CHIDAMBARAM, MEIER, EDWARDS, 1996).

3.4.3.3 Atmosfera do ensaio

A atmosfera tem influência significativa no comportamento do ângulo de contato, pois os valores das energias interfaciais de molhabilidade (γ_{LV} , γ_{SV} e γ_{SL}) podem ser afetados pelos gases presentes na atmosfera, em especial a pressão parcial de oxigênio (pO_2) (SHEN, et al, 2006; LEE, NAM, HAHN, 1998).

Uma das formas de se verificar o efeito da atmosfera no comportamento de molhabilidade é através da alteração da cor dos materiais, conseqüência das reações de redução que estes podem sofrer. Outra forma é pela observação das diferentes formas da gota depois dos experimentos em diferentes atmosferas (SHEN, et al, 2006).

3.4.3.4 Tempo

O tempo e a temperatura são variáveis que alteram severamente o resultado do comportamento de formação do líquido e do espalhamento do mesmo sobre a superfície do sólido. Em situações de altas temperaturas e tempos prolongados a gota varia no seu formato, o que pode ser ainda mais acentuado quando em superfície solida porosa, ocorrendo infiltração, e/ou também pela evaporação do material, que resulta na obtenção de valores de θ distintos de uma situação em equilíbrio.

Uma análise do comportamento da molhabilidade é feita a partir do acompanhamento de todo o processo, que se inicia com a formação do líquido, com posterior deformação da gota até a etapa em que pode ocorrer a evaporação do líquido, com o passar do tempo. Observando-se a figura 3.7, quando ocorre a evaporação é possível verificar uma constância no diâmetro da gota. Contudo, há uma variação visível de sua altura e do pseudo-ângulo formado (θ_r) (FERNANDES, MARIANO, GNECCO, 2003).

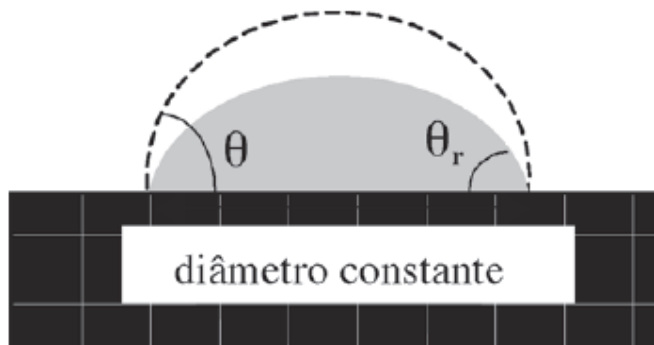


Figura 3.7: Variação do ângulo de contato devido a evaporação do material resultando na diminuição do volume do líquido.

Fonte: Fernandes, Mariano, Gnecco, 2003.

3.4.3.5 Temperatura

É comum encontrar na literatura científica trabalhos que apontam o efeito de temperatura elevadas onde há uma crescente diminuição da viscosidade do líquido formado, o que eleva a velocidade de espalhamento do líquido e conseqüente diminuição do ângulo de contato (CONTRERAS, et al, 2007; AMADEH, LABEL,

2005). Logo, um controle preciso da temperatura é extremamente importante para o controle do processo de molhabilidade (BALESTRA, et al, 2006).

Para os processos de pintura automotiva, que tem a característica de cobertura do substrato sólido (metal) tanto nas partes externas visíveis ao consumidor (portas, paralamas e outros) quanto nas partes internas não visíveis ao consumidor (áreas estruturais, assoalho e outros), a temperatura será uma das variáveis de muita importância, principalmente nos banhos do pré-tratamento que é uma das três fases desse processo, sendo elas: pré-tratamento; pintura eletroforética e pintura de acabamento. As etapas de pré-tratamento e pintura eletroforéticas são as responsáveis pela proteção a corrosão das regiões internas onde são encontradas pequenas distâncias entre chapas.

3.4.4 Pré-tratamento

Um dos fatores de maior importância para o bom desempenho da pintura é o preparo da superfície. Preparar a superfície do aço significa executar operações que permitam obter limpeza e rugosidade controlada. A limpeza elimina os materiais estranhos, como contaminantes, oxidações e tintas mal aderidas, que poderiam prejudicar a aderência da nova tinta. Essa fase, faz parte da preparação da chapa, que pode ser dividida em cinco outras distintas: desengraxamento, decapagem, ativação ou refino, fosfatização e passivação. A figura 3.8 a seguir demonstra essas fases. Essas fases são contínuas e intermediadas por uma fase de lavagem e finalizando por uma fase de secagem (GNECCO; MARIANO; FERNANDES, 2003).

A figura a 3.8 demonstra a seqüência das etapas de pré-tratamento do aço.

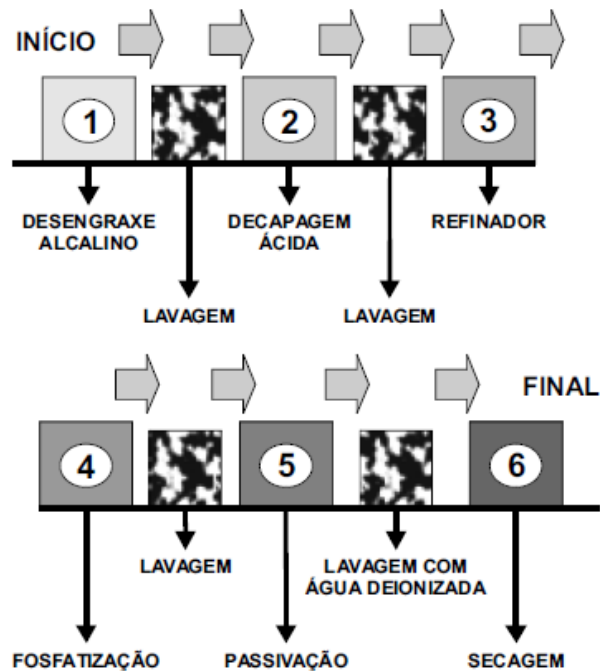


Figura 3.8: Processo de fosfatização: seqüências dos banhos
 Fonte: Gnecco; Mariano; Fernandes, (2003)

3.4.4.1 Desengraxamento

O desengraxamento visa eliminar óleos, gorduras, limalhas, rebarbas de pontos de soldas, pequenos objetos e sujidades em geral existentes na superfície metálica. A remoção é feita por reação de saponificação, ocorrida em solução aquosa alcalina de tensoativos catiônicos e/ou aniônica, a qual é reaproveitada em 95% após processo de reciclagem.

Antes de iniciar o desengraxe é necessário conhecer o tipo de contaminante a ser removido. As graxas podem ser de origem animal, vegetal ou mineral. A maioria das graxas e óleos é insolúvel em água, o que torna difícil a sua remoção por simples lavagem.

3.4.4.2 Decapagem ácida

A decapagem como o próprio nome indica, é operação que tem por finalidade a remoção da “capa” de óxidos, que pode ter sido formada quando a chapa foi laminada a quente ou a oxidação surgida durante o transporte e o armazenamento. Para que a operação seja eficiente, é necessário que o desengraxe tenha sido bem feito, pois gorduras e oleosidades podem dificultar a ação dos decapantes.

Os decapantes geralmente, são ácidos como o clorídrico (também conhecido como muriático) e o sulfúrico, que reagem com os óxidos produzindo sais solúveis, fáceis de serem removidos em meio aquoso, por lavagem. Os ácidos removem inclusive carepas. O ácido fosfórico também pode remover as carepas, porém demandam muito tempo e requerem aquecimento do banho (GNECCO; MARIANO; FERNANDES, 2003).

O ataque ácido, além de remover os óxidos proporciona uma certa rugosidade à superfície. Para ajudar a ação dos ácidos são adicionados aditivos tensoativos aos banhos, que melhoram a penetração do ácido nas peças e facilitam a lavagem ao final do processo. Os desengraxantes alcalinos também são usados, combinando-se a ação de diversos sais alcalinos, como: hidroxidos, carbonatos, silicatos, trifosfatos, boratos, pirofosfatos etc, que são misturados com materiais sintéticos, tensoativos e sabões.

O ácido remove os óxidos mas também pode atacar severamente o metal, por isso é necessário adicionar um inibidor de corrosão ao banho, para que o ácido se restrinja somente à capa de óxidos. Estes inibidores podem ser aminas, aldeídos, proteínas ou mercaptanas.

3.4.4.3 Ativação ou refino de cristais

A ativação ou refino é feita por uma solução coloidal alcalina de fosfato de titânio e tem como função refinar e controlar o crescimento dos cristais, quanto menor for a formação desses cristais, mais compacto será o filme formado. A boa eficiência do

refinador, que é constituído de sais de titânio, depende de uma boa operação prévia de desengraxe e decapagem.

Segundo GNECCO (2003), o banho de refinador é levemente alcalino e por isso também funciona como uma decapagem alcalina. Sendo bem controlado, além de remover os óxidos leves e as oleosidades, condiciona a superfície, promovendo a precipitação dos fosfatos, formando assim pequenos cristais pequenos melhorando a qualidade do processo.

3.4.4.4 Fosfatização

A fosfatização tem como finalidade, depositar sobre as superfícies uma camada de fosfatos metálicos flexíveis e firmemente aderida ao substrato. Desta forma, a superfície é preparada para receber os revestimentos orgânicos que proporcionam melhor aderência e resistência à corrosão, assim como lubrificantes nas operações de deformação a frio ou em partes móveis.

Atualmente são utilizados os seguintes fosfatos conforme tabela 3.4.

Tabela 3.4: Fosfatos utilizados em fosfatização

Tipo de fosfato	Processo	Coloração	Propriedades
Fosfato de ferro	Pulverização	Cinza claro ou Cinza escuro	Melhor aderência
Fosfato de zinco	Imersão ou Pulverização	Azulada	Melhor resistência anticorrosiva
Fosfato de zinco, manganês e níquel	Imersão	Cinza escuro à Marrom escuro	São chamados de fosfatos tricationicos, com excelente resistência anticorrosiva e aderência. São fosfatos de última geração.

Fonte: GNECCO; MARIANO. FERNANDES, 2003, p.74

A camada de fosfato é considerada de boa qualidade, quando é formada por cristais pequenos de maneira que obtenha-se uma distribuição mais uniforme, minimizando os espaços entre eles, para que haja uma maior cobertura do substrato e promova maior resistência à corrosão.

Os processos de fosfatização se classificam quanto a:

Composição do banho:

- fosfatização a quente - acima de 80 °C
- fosfatização tépida - entre 50 e 80 °C
- fosfatização a frio - abaixo de 50 °C

Tempo de permanência no banho:

- fosfatização normal - acima de 30 minutos
- fosfatização acelerada - abaixo de 30 minutos
- fosfatização rápida - abaixo de 5 minutos

Os métodos de aplicação da fosfatização são por imersão e pulverização:

Imersão - São colocadas em tanques quantidades consideráveis de produtos químicos, com controle de tempo, temperatura, concentração e controle de contaminação. As peças ficam imersas pelo tempo pré-definido para o processo, de forma a atender a formação da camada requerida.

Pulverização - As peças atravessam cabines compartimentadas, local que os produtos químicos são pulverizados através de bicos injetores. A linha poder ser contínua, com velocidade controlada através da monovia onde as peças são penduradas. Para peças planas ou partes externas das carrocerias, por causa do impacto do jato sobre as peças, eles podem atuar com mais eficiência do que estáticos dentro de tanques.

3.4.4.5 Passivação

Trata-se de uma etapa posterior à fosfatização que tem por finalidade selar os poros existentes na camada de fosfato, pois a mesma apresenta um certo grau de porosidade, independente do tipo de cristal. Aumenta a resistência contra a corrosão melhorando a aderência da pintura, evitando empolamento e corrosão filiforme.

São utilizados basicamente dois tipos de materiais, os orgânicos, composto ácido a base de resinas orgânicas ou polímero sintético e os inorgânicos, composto ácido a base de cromo ou zircônio.

3.4.4.6 Lavagens

Após cada uma das etapas mencionadas, a exceção após o refino, existem banhos intermediários, feitos com água deionizada, com baixa condutividade necessários para remover resíduos da etapa anteriores. Essas lavagens são após os seguintes banhos:

- Após o desengraxe alcalino - remove o desengraxante residual que por ter caráter alcalino reagiria com o banho seguinte que é ácido, exigindo maior consumo de decapante.
- Após a decapagem ácida - remove os resíduos de sais formados e o excesso de decapante que prejudicariam o refinador. Se os ácidos não forem completamente removidos, os cristais nucleados podem ficar grandes, o que é inconveniente.
- Após a fosfatização - removem os resíduos e os excessos de fosfatos e cromatos que prejudicariam a aderência e o comportamento da pintura.
- Após a passivação - a lavagem deve ser com água deionizada para eliminar completamente os sais solúveis.

3.4.4.7 Secagem

Por fim, é realizada a operação de secagem das peças, que seguem para a pintura, para evitar que resíduos aquosos dos banhos de fosfato contaminem os banhos de pintura. Geralmente as peças passam por fornos ou sopros de ar quente onde as temperaturas atingem entre 100 e 150 °C, e toda a umidade da superfície que poderia formar bolhas e prejudicar a pintura é eliminada.

3.4.5 Pintura Eletroforética

A pintura eletroforética, também conhecida como e-coat ou cataforese é um processo contínuo de eletrodeposição de tintas com formulação que permite sua polarização. Esse processo foi desenvolvido para atender os requisitos anti-corrosivos, exigidos tanto pela indústria automobilística, como de auto peças e de eletrodomésticos. A pintura eletroforética mantém o mesmo princípio de imersão simples e pode ou não ser seguida de coberturas subseqüentes.

Existem dois tipos de eletrodeposição: anódico e catódico. Em qualquer um desses processos a peça a ser pintada é ligada a um pólo, estabelecendo-se assim, uma diferença de potencial entre a peça e a tinta onde ela está mergulhada, de modo que os compostos orgânicos (resinas e pigmentos) presentes na formulação sejam atraídos para a peça (RANJBAR; MORADIAN, 2005).

A eletrodeposição anódica, representada pela figura 3.9, é um processo que deposita cargas negativas no substrato ou superfície que está carregada positivamente. A eletrodeposição catódica figura 3.10, é um processo que deposita partículas de tinta carregadas positivamente em um substrato carregado negativamente (aterrado).

Eletroforese anódica ou anaforética

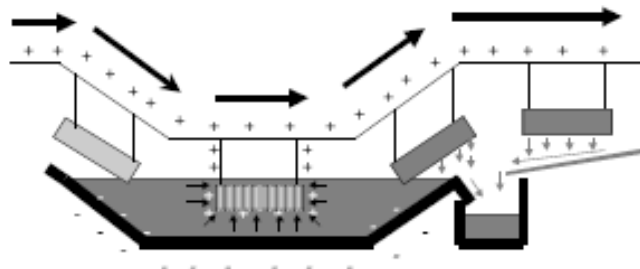


Figura 3.9: Sistema de pintura por eletroforese anódica (Anaforese)

Fonte: Apresentação Henkel (2010)

Neste processo, a tinta e o tanque tem cargas elétricas negativas e as peças a serem pintadas são ligadas a uma monovia ou gancheira com cargas elétricas positivas. A tinta é então atraída pelo campo elétrico para as peças onde a tinta é depositada.

Eletroforese catódica ou cataforética

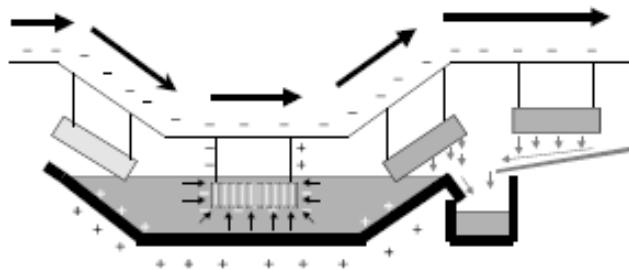


Figura 3.10: Sistema de pintura por eletroforese catódica (Cataforese)

Fonte: Apresentação Henkel (2010)

Neste processo, a tinta e o tanque tem cargas elétricas positivas, ao contrário da anaforese e as peças a serem pintadas são negativas.

A tinta é aplicada sobre a peça com base na absorção das cargas positivas neutralizadas pelas cargas negativas da peça. O pH do banho é geralmente ácido (6,0 a 6,4), de tal forma, que as resinas e pigmentos possam ser capazes de adquirir

carga positiva e desta forma se deslocarem para o pólo negativo, formando uma película aderente e isolante. A quantidade de tinta depositada dependerá da tensão aplicada (280 a 350 volts), quanto à condutividade do banho varia entre 0,95 e 1,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ numa temperatura de 25 a 30° C.

Inicialmente as partículas de tinta, resinas e pigmentos migram para os lugares de maior intensidade do campo elétrico, neles se depositando. As regiões onde a camada de tinta já foi depositada não conduzem mais eletricidade, ficando eletricamente isoladas, forçando a tinta migrar para outros pontos, cobrindo toda a superfície do substrato. A camada assim formada é uniforme em toda a superfície, salientando-se a melhor cobertura de cantos, pontas e arestas, o que não pode ser conseguindo por nenhum outro processo de pintura (RANJBAR; MORADIAN, 2005).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse trabalho foram elaborados corpos de prova (CP) que simulassem as estruturas internas dos automóveis, como os conjuntos formados pela união de duas ou mais peças (por exemplo reforços, colunas internas e externas do habitáculo), proporcionando pequenas distâncias entre elas, as quais foram denominadas "GAP". A distância entre as peças, fazem parte do projeto para permita-se as variações dimensionais de processo (estampagem das peças, fabricação da carroceria do veículo e outros), além de possibilitar a penetração dos líquidos de limpeza e de proteção anti-corrosiva, no processo de pintura. O valor de 0,75 mm foi considerado como "pequena distância", baseado no fato da mesma dificultar o acesso dos banhos pintura. Os CPs foram construídos com duas chapas planas e a distância entre elas foi variada com incrementos de 0,75 mm, por meio de acréscimo de chapas com esse mesmo valor de espessura, denominadas espaçadores (ES).

O experimento constitui-se em passar os CPs pelo processo completo de pintura de peças, constituído por: Pré-tratamento até a fosfatização, que denominamos de *experimento parcial* e pintura eletroforética até as estufas de secagem, que foi denominada *experimento total*, por ter passado integralmente pelo processo.

Após a finalização do processo de pré-tratamento, metade dos CPs de cada lote de experimento, foram retirados para serem avaliados visualmente com relação à formação ou não, da camada de fosfato. A outra metade, permaneceu nas instalações até completar a etapa de pintura por eletrodeposição catódica, para depois ser realizada avaliação visual final, onde foi analisado o aspecto do filme de pintura e também foi mensurada a espessura de cama de tinta, por meio de medidor de espessura ultrasônico portátil.

4.1 Materiais Utilizados

Para a construção dos CPs, o material utilizado foi chapa de aço de carbono ABNT 1008, que são atualmente utilizadas na fabricação de automóveis com espessura de

0,75 mm. Foram utilizadas chapas com e sem recobrimento de zinco (galvanizadas). A chapa com recobrimento foi a 50G/50G, a mais usualmente utilizado pelo mercado automobilístico, com espessura da camada de zinco de 50 g/m² em ambos os lados, baseada na especificação da NBR 7008.

4.2 Corpos de Prova

4.2.1 Elaboração dos corpos de prova

O corpo de prova (CP), como mostrado nas figuras 4.1 e 4.2, consiste de duas chapas de dimensões 300 x 100 x 0,75 mm, denominadas Alma (AL), como descrito no item 4.1. No conjunto também contém outras chapas denominadas espaçadores (ES), com dimensões de 300 x 50 x 0,75 mm, que foram utilizadas para definir os espaçamentos (Gaps) entre as AL. Os ES foram fixadas pelas extremidades laterais das AL, com clips metálicos e/ ou parafusos e porcas, de aço carbono com revestimento de Zinco, não sendo os fixadores nem seus materiais, relevante para o resultado do experimento.



Figura 4.1: CP vista superior do CP com AL galvanizadas passadas pelo processo de pré-tratamento.



Figura 4.2: CP vista de topo do CP com AL galvanizadas passadas pelo processo de pré-tratamento.

O espaçamento entre as AL foi alterado com o incremento gradativo de ES em ambos os lados do CP formando novos conjuntos para serem testados a cada dupla de ES inseridos, como mostrado nas figuras 4.3 e 4.4.



Figura 4.3: Vista de topo do CP com 01 (um) espaçador (ES)

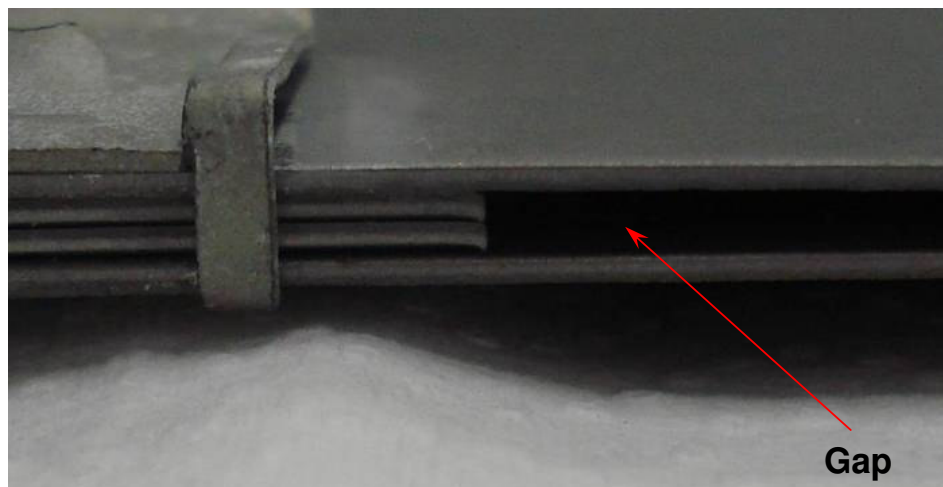


Figura 4.4: Vista de topo do CP com 02 (dois) espaçadores (ES)

4.2.2 Quantidade de corpos de prova

Para definir a quantidade de CPs a serem utilizados, foi desenvolvido o planejamento do experimento mostrado na Tabela 4.1. Com esta tabela identificou-se a quantidade de elementos necessários para a realização de todas as variações possíveis de espaçamento (GAP). A tabela 4.2 resume as quantidades de corpos de prova utilizados. Baseado na tabela 4.2, foi contruído um total de 60 CPs, divididos em dois tipos, 30 CPs com recobrimento de Zinco e 30 CPs sem recobrimento de Zinco para os experimentos, de forma que seja possível avaliar a influência do recobrimento no processo de pintura. Para reduzir o impacto das variabilidades do processo, foram realizadas 03 repetições de cada combinação. Foi necessário também, analisar os fenômenos que ocorrem nas 02 etapas do processo de pintura, pre-tratamento e e-coat, que foram designados como experimento parcial e total respectivamente. Fato relevante é que as amostras foram retiradas da mesma bobina a fim de eliminar uma variável, que seria a diferença de lote de produção, evitando a possibilidade de ter composições químicas diferentes e portanto comportamento químicos diferentes entre os CPs nos experimentos, juntos aos banhos de pré-tratamento, devido aos fenomenos de molhabilidade e capilaridade discutido no ítem 3.4.1.

Devido à ter-se 4,5 mm de distância entre chapas, como valor aceito para obtenção de boa aplicação de banhos de pintura, optou-se em variar os espaçamentos de 1 à 5 ES ou seja de 0,75 à 3,75 mm, pois são valores abaixo de 4,5 mm. Conforme mostrado na tabela 4.1, além do espaçamento, havia também a variação de acabamento superficial, onde as chapas galvanizadas foram identificadas pela letra (Z) e as não galvanizadas foram identificadas por (N).

Tabela 4.1: Experimentos realizados

Experimentos realizados				
Tipo	Designação do CP	Quantidade de almas (AL)	Quantidade de espaçadores (ES)	GAP (mm)
Não Galvanizada (N)	N1	2	1	0,75
	N2		2	1,50
	N3		3	2,25
	N4		4	3,00
	N5		5	3,75
Galvanizada (Z)	Z1	2	1	0,75
	Z2		2	1,50
	Z3		3	2,25
	Z4		4	3,00
	Z5		5	3,75

Tabela 4.2: Quantidade total de experimentos

Total de Corpos de Prova (CP)	
Quantidade de CPs	10
Quantidade de repetições	3
Tipos de Processos: Pré-Tratamento & Ecoat	2
Total de Experimentos	60

4.3 Elaboração de ensaios

Os ensaios foram realizados em um provedor de pintura industrial, que é classificado como fornecedor Q1 pela Ford Motor Company, com bom sistema de qualidade e controle de processo, demonstrado pelos indicadores de qualidade apresentados no momento do experimento. Esta empresa é frequentemente auditada por órgãos externos à mesma. Esse processo é utilizado para pintura de peças a serem montadas em carros, na linha de montagem final (fábrica de automóveis), como também para pintura de peças para o mercado de reposição (Loja das concessionárias dos fabricantes de veículos). Pelas afirmações anteriores, verifica-se que o processo empregado pelo provedor é representativo do processo de pintura de automóveis e pode ser utilizado para a parte experimental desse trabalho.

4.3.1 Descrição dos ensaios

Os ensaios realizados foram divididos em dois tipos:

- a) Tipo "A" experimento parcial os quais foram processados somente pela etapa do pré-tratamento. A figura 4.5 mostra os CPs posicionados para o ensaio.
- b) Tipo "B" experimento total, onde os CPs foram processados por todas as etapas finalizando o processo de pintura. A figura 4.6 mostra este conjunto de CPs.

O experimento parcial consiste em interromper o processo logo após a etapa de enxague da fosfatização, parando a linha de produção e retirando os CPs previamente definidos, da gondola de processo, levando-os ao laboratório de controle de processos do provedor e executando as análises visuais do aspecto da camada de fosfato depositada nas ALs dos CPs.



Figura 4.5: CPs tipo A antes de iniciar o experimento fixados na gondula de processo por molas e gancheiras

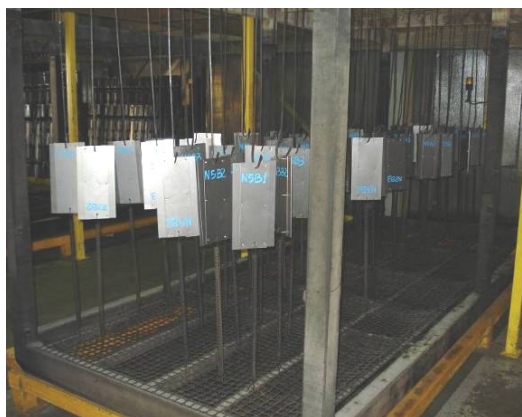


Figura 4.6: CPs tipo B antes de iniciar o experimento fixados na gondula de processo por molas e gancheiras.

No experimento total os CPs seguiram até o fim do processo, onde após a secagem nas estufas, foram analisados o aspecto visual do filme de tinta formado, comparando o perfil e homogeneidade de cobertura entre os vários espaçamentos (Gaps) e também realizada medição da camada da tinta e-coat depositada, utilizando o medidor de camada ultrasônico, do provedor, devidamente aferido e rastreado pelo sistema de qualidade do mesmo.

4.3.2 Processo de fabricação

O processo utilizado foi de pintura de peças, do tipo estágios estacionários, iniciando com pré-tratamento a base de desengraxantes alcalinos, a fosfatização tricatiônica (fosfato composto de cristais de Zinco, Níquel e Manganês) até o enxague com água DI. O próximo estágio foi o de pintura eletroforética com tinta a base de epóxi na cor preta, finalizando-se ao passar pelas estufas de secagem.

O processo utilizado na planta de pintura é o do tipo “stop and go”, onde as peças a serem processadas ficaram fixadas nos dispositivos de processo (gondulas ou cestos) através de gancheiras e molas metálicas mostradas na figura 4.7, de forma que as peças não tiveram contato entre elas, mas tinham área de contato suficiente nas fixações, que possibilitaram a condução de energia necessária para realização da pintura por eletrodeposição catódica (e-coat).

Gancheiras e molas de fixação, responsáveis pelo contato elétrico na peça.



Figura 4.7: CPs fixados na gondula de processo por molas e gancheiras

Devido ao fato desse processo ser seguído por estágios, pode-se dividir o processo em etapa de pré-tratamento e etapa de pintura.

A etapa de pré-tratamento, ilustrada na figura 4.8, é composta por um estágio inicial de desengraxante por spray e por mais 05 (cinco) tanques de imersão, sendo 01 de desengraxante, 01 de lavagem, 01 de fosfatização, 01 de lavagem por água industrial de circuito fechado (recirculada) e finalmente 01 de lavagem com água dismineralizada (DI).



Figura 4.8: Foto ilustrativa de uma instalação de processo de pintura "Stop and Go" – Etapa de Pré Tratamento

A etapa de pintura, ilustrada na figura 4.9, é realizada totalmente por imersão e é composta de 03 (três) tanques sendo 01 de aplicação de tinta, onde ocorre a eletrodeposição catódica, 01 de lavagem por ultrafiltrado e 01 de lavagem por água dismineralizada (DI).



Figura 4.9: Foto ilustrativa da instalação do processo de pintura "Stop and Go" – Pintura e-coat

Após esses processos as peças passam por estufa onde ocorre o aquecimento gradativo com rampas e patamares de temperatura de aquecimento na ordem de 190 °C. A velocidade da linha de arraste das peças é controlada para que esse processo ocorra no tempo esperado, pois como a temperatura é o catalizador do processo, tem que ser assegurada a cura do filme da tinta para que se obtenha um bom desempenho de aderência e proteção anticorrosiva das peças em campo.

4.3.3 Controle de processo

A empresa, através do seu sistema de qualidade, faz um controle periódico das principais variáveis de processo como, por exemplo: acidez livre, condutividade e pH sendo esses dados devidamente registrados em livros de controle de processo e os registros são armazenados pelo tempo de retenção requerido pelo sistema de qualidade, garantindo assim a rastreabilidade, caso ocorra problemas em campo. Esses controles de processo bem como as medições das temperaturas da estufa, levantados durante o período dos experimentos foram catalogados.

4.3.4 Avaliação dos ensaios

Depois de realizados os experimentos, foram feitas as análises verificando as áreas onde ocorreram recobrimento pelos respectivos processos.

Essas avaliações foram realizadas de forma visual nas áreas recobertas, e foram observados o perfil, extensão, existência de camada de cobertura de fosfato ou e-coat, coloração, homogeneidade e outros aspectos passíveis de comparação.

Para o caso do experimento total, adicionalmente às análises visuais, foi possível medir a espessura da camada de tinta fornecida pelo processo de e-coat, possibilitando inclusive realizar comparação entre CPs das repetições e também com os outros CPs com incremento do espaçamento entre as almas. Esses dados foram tratados estatisticamente pelo software Minitab, onde se pode analisar tendências, interações entre os fatores e avaliações amostrais. Após essas análises foi levantada equação matemática do comportamento da distribuição da espessura,

relacionando espaçamento entre as AL, posição de medição ao longo do CP e tipo de revestimento, além de algumas interações entre esses fatores.

Para minimizar o erro experimental, foi criado um padrão de posicionamento, a "Máscara" dos pontos de medição conforme figura 4.10, onde garante que sejam realizadas medições no centro do CP e em cinco pontos equidistantes para ambos os lados em relação ao centro.

Esses dados foram registrados em planilhas manuais, (figura 4.11) e depois passadas para arquivos excel, onde foi possível levantar os gráficos para cada tipo de CP, como também as curvas de tendências dos mesmos. Esses arquivos serviram de base para serem utilizados no Minitab. O equipamento para realização das medições foi um medidor de espessura de camada por ultrasom, que estava devidamente calibrado e rastreado como mostra a figura 4.12

Foi realizado ensaio do teste de aderência para que fosse possível a complementação das análises dos experimentos, baseado nas normas ASTM 3002 e ABNT 3359, que será descrito no capítulo 5.

Todas as etapas do experimento foram registradas por arquivos fotográficos e digitalizações, que serviram de banco de dados para discussão dos resultados.

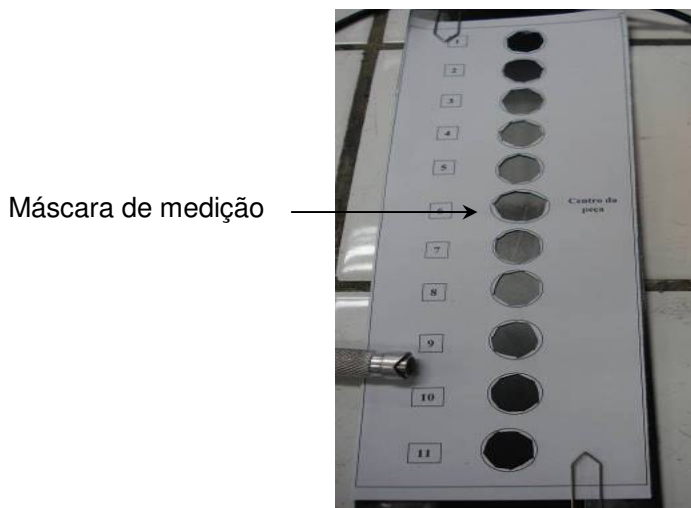
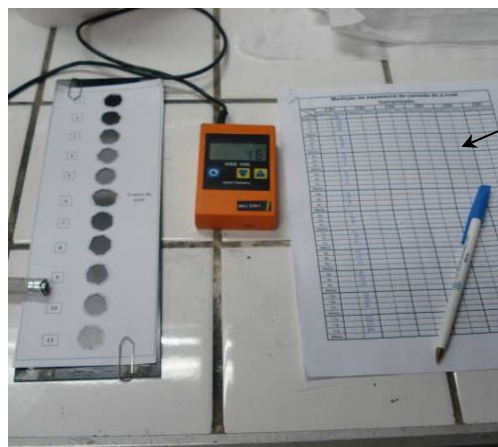


Figura 4.10: Máscara de medição



Planilha de
coleta de dados
de calibração

Figura 4.11: Planilha de coleta de dados



Etiqueta de
controle de
calibração

Fig 4.12: Medidor de espessura

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Testes iniciais

Foi realizado um teste inicial com CPs (Corpo de Prova) que continham 1 e 2 Espaçadores (ES), como amostras do experimento, sendo dois para cada tipo de acabamento superficial. Com o objetivo de avaliar a efetividade dos experimentos com relação à molhabilidade, tanto do pré-tratamento quanto no processo de pintura e-coat, como também as possíveis interferências do processo nos CP, como por exemplo, falhas na construção do CP que inviabilizassem as análises e além disso, verificar com esses resultados, as contribuições para uma melhor definição do método de execução dos experimentos.

Essa análise foi importante para observar quais seriam os impactos negativos do método escolhido, tanto em relação aos CPs e quanto ao processo produtivo da empresa, visto que a remoção dos CPs na metade do processo produtivo, ou seja após o processo de pré-tratamento, estava fora dos procedimentos normais da mesma.

A necessidade da interrupção após esta etapa, foi para a verificação de como estaria o aspecto visual da camada de fosfato, após o processo de pré-tratamento, que seria um dos resultados esperados do experimento. Após a análise preliminar desses CPs, não foi constatado problemas operacionais que impedissem a realização dos experimentos na linha de produção, porém, observou-se que houve um comportamento diferenciado quanto ao aspecto e área fosfatizada nas chapas galvanizadas em relação às chapas sem recobrimento.

Com relação aos CPs pintados, houve cobertura parcial nos dois CPs, porém com maior abrangência de cobertura de área pintada no CP com 2 ES do que nos CPs com 1 ES. Além dessas verificações, pode-se observar o gradiente de tonalidade na cobertura do filme de e-coat ao longo da região longitudinal do CP, o que foi constatado com posterior medição da espessura da camada, que apresentou redução significativa da mesma quando deslocado das bordas longitudinais para o centro do CP.

5.2 Experimento definitivos

Depois da análise dos teste iniciais, foram implementadas melhorias na fixação entre AL e ES, colocando-se parafusos e porcas para evitar fluxo lateral de tinta e também devido a limitação física dos clips (abertura), de não suportar toda necessidade de incremento da quantidade de espaçadores.

Após a finalização dos experimentos, as análises foram divididas em três etapas para melhor verificação dos resultados, Análise Visual, Teste de aderência e Análise da espessura da camada de e-coat com tratamento estatístico da medição.

5.2.1 Análise Visual

Abaixo estão apresentadas uma amostra digitalizada, dos corpos de prova, que são resultados dos experimentos realizados, pelo processamento no sistema de pintura de peças supra citado. As figuras 5.1 (a) à figura 5.1 (j) mostram a comparação dos CPs não galvanizados (N) e as figuras 5.2 (a) à figura 5.2 (j) a comparação dos CPs galvanizados (Z), iniciando-se pelos de menor espaçamento 1 até os de maior espaçamento 5. A partir dessas figuras serão realizadas análises associadas.

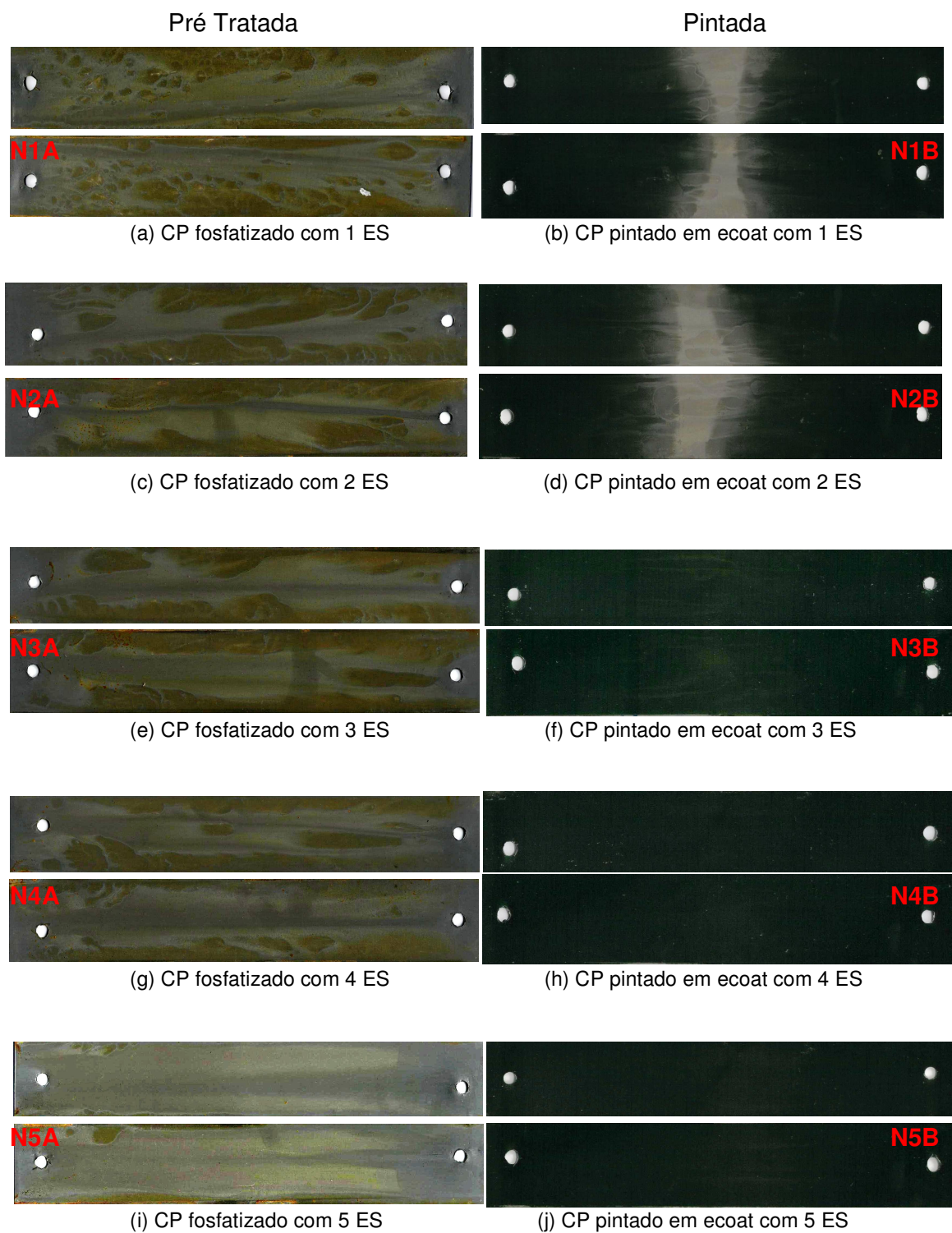


Figura 5.1: Comparação entre CPs de chapas fosfatizadas e pintadas em e-coat para aço não galvanizado

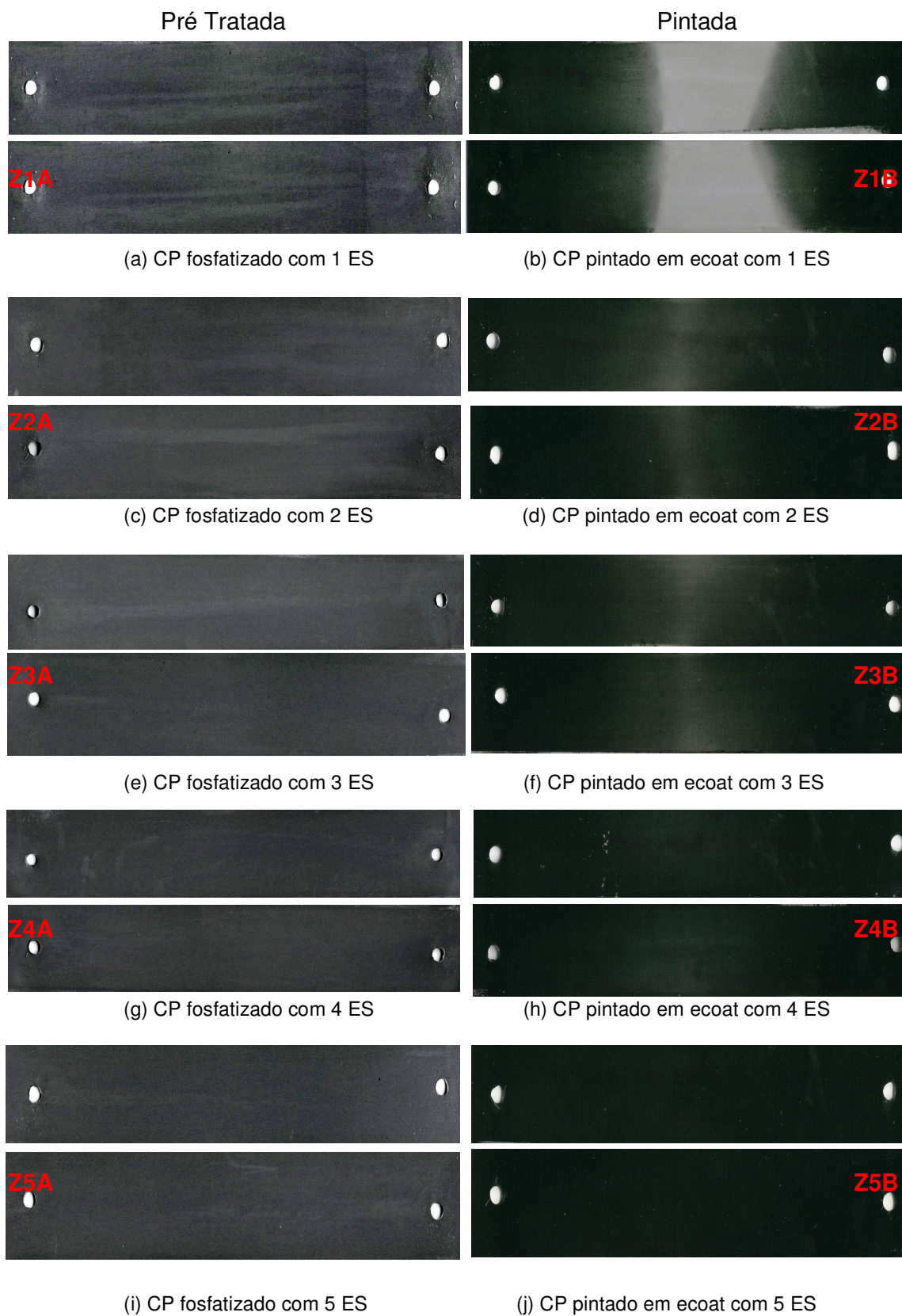


Figura 5.2: Comparação entre CPs de chapas fosfatizadas e pintadas em e-coat para aço galvanizado

5.2.1.1 Análise do resultado do processo de fosfatização.

A figura 5.3 compara o desempenho do processo de fosfatização para as chapas galvanizadas e não galvanizadas. Observa-se que há uma diferença no comportamento de formação da camada de fosfato entre as chapas galvanizadas e as não galvanizadas.

Analisando-se a figura 5.3 é possível verificar que a área onde ocorreu a fosfatização tem cor de aspecto acinzentado. A área não fosfatizada, apresenta coloração avermelhada, devido a oxidação do aço carbono. Nos corpos de prova que apresentavam os espaçamentos iniciais de 0,75 mm e de 1,50 mm (N1 e N2 respectivamente) a área fosfatizada é menor que a área não fosfatizada. Observa-se também que a área fosfatizada concentra-se longitudinalmente, numa pequena faixa no centro do CP, onde provavelmente ocorre o maior arraste de banho de fosfato. Por outro lado, nas regiões adjacentes a essa e nas bordas no sentido transversal, onde a percolação do banho é mais difícil, verificam-se sítios de áreas não fosfatizadas. O fato da maior porção da área do CP, não estar fosfatizada, pode ser explicado pela dificuldade de escoamento dos banhos de pré-tratamento, pelo reduzido espaço entre as AL, o que gera falta de contato do substrato com os banhos, não permitindo a formação da camada de fosfato.

Ainda com referência às chapas não galvanizadas, para o CP N3, figura 5.3 (e) , com espaçamento de 2,25 mm começa a aumentar as áreas fostatizadas, podendo-se verificar uma faixa continuamente fosfatizada no centro do CP, porém ainda apresentando o domínio de áreas avermelhadas, não fosfatizadas. Para o CP N4, figura 5.3 (g), com espaçamento de 3,00 mm observa-se uma inversão na distribuição entre as áreas acinzentadas e avermelhadas, provavelmente resultado de uma melhor condição para o fluxo do banho de fosfato. Para o CP N5, figura 5.3 (i), de 3,75 mm de espaçamento, a área acinzentada é dominante, porém observando-se que ainda há diferença de aspecto entre o centro e as bordas, no sentido transversal, o que sugere uma camada de fosfato mais bem formada ao centro do CP e uma camada incipiente nas adjacências transversais, demosntrada pelo leve tom avermelhado observado nessas superfícies.

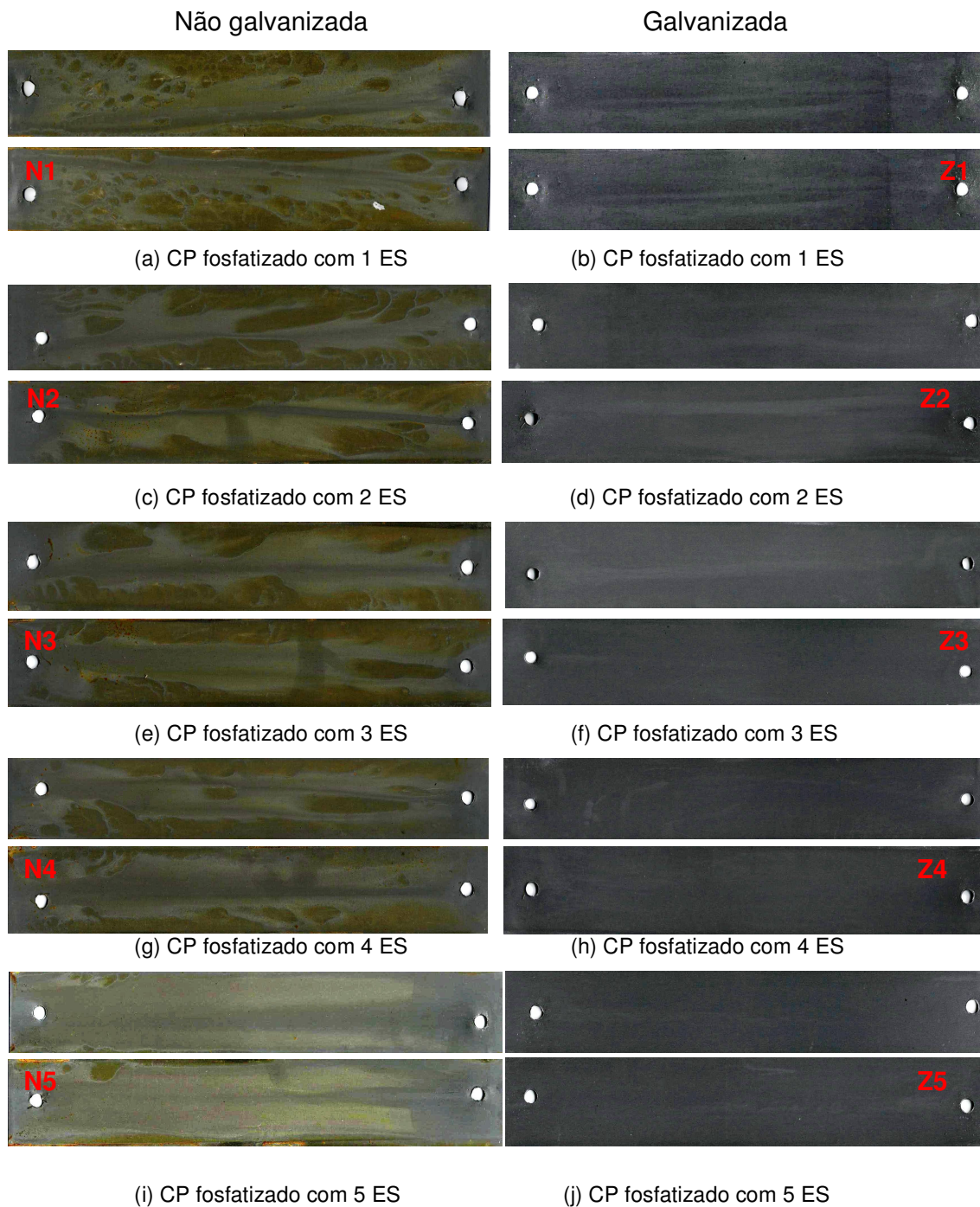


Figura 5.3 Comparação do resultado do processo de fosfatização entre CPs de chapas não galvanizada e galvanizada.

Pôde-se confirmar o que foi observado nos experimentos iniciais, que as chapas galvanizadas, apresentam um comportamento diferenciado em relação às chapas não galvanizadas, pois os CPs "Z" apresentaram aspecto visual de melhor formação

da camada de fosfato que os CPs "N". Esse fato foi identificado desde o primeiro CP o Z1 figura 5.3 (b), de espaçamento 0,75 mm, onde houve fosfatização quase totalmente uniforme, verificada pela predominância da região acinzentada escura, apresentando apenas alguns veios de cor acinzentada clara, distribuídos de forma longitudinal. Nos CPs Z2 e Z3, figuras 5.3 (d) e 5.3 (f), com 1,50 e 2,25 mm de espaçamento respectivamente, esse aspecto acinzentado escuro da camada de fosfato, fica mais uniforme com veios longitudinais claros muito discretos, que para serem notados necessita de maior experiência e acuidade visual do avaliador. Para os CPs Z4 e Z5 com espaçamento de 3,00 e 3,75 mm respectivamente, figuras 5.3 (h) e 5.3 (j), o aspecto da camada de fosfato é totalmente acinzentado escuro, com distribuição do fosfato homogênea e uniforme por todo o CP.

Essa tendência à melhor formação da camada de fosfato nas chapas galvanizadas, provavelmente esteja ligada a reatividade da reação do Zinco do substrato com o banho de fosfato (líquido). Como citado no capítulo 3, esse fato resulta na formação de subprodutos na interface do líquido com o substrato sólido com diferentes propriedades em relação ao conjunto inicial. Nesse caso, a reatividade (e cinética) da reação é comandada pelo novo produto formado na interface e não, pelo substrato sólido, pois o líquido fica em contato direto com o produto da reação. Essa mudança ocorre na linha tripla do ângulo de contato, onde coexistem as três fases com suas respectivas tensões superficiais, Sólido/Líquido (γ_{SL}), Líquido/Vapor (γ_{LV}) e Sólido/Vapor (γ_{SV}). Devido à essa realidade, altera-se a cinética de molhabilidade e espalhamento do processo, acelerando assim a formação da camada de fosfato, em relação a do aço não galvanizado.

Essa hipótese é confirmada quando se observa a formação da camada de fosfato de chapas de aço laminado a frio e chapas zincadas. As figuras 5.4 e 5.5 mostram os produtos dessas reações são a Fosfofilita para o aço laminado a frio e Fosfofilita Modificada para o aço galvanizado (Apresentação Henkel, 2010).

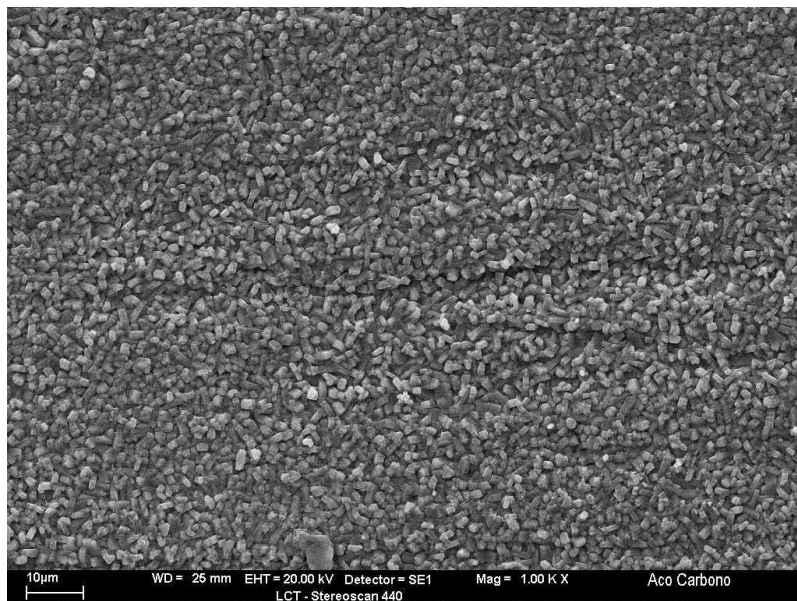


Figura 5.4 Microscopia de varredura da camada de fosfato para aço não galvanizado (Fosfofilita). (Apresentação Henkel, 2010)

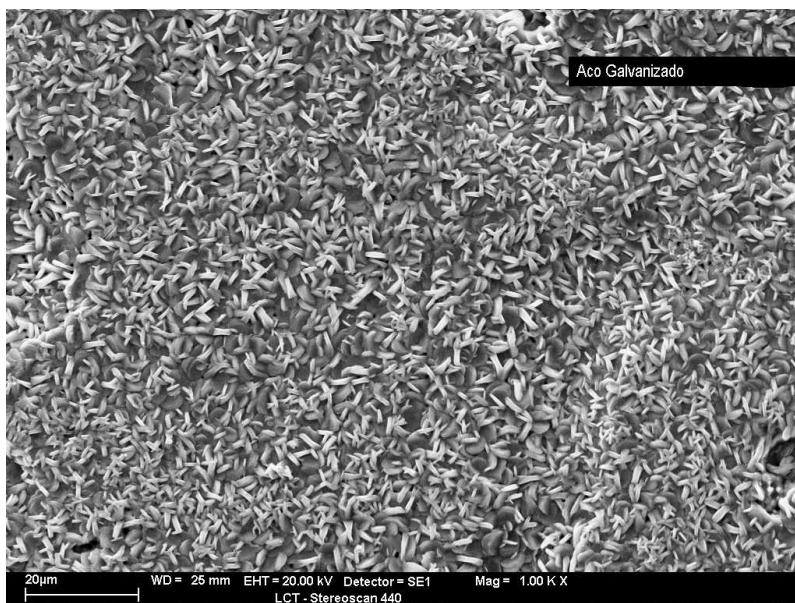


Figura 5.5 Microscopia de varredura da camada de fosfato para aço galvanizado (Fosfofilita Modificada). (Apresentação Henkel, 2010)

5.2.1.2 Análise do resultado do processo pintura.

Após o processo de pintura, espera-se que toda a extensão da peça esteja coberta por uma película de tinta, para que a mesma proteja a peça contra os ataques do meio em que está inserida.

A figura 5.6 compara o resultado do processo de pintura para as chapas não galvanizadas e galvanizadas. A análise dos CPs com N1 figura 5.6 (a) e Z1 figura 5.6 (b), pôde-se verificar que em ambos, a cobertura de e-coat foi parcial, com o aspecto de boa cobertura nas extremidades do CP (bordas longitudinais) e com aspecto de redução de camada de aplicação ao se deslocar em sentido ao centro da peça. Esse fato pode ser notada pela gradual variação de tonalidade do filme de e-coat e até atingir a área sem cobertura, percebida pela inexistência do filme de tinta na região próxima aos pontos centrais da peça, pontos 5, 6 & 7 do padrão de medição como mostrado na figura 5.7. Esse fato pode ser explicado, possivelmente, pela dificuldade que a tinta teve para se deslocar para o interior da peça, devido ao pequeno espaço existente entre as almas (AL), que foi de 0,75 mm, mesmo o processo sendo por eletrodeposição que faz com que tenha uma deposição por atração elétrica.

Com relação aos CPs N2 figura 5.6 (c) e Z2 figura 5.6 (d), o comportamento da distribuição com redução gradativa da tonalidade, continua sendo visualmente notada, porém o CP Z2, com chapa galvanizada, apresenta um comportamento de maior homogeneidade com relação a distribuição e com tonalidade levemente mais clara na região central, enquanto o CP N2, com chapa não galvanizada, continua sem pintar a mesma região.

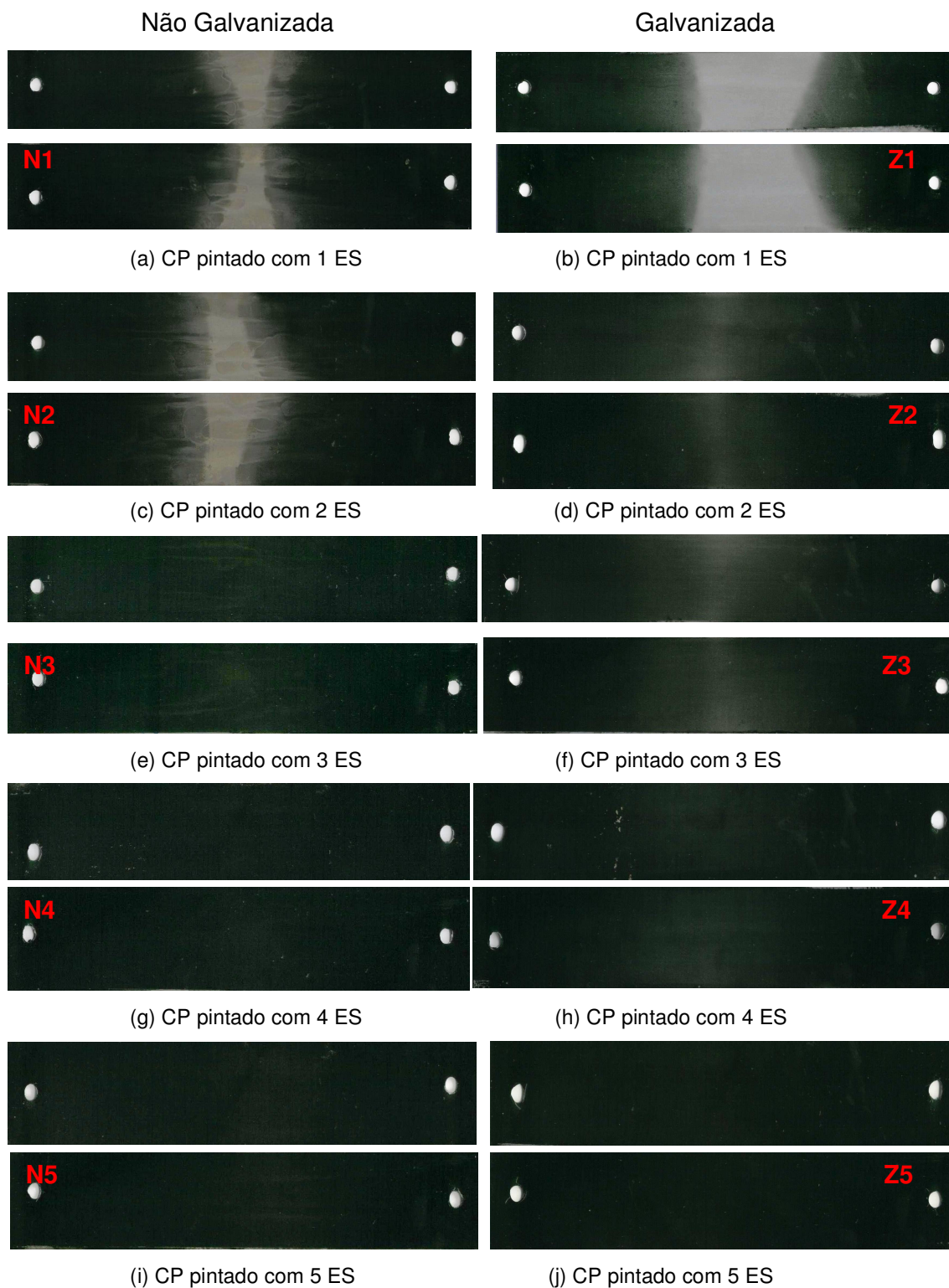


Figura 5.6: Comparação entre CPs do resultado do processo de pintura para chapas não galvanizada e galvanizada.

Nos CPs N3 figura 5.6 (e) e Z3 figura 5.6 (f), observam-se uma homogeneidade na distribuição do filme de tinta em ambos, porém para o N3 a tonalidade mais clara é predominante em quase toda a extensão do CP, ficando mais evidente na região central, as marcas da camada de fosfato. No CP Z3, a tonalidade é homogênea em quase toda extensão do mesmo, ficando numa tonalidade mais clara somente na região central no sentido longitudinal. Esse fato mostra que possivelmente a camada de e-coat do CP Z3 seja maior que a do N3.

Para os CPs N4 & N5 e Z4 & Z5 figura 5.6 (g) & 5.6 (i) e figura 5.6(h) & 5.6 (j), não se pôde tecer comentários comparativos um vez que, visualmente, não é possível observar diferenças visuais na distribuição da camada de e-coat das mesmas.

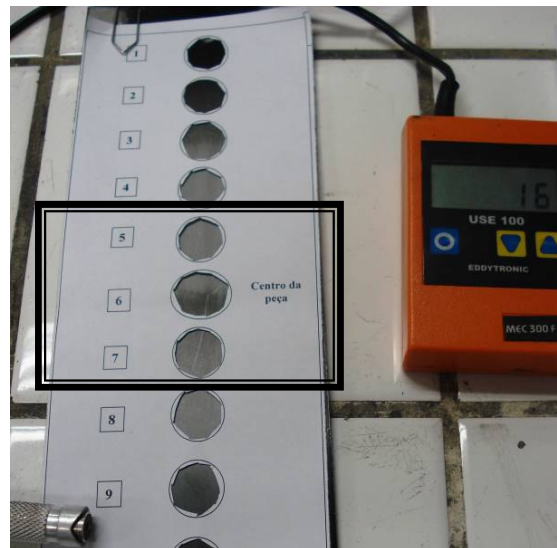


Figura 5.7: Padrão utilizado para medição de espessura da camada de e-coat nas chapas pintadas.

5.2.2 Análise da aderência da película de tinta

O processo de pintura é finalizado nas estufas, que é a etapa responsável pela cura das camadas (fosfato e tinta). Essas camadas após a cura serão barreiras mecânicas que irão proteger as chapas contra a agressividade do meio ambiente. A eficiência dessa proteção está atrelada a um bom processo de cura do material e conseqüente aderência do filme de tinta ao fosfato que deverá, da mesma forma, apresentar uma aderência ao metal, de forma adequada à solicitação de serviço da peça. Para que seja efetiva essa característica, o filme necessita ser testado por uma metodologia normalizada e apresentar resultados satisfatórios a luz da norma requerida.

Foram realizados o ensaio do teste de aderência da película de tinta, pelo método de corte em grade, baseado nas normas ASTM 3002 e 3359 Cross Cut Test, utilizando o kit para teste de aderência mostrado na figura 5.8, com o aparelho riscador cuja a distância entre as lâminas era de 3 mm e fita adesiva com 25 mm de largura.



Figura 5.8: Kit para teste de aderência mostrando lâmina riscadora, fita adesiva específica e lupa.

Esses ensaios foram realizados em uma chapa para cada espaçamento e para cada acabamento superficial, equivalendo a uma amostra de 16,7% da população de chapas testada. Todas as amostras ensaiadas apresentaram como resultado a classificação Gr 0, nenhuma área da película destacada.

Pode-se visualizar melhor essa classificação pelos resultados dos ensaios dos CP N1 e Z1, considerados mais críticos devido à dificuldade do acesso, por serem o menor Gap 0,75 mm como pode ser visto nas figuras 5.9 e 5.10,.

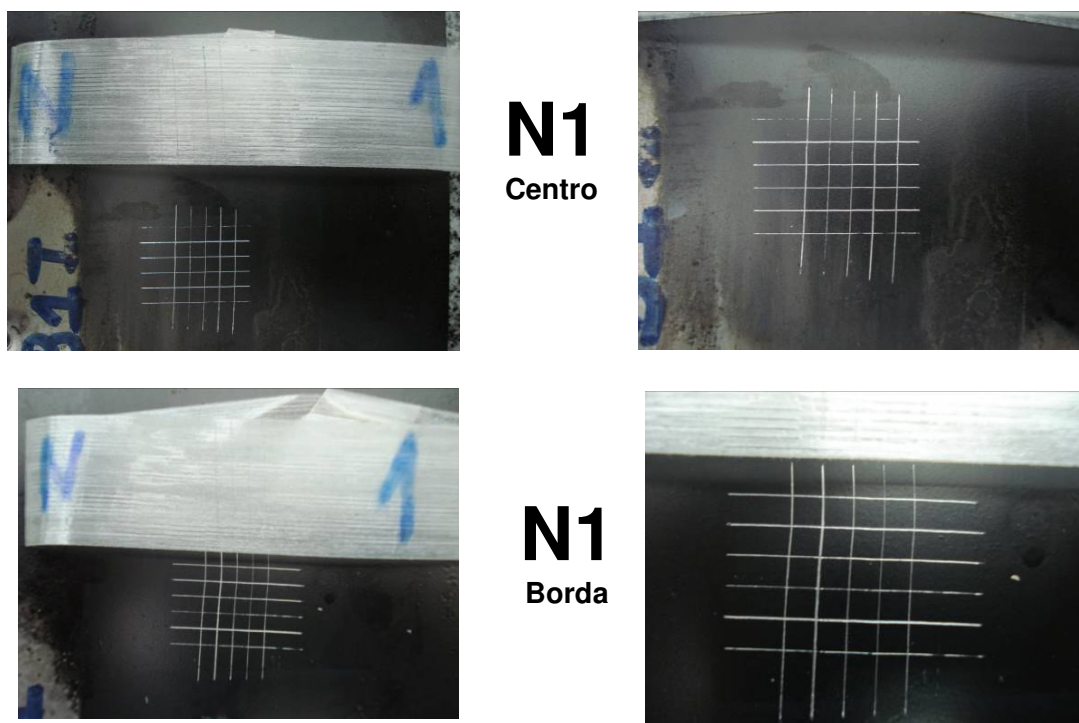


Figura 5.9: Resultado teste de aderência na borda e no centro da chapa não galvanizada.

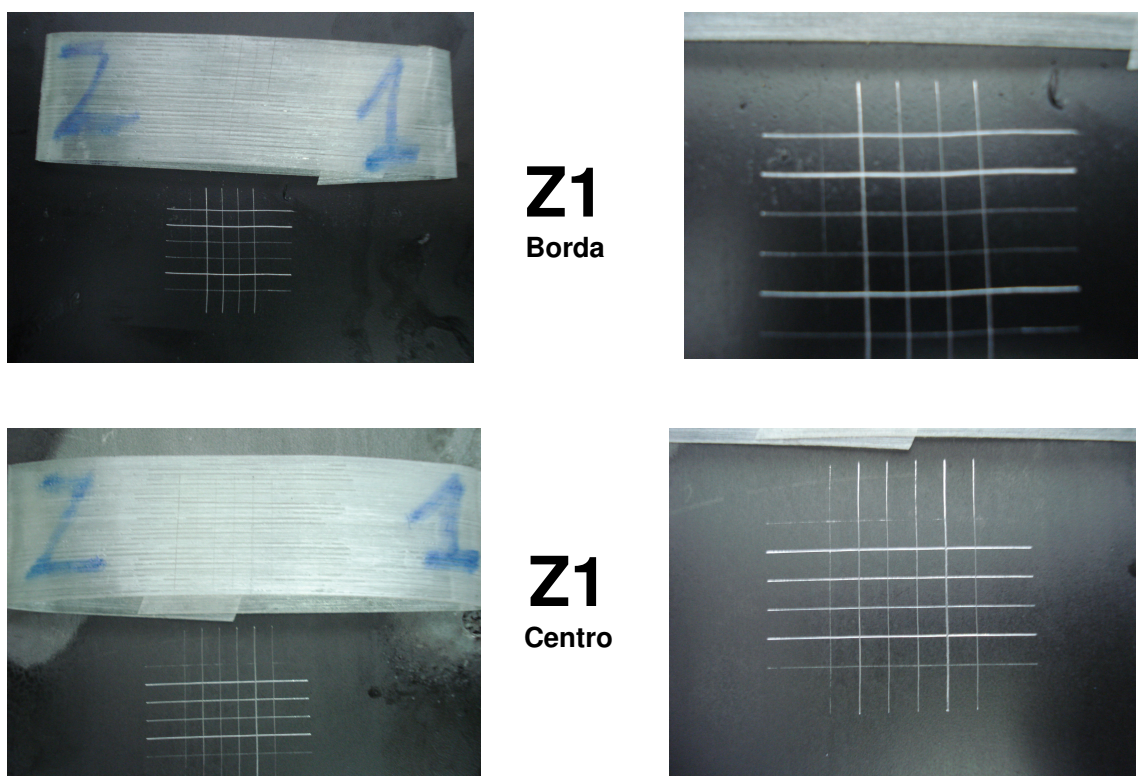


Figura 5.10: Resultado teste de aderência na borda e no centro da chapa galvanizada.

5.2.3 Espessura da camada de e-coat e análise estatística das medições.

Foram realizadas as medições de camada do filme de tinta, como discutido no capítulo 4. Esses dados foram armazenados em planilhas eletrônicas como exemplo Tabelas 5.1 e 5.2, para chapas galvanizadas e não galvanizadas respectivamente. A partir destas medidas foram construídos gráficos que possibilitaram a interpretação do comportamento da distribuição da camada do filme de tinta, ao longo do corpo de prova, bem como iniciar a análise comparativa entre os corpos de prova de mesmo acabamento superficial apresentado nas figuras 5.11 e 5.12.

Tabela 5.1: Coleta de dados do experimento para aço galvanizado.

Medição de espessura de camada de e-coat												
Galvanizado												
Chapa Local	Z1B1		Z1B2		Z1B3		Z2B1		Z2B2		Z2B3	
	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
Externo	24	23	24	26	29	28	29	25	24	27	30	25
1a	16	12	20	20	20	20	18	20	22	18	20	23
1b	18	16	20	18	20	20	22	23	18	20	22	23
1c	14	16	18	18	20	22	22	22	22	23	22	23
Média	16	15	19	19	20	21	21	22	21	20	21	23
Desvio Padrão	2	2	1	1	0	1	2	2	2	3	1	0
2a	9	9	12	12	14	16	16	18	18	18	16	18
2b	9	9	12	14	14	16	18	18	16	18	18	18
2c	9	11	12	12	14	16	18	18	16	20	16	18
Média	9	10	12	13	14	16	17	18	17	19	17	18
Desvio Padrão	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0
3a	5	7	9	9	12	14	14	14	12	16	12	16
3b	3	5	9	7	12	12	14	12	14	16	14	16
3c	3	5	9	9	14	12	14	14	16	16	14	14
Média	4	6	9	8	13	13	14	13	14	16	13	15
Desvio Padrão	1	1	0	1	1	1	0	1	2	0	1	1
4a	3	5	7	5	11	12	11	9	12	14	12	12
4b	7	5	5	3	11	11	9	11	11	14	12	12
4c	7	5	5	5	11	12	11	11	11	16	12	14
Média	6	5	6	4	11	12	10	10	11	15	12	13
Desvio Padrão	2	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
5a	5	5	7	3	9	11	9	9	11	12	9	11
5b	7	3	5	5	9	11	9	9	11	12	11	9
5c	5	5	5	3	9	11	9	9	11	12	11	11
Média	6	4	6	4	9	11	9	9	11	12	10	10
Desvio Padrão	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
6a	5	5	7	3	9	9	5	5	9	11	9	9
6b	5	5	5	3	7	11	7	5	9	11	9	9
6c	5	7	5	3	9	9	7	7	9	11	9	11
Média	5	6	6	3	8	10	6	6	9	11	9	10
Desvio Padrão	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1
7a	11	9	5	3	11	9	3	5	7	9	9	11
7b	9	11	5	3	11	9	5	5	5	9	9	9
7c	11	9	5	3	11	9	3	5	7	9	11	9
Média	10	10	5	3	11	9	4	5	6	9	10	10
Desvio Padrão	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1
8a	12	11	9	7	12	12	11	7	7	7	12	11
8b	12	12	9	9	12	12	9	9	7	9	12	11
8c	12	11	9	9	11	12	9	9	7	7	11	11
Média	12	11	9	8	12	12	10	8	7	8	12	11
Desvio Padrão	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
9a	16	14	12	9	12	11	11	11	9	11	14	14
9b	14	16	12	11	14	14	11	11	9	11	12	14
9c	16	14	14	11	14	16	12	11	9	12	12	14
Média	15	15	13	10	13	14	11	11	9	11	13	14
Desvio Padrão	1	1	1	1	1	3	1	0	0	1	1	0
10a	16	18	18	14	16	16	16	14	12	16	16	18
10b	16	16	16	16	16	16	16	14	14	14	16	18
10c	16	16	14	16	16	16	16	14	14	14	18	18
Média	16	17	16	15	16	16	16	14	13	15	17	18
Desvio Padrão	0	1	2	1	0	0	0	0	1	1	1	0
11a	22	20	22	22	20	23	22	22	18	22	20	22
11b	22	18	22	20	20	22	22	22	20	22	20	23
11c	20	20	22	20	22	22	22	20	20	20	20	22
Média	21	19	22	21	21	22	22	21	19	21	20	22
Desvio Padrão	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1

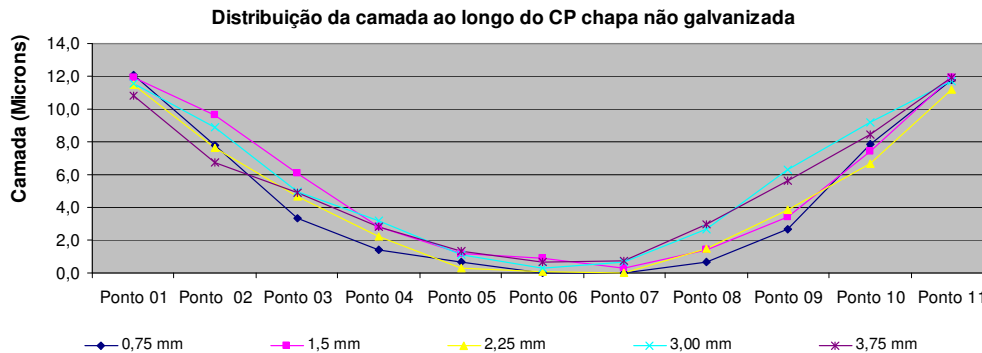


Figura 5.11: Gráfico da distribuição da espessura de camada ao longo do CP para chapa de aço galvanizado.

Tabela 5.2: Coleta de dados do experimento para aço não galvanizado.

Medição de espessura de camada de e-coat												
Não Galvanizado												
Chapa	N1B1		N1B2		N1B3		N2B1		N2B2		N2B3	
Local	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
Externo	16	16	17	16	17	18	18	18	16	16	17	18
1a	12	11	12	11	16	12	12	14	12	12	11	9
1b	9	11	11	12	14	14	14	12	11	12	12	11
1c	11	12	11	11	14	14	12	14	12	12	12	11
Média	11	11	11	11	15	13	13	13	12	12	12	10
Desvio Padrão	2	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
2a	5	7	7	5	11	11	9	9	12	12	9	9
2b	7	5	9	5	11	11	11	9	11	12	9	5
2c	7	7	7	5	9	11	11	9	11	12	7	7
Média	6	6	8	5	10	11	10	9	11	12	8	7
Desvio Padrão	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	2
3a	1	3	1	3	5	7	5	5	9	12	3	1
3b	3	1	1	3	5	7	7	5	9	11	5	1
3c	1	1	1	3	5	9	5	7	7	11	5	1
Média	2	2	1	3	5	8	6	6	8	11	4	1
Desvio Padrão	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
4a	0	1	0	0	5	5	0	0	7	9	1	0
4b	0	1	0	0	5	3	1	0	7	9	0	0
4c	0	0	0	0	3	3	0	0	7	9	1	0
Média	0	1	0	0	4	4	0	0	7	9	1	0
Desvio Padrão	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0
5a	0	0	0	0	3	1	0	0	3	5	0	0
5b	0	0	0	0	1	3	0	0	3	3	0	0
5c	0	0	0	0	3	1	0	0	5	3	0	0
Média	0	0	0	0	2	2	0	0	4	4	0	0
Desvio Padrão	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
6a	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0
6b	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0
6c	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0
Média	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0
Desvio Padrão	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
7a	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
7b	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
7c	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0
Média	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
Desvio Padrão	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
8a	0	0	1	0	1	1	3	1	3	3	0	0
8b	0	0	0	0	3	3	3	1	1	3	0	0
8c	0	0	1	0	1	1	1	1	1	5	0	0
Média	0	0	1	0	2	2	2	1	2	4	0	0
Desvio Padrão	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0
9a	0	0	3	3	5	5	5	3	7	7	1	0
9b	0	0	1	3	3	7	3	1	5	5	1	1
9c	0	0	3	3	5	7	5	3	7	5	1	1
Média	0	0	2	3	4	6	4	2	6	6	1	1
Desvio Padrão	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1
10a	7	5	7	7	9	9	9	9	7	9	3	5
10b	9	7	7	9	9	9	11	7	7	9	5	3
10c	7	5	7	9	9	11	11	11	7	9	5	7
Média	8	6	7	8	9	10	10	9	7	9	4	5
Desvio Padrão	1	1	0	1	0	1	1	2	0	0	1	2
11a	12	12	12	12	14	12	12	12	11	11	12	14
11b	12	12	11	12	12	11	11	16	11	11	11	11
11c	11	11	11	12	11	12	12	14	11	12	11	12
Média	12	12	11	12	12	12	12	14	11	11	11	12
Desvio Padrão	1	1	1	0	2	1	1	2	0	1	1	2

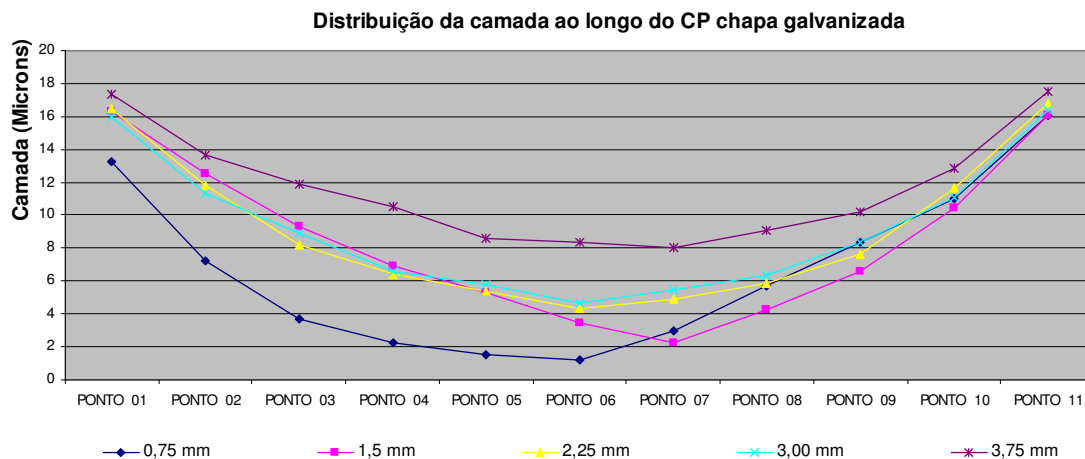


Figura 5.12: Gráfico da distribuição da espessura de camada ao longo do CP para chapa de aço galvanizado.

As figuras 5.13 e 5.14 apresentam a distribuição da espessura de camada por ponto de medição em função do GAP para chapa de aço não galvanizado e galvanizado respectivamente.

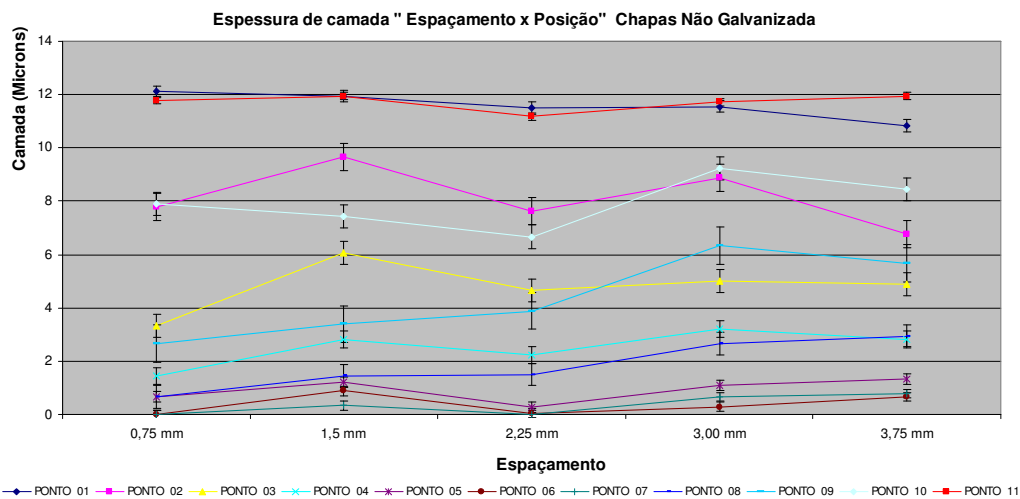


Figura 5.13: Gráfico da distribuição da espessura de camada por ponto de medição em função do GAP para chapa de aço não galvanizado.

Analisando-se a figura 5.13 nota-se um comportamento muito parecido entre as curvas dos pontos 1 e 11, 2 e 10, 3 e 9, 4 e 8 e como esses pontos são antagônicos entre si, pode-se inferir que os perfis de distribuição da espessura de camada são

aproximadamente simétricos em relação ao centro da peça. Outro fato observado é que as curvas dos pontos 5, 6 e 7, aparecem também próximas e com os menores valores de espessura de camada.

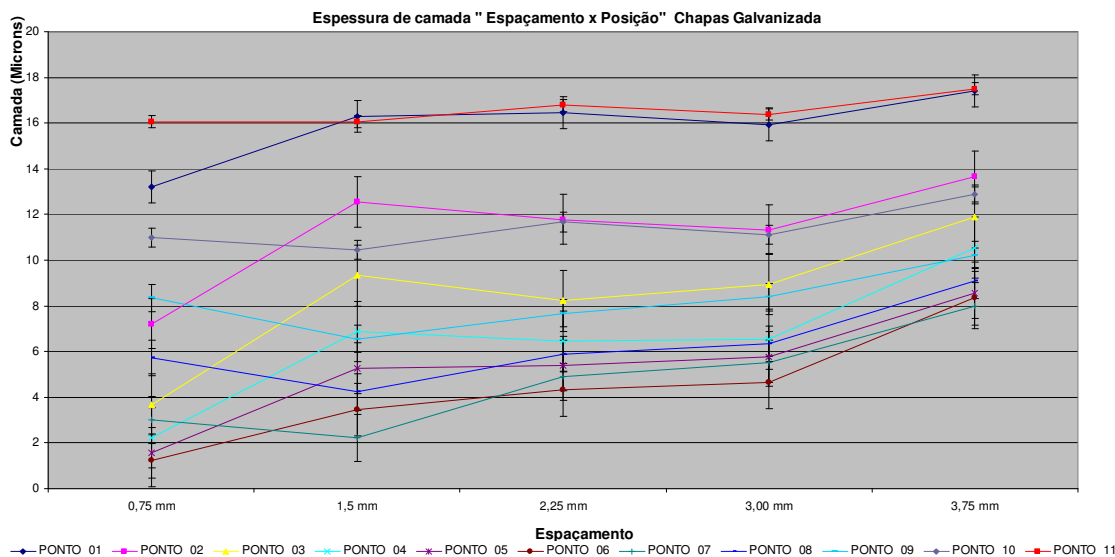


Figura 5.14: Gráfico da distribuição da espessura de camada por ponto de medição em função do GAP para chapa de aço galvanizado.

Para as chapas galvanizadas, observa-se na figura 5.14 um comportamento próximo entre as mesmas curvas citadas na figura 5.13, exceto no espaçamento 1,50 mm das curvas dos pontos 7, 8, 9 e 10, que apresentam comportamento diferente, porém não foi avaliado como relevante, pois essa variação estava contida dentro do desvio padrão da amostra.

Para uma melhor exploração das possíveis interações entre as variáveis medidas, utilizou-se um programa estatístico, o Minitab

A partir das planilhas de coleta de dados do experimento, foi gerada uma planilha que serviu como base para a entrada de dados a ser utilizado pelo software Minitab, cujos valores serão processados baseados em ferramentas estatísticas e serão obtidas várias informações como relatórios e gráficos, que precisam ser analisados, interpretados e correlacionados com a realidade estudada.

Após alguns processamentos no Minitab e seguindo análises intermediárias, solicitadas durante a interação com o software, várias informações foram retiradas como, por exemplo, as interações que não sejam relevantes para o experimento, baseadas no "pvalue" e a equação que, com um determinado grau de confiança, se torna possível interpretar o comportamento dos dados e definir a curva que mais se aproxima desse evento.

Os dados de entrada foram: Valor da espessura de camada, denominada como "X" onde "Xm" é a média dos valores; Distância entre as almas (AL), denominada como "espaçamento" que tem uma variação incremental de 0,75 mm, iniciando com 0,75 e finalizando com 3,75 mm ; Ponto de medição baseado pela máscara de medição figura 4.11, denominado como "posição" que varia de uma unidade e inicia como posição 1 e finaliza com posição 11 e como o quarto fator, o tipo de acabamento superficial definido como "1" para a chapa Galvanizada e como "-1" para chapas Não Galvanizadas. Dessa forma foi construída a tabela inicial e posteriormente foram criadas novas colunas para simular as interações relevantes entre fatores, definidas durante as análises realizadas, no desenvolvimento da avaliação estatística dos resíduos e valores de referência "p value".

A figura 5.15, sintetiza as informações a respeito das interações entre os fatores obtidos com a utilização do programa estatístico.

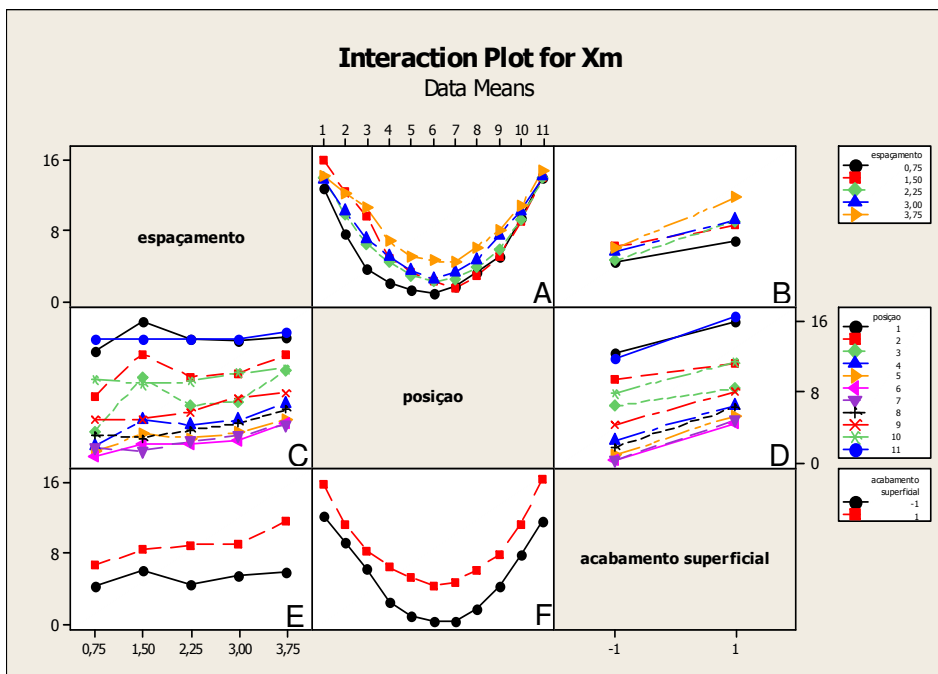


Figura 5.15 Gráfico da interação dos fatores do experimento: espaçamento, posição e acabamento superficial.

Os valores de espessura de camada do filme de tinta, na análise "espaçamento x posição" figura 5.15 A, está distribuído numa curva polinomial quadrática, onde podemos constatar que as bordas longitudinais, pontos 1 e 11 apresentam os maiores valores de espessura e no ponto 6 apresenta o mínimo valor de espessura de camada. Essa afirmação sobre o ponto 6 é confirmada pela avaliações visuais, onde observa-se uma região central onde em muitos dos CPs não obteve cobertura do filme de tinta, ou para os que foram pintados, apresentam aspecto de parcialmente pintado e com uma tonalidade mais clara, principalmente para os menores GAPs.

A afirmação com relação aos pontos 1 e 11 é reafirmada pela análise das curvas "posição x espaçamento" figura 5.15 D e dos gráficos das figuras 5.13 e 5.14, nos quais podem-se verificar, que essas curvas apresentam valores de espessura de camada muito próximos entre eles e notadamente acima dos valores médios dos outros pontos. Confirmando também o dito na análise dos gráficos das figuras 5.13 e 5.14, pode-se verificar que os pontos 5, 6 e 7, independente do espaçamento que estiver sendo usado, apresenta os menores valores de espessura de camada.

Em outra análise, verificando-se as interações "espaçamento x acabamento superficial" e também "posição x acabamento superficial" figura 5.15 E e figura 5.15 F respectivamente, pode-se afirmar que o acabamento superficial impacta significativamente no comportamento da distribuição de espessura de camada de e-coat, pois os valores para a chapas galvanizadas (1), são superiores tanto para o fator espaçamento quanto para o fator posição, para as medições ao longo da chapa do ponto 1 ao ponto 11, como também no incremento da distância entre as almas, que pode ser observado na figura 5.15 B, E, e F.

Utilizando-se também de outro recurso de análise, pode-se verificar a influência do acabamento superficial na distribuição da espessura de camada, pelos gráficos de Box Plot figura 5.16, onde se pode quantificar, através dos valores médios de camada, que em chapas galvanizadas, a espessura é 42 % maior do que em chapas não galvanizadas.

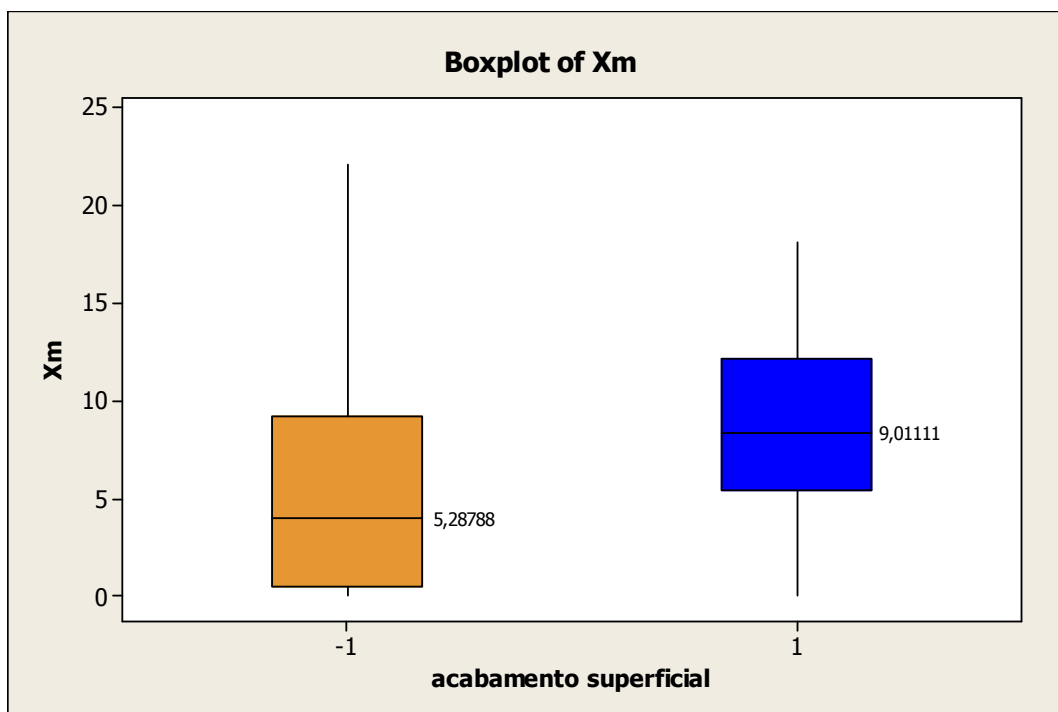


Figura 5.16: Influência do acabamento superficial na camada de e-coat, onde (-1) Chapa Não galvanizada e (1) Chapa Galvanizada.

A análise estatística permitiu o desenvolvimento de uma equação para previsão da camada de espessura de e-coat em função do espaçamento entre chapas, da posição medida e do material da chapa (galvanizado ou não). A figura 5.17 mostra os parâmetros de análise entre estes fatores.

A equação desenvolvida é apresentada Equação 2, a qual tem o poder de explicação do fenomeno em estudo de 84,45%, representado pelo (R-sq), figura 5.17. Observando também, que para se chegar nesse modelo, durante as análises realizadas, foram eliminadas todas as interações que não eram representativas para o experimento, ou seja, só foram utilizados os fatores que apresentaram p value menor 0,05, como mostrado na figura 5.17.

General Linear Model: Xm versus espaçamento; posição; acabamento super

Factor	Type	Levels	Values
espaçamento	fixed	5	0,75; 1,50; 2,25; 3,00; 3,75
posição	fixed	11	1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11
acabamento superficial	fixed	2	-1; 1

Analysis of Variance for Xm, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
espaçamento	4	361,30	361,30	90,32	20,70
posição	10	5703,16	5703,16	570,32	130,71
acabamento superficial	1	1143,65	1143,65	1143,65	262,11
espaçamento*acabamento superficial	4	139,15	139,15	34,79	7,97
Error	310	1352,58	1352,58	4,36	
Total	329	8699,85			

Source	P
espaçamento	0,000
posição	0,000
acabamento superficial	0,000
espaçamento*acabamento superficial	0,000
Error	
Total	

p value

S = 2,08882 R-Sq = 84,45% R-Sq(adj) = 83,50%

Figura 5.17 Tela do Minitab: Parâmetros de análise dos fatores "espaçamento", "posição" e "acabamento superficial" e interações do experimento.

$$X_m = 2,94 \text{ espaçamento} + 0,674 \text{ posição} + 0,646 \text{ acabamento superficial} \\ - 0,276 \text{ espaçamento} \times \text{posição} + 0,540 \text{ espaçamento} \times \text{acabamento superficial}$$

Equação 2: Equação para previsão da camada de e-coat, onde X_m é o resultado de espessura de camada esperado, quando for definido espaçamento, posição e acabamento superficial.

Desenvolvendo-se essa equação, pode-se obter valores do espaçamento entre chapas (E) em função de posição, acabamento superficial e espessura de camada pré definidos. Obtendo-se então as equações em função da espessura de camada:

$$E = (X - 3,398) / 0,744 \quad \text{Equação 3}$$

Equação 3: Equação para aços não galvanizados (-1) e posição (6) ponto de mínima espessura esperada.

$$E = (X - 4,69) / 1,824 \quad \text{Equação 4}$$

Equação 4: Equação para aços galvanizados (1) e posição (6) ponto de mínima espessura esperada.

Utilizando-se 10 microns como valor razoável de camada de tinta e comparando-se os valores obtidos, verifica-se que a distância entre chapas para aços galvanizados pode ser em torno de 3 vezes menor do que para aços não galvanizados.

Essa possibilidade de utilização de menor espaço entre chapas, alterando acabamentos superficiais reativos com os banhos de pintura, abre espaço para utilização de maior reforço estrutural das peças, através de mudanças das formas geométricas, com adicional potencial de redução do peso dos veículos, devido a possível redução da espessura das chapas ou redução da quantidade de peças

utilizadas. Essa oportunidade terá impacto positivo imediato no aumento da eficiência do consumo de combustíveis, na corrosão, além de maior flexibilidade nos projetos que visam melhorar a resistência mecânica. Dessa forma pode-se abrir espaço para obtenção de maior competitividade no mercado automobilístico, melhorando-se custo, qualidade e satisfação do cliente.

5.2.4 Experimento comprovatório

Baseados na utilização da equação 3, verificamos que para uma suposta camada de 7 μm , para a chapa não galvanizada, seria necessário espaçamento de 4,84 mm. Foi realizado uma batelada adicional de 10 CPs, para servir com comprovação da equação sugerida pelo Minitab. A configuração do novo experimento foi, 03 CPs com espaçamento de 4,50 mm (Z6) para chapa galvanizada e mais 03 CPs (N6) para não galvanizada, além de mais 02 CPs com espaçamento de 5,25 mm (Z7) para chapa galvanizada e mais 02 CPs (N7) para não galvanizada.

Após a realização dos mesmos, verifica-se pela tabela 5.3 que os valores de camada do novo experimento, ficaram bem próximos ao valor esperado de 7 μm para o aço não galvanizado e de 13 μm de camada para o galvanizado. Contudo, os valores poderiam estar mais próximos, visto que pelo cálculo da equação deveria-se testar com 4,84, mas por limitação experiemntal, foi testado 4,5.

Tabela 5.3: Dados experimentais com espaçamentos de 4,5 mm e 5,25 mm .

	Corpo de Prova			
	N6	N7	Z6	Z7
Média das médias (μm)	10	11	12	14
Desvio padrão	4	1	2	3

6 CONCLUSÕES

1. Com os resultados obtidos, pode-se concluir que, para as chapas de aço galvanizado, o processo de pré tratamento apresenta um resultado mais eficiente com relação à formação da camada de fosfato, mesmo em pequenos espaçamentos como os GAP de 1,50 mm. No entanto, para as chapas de aço não galvanizado, a formação da camada de fosfato apresenta um resultado semelhante ao da chapa galvanizada , quando atinge o espaçamento de 3,75 mm.
2. Com relação ao processo de pintura e-coat, pode-se afirmar que no comparativo entre as chapas, as galvanizadas apresentam melhor aspecto visual do filme de tinta com o espaçamento de 2,25 mm, e a partir de 3,00 mm não se pode visualmente definir diferenças de aspecto entre as coberturas.
3. Após os ensaios comprovatórios, pode-se afirmar, que a equação gerada pelo Minitab baseada nos dados experimentais, pode ser utilizada, com boa precisão, para previsão das espessura da camada de ecoat a ser aplicada.

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como complementação dessa dissertação, seria interessante realizar teste de corrosão nas chapas processadas, para validar a efetividade da proteção à corrosão das camadas encontradas, principalmente nas chapas não galvanizadas, bem como aumentar a variável comprimento dos corpos de prova.

8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AMADEH, A.A.; LABBE, J.C.; QUINTARD, P. E. **Behaviour of the wettability of a SiAlON-base ceramic by molten steel**, J. Eur. Ceram. Soc. 25, (2005) 1041-1048.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7008 – Chapas e bobinas de aço revestidas com zinco ou com liga zinco-ferro pelo processo contínuo de imersão a quente. Rio de Janeiro, 2003.

AGA - American Galvanizers Association. ZincCoatings. 6881 S. Holly Circle, Suite 108 Centennial, CO 80112 1-800-468-7732. 2006. Disponível em: <<http://www.galvanizeit.org>>. Acesso em: 15 de julho 2009.

AISI - **American Iron And Steel Institute**, 2000, p. 373.

ALMEIDA, C. C. R.; CARIO, S. A. F.; MERCÊS, R.; GUERRA, O. F. Indústria automobilística brasileira: conjuntura recente e estratégias de desenvolvimento.

ALMEIDA, M.E.M., **Guia sobre Protecção Anticorrosiva na Indústria Automóvel**, 2000, PROTAP.

ALVARENGA, E. A.; MOREIRA, J. G.; BUONO, V. T. L. SEMINÁRIO DE LOGÍSTICA, 25., 2006, Santos: ABM, 2007.

AQUINO, I. P. **Caracterização da superfície do aço-carbono ABNT 1008 revestida com organo-silanos por meio de técnicas eletroquímicas e físico-químicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

ASM International. Metals Handbook. **Corrosion**, Vol 13. United States of America, 1987.

ASM Metals Handbook definition. **Corrosion**: Fundamentals, Testing, and Protection was published in United States of America, 2003.

BALESTRA, R.M.; RIBEIRO, S; TAGUCHI, S.P.; MOTTA, F. V.; BORMIO-NUNES, C. **Wetting behaviour of Y₂O₃/AlN additive on SiC ceramics**, J. Eur. Ceram. Soc. 26, 16 (2006) 3881-3886.

BRESCIANI FILHO, E. Emprego do Chumbo e Zinco e suas Ligas, **Associação Brasileira de Metais e Instituto Brasileiro de Informação do Chumbo e Zinco**, São Paulo, 51 p., 1974.

CABRAL, E.R.; MANNHEIMER, W.A. – **Galvanização. Sua aplicação em equipamento elétrico**, Livros Técnicos e Científicos Editora S/A, CEPTEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, 1979.

CHIDAMBARAM, P. R.; MEIER, EDWARDS, A. G. R. The nature of interfacial phenomena at copper-titanium/alumina and copper-oxygen/alumina interfaces, **Mater.Sci. Eng. A** 206, 2 (1996) 249-258.

CONSONI, F. L. **Da tropicalização ao projeto de veículos**: um estudo das competências em desenvolvimento de produtos nas montadoras de automóveis no Brasil. Campinas: Unicamp; Instituto de Geociências, 2004. Tese (Doutorado).

CONTRERAS, A; ANGELES-CHÁVEZ, C; FLORES, O.; PEREZ, R. Structural, morphological and interfacial characterization of Al-Mg /TiC composites, **Mater. Charact.** 58, 8-9 (2007).

DE ABREU, Y.; SILVA, A.; RUIZ, A.; EQUIZ, R; ÂNGULO, N.; ALANIS, R. – **Study of Zinc Coatings on Steel Substrate Attained by Two Different Techniques**, Surface and Coatings Technology, vol. 120-121, pp. 682-686, 1999.

DOSI, G. **Technical change and Industrial Transformation**: the theory and an application to the semiconductor industry. London : MacMillan, 1988.

EUSTATHOPOULOS, N.; SOBCZAK, N.; PASSERONE, A.; NOGI, K.. Measurement of contact angle and work of adhesion at high temperature, **J. Mater.Sci.** 40 (2005) 2271-2280.

FERNANDES, F.; MARIANO, R.; GNECCO, C. **Tratamento de superfície e pintura**. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, v.7, n. 94, ago. 2003.

FERRO, J. **Estudo da competitividade da indústria brasileira**: competitividade da indústria automobilística. Campinas: MCT/Unicamp, 1993.

FOTOSEARCH - Bancos de imagens. Disponível em <
<http://www.fotosearch.com.br/fotos-imagens> > Acesso em 10 de fevereiro de 2011.

Fundação de Economia e Estatística. Disponível em
<http://www.fee.tche.br/sitefee/download/indicadores/34_01/14_parte.pdf>. Acesso em: 11 de maio 2010.

GARANDET, J. P.; DREVET, B.; EUSTATHOPOULOS, N. On the validity of Young's equation in the presence of gravitational and other external force fields, **Scripta Mater.** 38, 9 (1998).

GELIJNS, A.C. & ROSENBERG, N. **The Changing Nature of Medical Technology Development.** In: ROSENBERG, N.; GELIJNS, A. C. e DAWKINS, H. Sources of Medical Technology: Universities and Industry, Washington , DC.: NationalAcademy Press. 1995.

GENTIL, V. Corrosão 4a. Ed., Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos: S.A., 2003.

GENTIL, V. – **Corrosão**, 3ª Ed.: Guanabara, Rio de janeiro, 1996.

GNECCO, C. **Pintura do Aço Patinável**, Março 2000.

GNECCO, C.; MARIANO, R; FERNANDES, F. **Tratamento de superfície e pintura.** Rio de Janeiro: IBS/SBCA, 2003.

GOMES, I. R. **Breve comentário sobre o Método de Descartes.** Universidade de Fortaleza, 2007.

GUIA TÉCNICO AMBIENTAL. **Tintas e Vernizes.** São Paulo: CETESB, Série P+L, abril 2006.

HENKEL , **Apresentação Pré-Tratamento e Fosfatização para FORD**, Camaçari , 2010

HENNING, A. K.; EICHHORN, K. J.; STAUDINGER, K.; SAHRE, K.; ROGALLI, M. STAMM; NEUMANN, A. W.; GRUNDKE, K. Contact Angle Hysteresis: Study by dynamic cycling contact angle measurements and variable angle spectroscopic ellipsometry on polyimide, **Langmuir** 20 (2004) 6685-6691.

LEE, H.L.; NAM, S. W.; HAHN, B. S. **Joining of silicon carbide using MgO-Al₂O₃-SiO₂ filler**, J. Mater. Sci. 33, 20 (1998) 5007-5014.

LONG, J; HYDER, M. N.; HUANG, R. Y. M.; CHEN, P. **Thermodynamic modeling of contact angles on rough, heterogeneous surfaces**, Adv. Colloid Interface Sci. 118, 1-3 (2005), 173-190.

LUZ, A.P. RIBEIRO, S. Wetting behaviour of silicon nitride ceramics by Ti-Cu alloys, **Ceram. Int.** (2006) doi:10.1016/j.ceramint.2006.10.022.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de pesquisa**.3 ed. São Paulo. Atlas, 1996.

MARDER, A.R. – **The metallurgy of zinc-coated steel**, Progress in Materials Science, vol. 45, pp. 191-271, 2000.

MARQUES, F.; CARREIRA, D.; RAMOS, J. **Proteção Anticorrosiva na Indústria Automóvel**. Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia de Cerâmica e Vidro. Portugal, Maio de 2008.

MAYNE, J.E.O. The mechanism of the protection of iron and steel by paint. **Anticorrosion**, p.3-8, 1973.

MUNGER; C.G. Corrosion prevention by protective coatings. **National Association of Corrosion Engineers**, 1984.

NACE INTERNATIONAL RESOURCE CENTER. Disponível em <<http://www.nace.org>>. Acesso em: 28 de maio 2009.

NACE, **Basic corrosion course**. Houston, 1975.

NAKAE, H., INUI, R., HIRATA, Y., SAITO, H. Effects of surface roughness on wettability. **Acta mater**, v.46, n.7, p.2313-2318, 1998.

NELSON, R & WINTER, S. **Na Evolutionary Theory of Economic Change**. Cambridge: Belknap Press of Harvard University Press. 1982.

OSÓRIO, W. R. R.. **Análise da Influência de Parâmetros Estruturais da Solidificação de Metais e Ligas na Resistência à Corrosão**. Tese [Doutorado em Engenharia Mecânica] Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2004.

PANNONI, F.D. **Condições para formação da pátina protetora em aços patináveis**. São Paulo: Gerdau Açominas, 2005.

PANOSSIAN, Z. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas**. São Paulo: Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT), V. 2, 1993, 356 P.

PONTE, H.A.; PONTE, M.J.J.S.; MAUL, A. M. **Apostila de Pintura Automotiva**. Curitiba, 2000.

Revista Construção Metálica, Nº 50, Disponível em <<http://www.metallica.com.br>>. Acesso em: 14 de setembro 2009.

ROBERGE, P.R. **Handbook of corrosion Engineering**. New York, McGraw-Hill, 2000, p. 1-54.

SCHEER, L. **Que é aço**. 2. Ed. São Paulo: EPU, 1977, 129p.

SHAO, M., Fu, Y., Hu, R., Lin, C. – **A study on pitting corrosion of aluminium alloy 2024T3 by scanning microreference electrode technique**, Materials Science and Engineering, article in press, 2003.

SHEN, P; FUJII, H. NOGI, K. “Wettability of polycrystalline rutile TiO₂ by molten Al in different atmospheres”, **Acta Mater**.54(2006) 1559-1569.

SIDDIQI, N.; BHOI, B.; PARAMGURU, R. K.; SAHAJWALLA, V.; OSTROVSKI, O. Slag-graphite wettability and reaction kinetics - part 2, Wettability influenced by reduction kinetics, **Ironmaking Steelmaking**27, 6 (2000) 437-441.

SILVA, Fernanda Cristina da; FALDINI, Sônia Braunstein. **Galvanização a quente: processo por batelada**. Universidade Presbiteriana Mackenzie, Departamento de Engenharia de Materiais. São Paulo.

SLUNDER, C. J.; BOYD, W. K. – **Zinc: Its corrosion resistance**, Battelle Memorial Institute, 1st edition, International Lead Zinc Research Organization, Inc., Ohio, p.194, 1971.

SOBCZAK, N.; SINGH, M.; ASTHANA, R. High-temperature wettability measurements in metal/ceramic systems – some methodological issues, **Current Opinion Solid State Mater**. Sci. 9(2006) 241-253.

TEECE e PISANO. **The Dinamic Capabilities of Firm**: an Introduction Industrial and Corporate Change, 1994.

Tubos ERW. Disponível em <http://tubos.comze.com/pages/corrosao_em_tubulacoes.php> Acesso em 26 de janeiro de 2011.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais**. Rio de Janeiro: Campus, 1984, 597p.

VÉRGES, G.R. **Estudo do desempenho de sistemas de pintura para materiais das redes de distribuição de energia elétrica situadas em regiões litorâneas. 2005. 194f. Dissertação** (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.