

**UNIVERSIDADE SAGRADO CORAÇÃO**

**JULIO CESAR FELIPPE**

**PROCESSOS DE PINTURA ELETROSTÁTICA COM  
TINTA EM PÓ: DURABILIDADE, BELEZA E  
QUALIDADE GERADAS PELA ATRAÇÃO DE  
CARGAS ELÉTRICAS**

BAURU  
2012

**JULIO CESAR FELIPPE**

**PROCESSOS DE PINTURA ELETROSTÁTICA COM  
TINTA EM PÓ: DURABILIDADE, BELEZA E  
QUALIDADE GERADAS PELA ATRAÇÃO DE  
CARGAS ELÉTRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, sob orientação do Prof.Me. Dorival Roberto Rodrigues.

BAURU  
2012

F315p

Felippe, Julio César

Processos de pintura eletrostática com tinta em pó : durabilidade, beleza e qualidade geradas pela atração de cargas elétricas. / Julio Cesar Felippe -- 2012.

48f.: il.

Orientador: Prof. Me. Dorival Roberto Rodrigues.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Sagrado Coração – Bauru – SP.

1. Pintura Eletrostática. 2. Tinta a pó. 3. Peças Metálicas. I. Rodrigues, Dorival Roberto. II. Título.

**JULIO CESAR FELIPPE**

**PROCESSOS DE PINTURA ELETROSTÁTICA COM TINTA EM PÓ:  
DURABILIDADE, BELEZA E QUALIDADE GERADAS PELA  
ATRAÇÃO DE CARGAS ELÉTRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, sob orientação do Prof.Me. Dorival Roberto Rodrigues.

Banca Examinadora:

---

Prof.Me. Dorival Roberto Rodrigues.

Universidade Sagrado Coração

---

Prof. Dr. Sandro Megale Pizzo

Universidade Sagrado Coração

---

Prof.Esp. Flávio Tonello Tavares

Universidade Sagrado Coração

Bauru, 04 de dezembro de 2012

Dedico este trabalho a Deus  
por ter me dado forças para  
superar todos os desafios,

aos meus pais, Cássio e  
Catarina, à minha namorada  
Adriana e aos meus tios Flávio  
e Maria José que sempre me  
ajudaram em todos os  
aspectos.

e aos meus professores que  
contribuíram para mais uma  
vitória em minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por proporcionar-me todas as conquistas que tive até o presente momento.

Agradeço aos meus pais, pelos ensinamentos essenciais para a formação de meu caráter, pelo carinho e pelo apoio para lidar com os obstáculos da vida.

Agradeço aos meus tios Flávio e Maria José pela dedicação, confiança e incentivos depositados em mim e em minha carreira acadêmica.

Agradeço minha namorada Adriana, por ter vivenciado comigo passo a passo todos os detalhes deste trabalho, ajudado, e dado todo o apoio de que necessitei nos momentos difíceis, mas principalmente por todo carinho, paciência e respeito, nos momentos de estresse.

Agradeço a todos os meus professores, pelo ensino de boa qualidade e pela dedicação ao transmitirem conhecimentos diferenciados e significativos para minha formação profissional.

Agradeço em especial ao meu professor orientador Me. Dorival Roberto Rodrigues, que demonstrou muita paciência, dedicação, compreensão e atenção que foi de suma importância para a elaboração desse trabalho, estando sempre presente, esclarecendo as minhas dúvidas com muita competência, confiança, conhecimentos e principalmente amizade.

Agradeço também aos meus amigos que fizeram parte da minha vida durante esses cinco anos de graduação, proporcionando e ao mesmo tempo dividindo momentos de alegrias, experiências e conquistas.

Um grande prazer na vida é  
fazer aquilo que as pessoas  
dizem que você não é capaz de  
fazer. (Walter Gagehot)

## RESUMO

A pintura eletrostática a pó é utilizada na indústria para revestimento de superfícies metálicas, tendo como objetivos a proteção anticorrosiva, a estética, e a boa qualidade no produto final. Esse método vem sendo cada vez mais empregado nas indústrias, pois apresenta facilidade na pintura sem a necessidade de mão de obra especializada e com recurso de automatização, elevada produtividade com baixos índices de desperdícios de tinta e, além disso, é de baixo impacto ambiental e gera um produto com homogeneidade na espessura de película. O processo de pintura é formado por diversas etapas como desengraxe, aderência da tinta na superfície metálica através do fenômeno de eletrodeposição do pó e finalmente a cura da tinta. Este trabalho descreve a técnica de pintura eletrostática com tinta em pó, com enfoque nos aspectos industriais envolvidos como equipamentos parâmetros de controle, insumos e qualidade do produto final. São descritos de forma comparativa alguns métodos utilizados na indústria de pintura eletrostática e descritos os principais critérios de aplicação de cada processo.

**Palavras-chave:** Pintura eletrostática. Tinta a pó. Peças metálicas.

## **ABSTRACT**

The electrostatic powder painting is used in industry for covering metal surfaces, aiming to corrosion protection, aesthetics, and good quality in the final product. This methodology has been increasingly used in industries as it offers a better painting without the need for skilled labor and using automation, high productivity with low levels of waste ink and also is of low environmental impact and generates a product with the film thickness uniformity. The painting process comprises several steps as degreasing, ink adhesion on the metal surface through the phenomenon of electrodeposition powder and finally curing the ink. This paper describes the technique of painting with electrostatic powder painting, with a focus on industrial aspects involved as equipment control parameters, inputs and final product quality. Are described in some comparative methodologies used in the industry of electrostatic painting and described the main criteria for the application of each process.

**Keywords:** Electrostatic Painting. Powder paint. Metal Parts.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Apresentação das vantagens e desvantagens do método .....	15
Figura 2 - Sistema de pré-tratamento por <i>spray</i> em 3 estágios, ou 3 tanques com produtos diferentes.....	21
Figura 3 - Exemplo de 3 sistemas de <i>spray</i> , com variação na quantidade de bicos e posicionamento .....	22
Figura 4 - Cloreto de vinílica.....	28
Figura 5 - Estrutura química do polímero Epóxi .....	30
Figura 6 - Amidinascíclicas.....	32
Figura 7 -1-cianoguanidina.....	32
Figura 8 - Funcionamento do leito fluido eletrostático .....	34
Figura 9 - Revolver com efeito corona.....	36
Figura 10 - Sistema de pulverização por fricção .....	38
Figura 11 - Aplicação da tinta em pó pelo processo tribo-elétrico.....	39
Figura 12 - Cabine de pintura de um sistema contínuo.....	41
Figura 13 - Cabine de pintura de um sistema contínuo.....	41

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	13
2.1	GERAL .....	13
2.2	ESPECÍFICOS .....	13
<b>3</b>	<b>PROCESSO PRODUTIVO</b> .....	14
3.1	PRÉ TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES.....	14
3.1.1	Desengraxe .....	14
3.1.2	Enxágue Pós-Desengraxe .....	16
3.1.3	Decapagem Alcalina.....	16
3.1.4	Fosfatização.....	16
3.1.5	Enxágue pós-fosfato .....	19
3.1.6	Passivação .....	19
3.1.7	Enxágue de água deionizada.....	20
3.1.8	Secagem.....	20
<b>4</b>	<b>SISTEMA DE PRÉ-TRATAMENTO POR SPRAY</b> .....	21
<b>5</b>	<b>DEFEITOS OBSERVADOS NA SUPERFÍCIE</b> .....	23
5.1	RACHADURAS E FISSURAS PROFUNDAS.....	23
5.2	INCLUSÕES.....	23
5.3	BORDAS AFIADAS OU CANTO VIVO.....	23
5.4	POROSIDADE DA SOLDA - “MORDEDURA” DA SOLDA .....	24
5.5	CORDÕES DE SOLDA IRREGULARES.....	24
<b>6</b>	<b>PROCESSO DE PINTURA ELETROSTÁTICA</b> .....	25
6.1	CONTEXTO HISTÓRICO.....	25
6.2	CLASSIFICAÇÃO DAS TINTAS.....	26
6.2.1	Tintas em pó termoplásticas baseadas em poliolefinas.....	27
6.2.2	Tintas em pó termoplásticas vinílicas .....	28
6.2.3	Tintas em pó termoplásticas baseadas em nylon .....	29
6.3	TINTAS EM PÓ TERMOCONVERTÍVEIS.....	30
6.3.1	Tintas em pó epoxídica.....	30
6.3.2	Tinta em pó poliéster .....	33
6.4	APLICAÇÃO DAS TINTAS EM PÓ .....	33
6.4.1	Leito fluido eletrostático.....	33
6.4.2	Pulverização eletrostática .....	34
6.4.3	Carga elétrica de pós .....	35
6.4.4	Pulverização eletrostática de efeito corona.....	35
6.4.5	Pulverização eletrostática por fricção ou tribo.....	37

<b>7</b>	<b>CABINES DE PINTURA</b> .....	40
<b>8</b>	<b>CURA DAS TINTAS EM PÓ</b> .....	42
8.1	ESTUFAS POR IRRADIAÇÃO .....	43
8.2	ESTUFAS POR CONVECÇÃO .....	44
8.3	ESTUFAS ESTACIONÁRIAS .....	44
8.4	ESTUFAS CONTÍNUAS .....	44
<b>9</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	46
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	47

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos métodos de proteção anticorrosiva de maior utilização na atualidade é a pintura industrial. A sua simplicidade e bons resultados de proteção obtidos a tornam bastante empregada.

A pintura eletrostática vem apresentando um elevado crescimento devido à aplicação de novas tecnologias nos processos e conquistas de novos mercados. Esse processo está sendo amplamente utilizado em indústrias automobilísticas, de eletrodomésticos, móveis metálicos e vários outros acessórios. (NUNES; LOBO, 2007).

A necessidade de criar novas aplicações conduziu a uma maior competitividade entre os produtores de tintas em pó, desenvolvendo novos produtos, formulações e tecnologias.

O revestimento de tintas em pó oferece significativas vantagens comparado com outros métodos; é de fácil aplicação, podendo ser realizada por operadores não especializados, o processo pode ser automatizado, resultando em revestimentos com excelentes acabamentos, sem a presença de escorridos ou pingos que são provenientes de pinturas líquidas, seu rendimento é de aproximadamente 98% gerando baixos desperdícios e resíduos. Outras vantagens observadas são baixíssimo impacto ambiental, não há a necessidade de grandes investimentos em instalações, permite uma camada de tinta com espessura uniforme, com excelentes propriedades garantindo boa resistência ao intemperismo, agentes químicos entre outros. (FAZENDA, 2005).

A tinta em pó é um dos mais modernos e avançados sistemas de revestimentos para peças que necessitam alta proteção e alto nível de acabamento, tanto para fins decorativos quanto para funcionais. Na forma de apresentação atual, é o resultado de várias décadas de pesquisa de diversos setores da indústria, cujo objetivo foi obter um produto confiável e de fácil manipulação, com alto rendimento, baixa agressividade ao meio ambiente e ao ser humano, bem como um custo bastante atraente considerando-se a realidade de mercado.

As tintas em pó surgiram nos Estados Unidos no final da década de 1950.

Inicialmente, eram utilizadas máquinas e equipamentos para homogeneização e moagem que não permitiam total associação dos componentes da formulação

resultando em misturas heterogêneas e conseqüentemente causando sérios problemas na aplicação e alto custo de produção.

Eram produtos relativamente simples, constituídos por misturas secas de resina epóxi sólida, pigmentos (cargas) e endurecedores. A dispersão era feita através de moinhos de bolas.

A aplicação era realizada por um processo denominado “leito fluidizado”, porém, devido à natureza heterogênea da tinta em pó, havia uma separação natural pó peso e tamanho, fazendo com que a composição da mistura fosse sendo alterada à medida que a aplicação era efetuada.

A conseqüência disso era uma grande inconstância nos resultados do revestimento quanto ao aspecto visual (cor inconstante na aplicação e não reprodutiva de lote para lote).

Até então as tintas em pó não eram consideradas adequadas para efeitos decorativos, sendo utilizadas como isolantes elétricos ou revestimentos anticorrosivos, com espessuras acima de 200  $\mu\text{m}$  (esta unidade é comumente chamada de micra). (FAZENDA, 2005).

Em virtude destas dificuldades, foram abandonadas todas as experiências até a década de 1960, quando a SHELL, empresa produtora de petróleo e derivados, resolveu retomar este trabalho, atuando no desenvolvimento de novas resinas e processos de produção. Após 5 anos de dedicadas experiências e já na era do desenvolvimento do plástico, foi adequada a extrusora como máquina ideal para a fusão dos componentes da formulação, garantindo assim maior estabilidade dos produtos e ainda hoje é responsável pela totalidade da produção de tintas em pó. Somente então a indústria aceitou a idéia da tinta em pó ser “economicamente viável”.

Até meados da década de 70, os sistemas epóxi eram os predominantes e responsáveis por mais de 90% do total de tinta produzido. Começaram a ser desenvolvidos outros sistemas de resinas

Simultaneamente, foram iniciados desenvolvimentos objetivando aplicações e usos específicos que demandaram tecnologias também específicas tais como: revestimentos em pó para oleodutos e revestimentos do tipo sanitários para aplicação em interiores de tambores destinados ao acondicionamento de sucos cítricos.

Na década de 80 as tintas se estabelecem fortemente no mercado norte americano e japonês, sendo menos utilizados na Europa, também com o revestimento para uso externo.

A partir de então, os resultados foram surpreendentes, chegando aos produtos atuais, considerados altamente competitivos e de excepcional qualidade.

O Brasil é um dos cinco maiores mercados mundiais para tintas, fabricam-se no país tintas destinadas às mais variadas aplicações, com tecnologia de ponta e grau de competência técnica comparável a dos mais avançados centros mundiais de produção. Há centenas de fabricantes, de grande, médio e pequeno porte, espalhados por todo o país. Os dez maiores fabricantes respondem por 75% do total das vendas. Os grandes fornecedores mundiais de matérias-primas e insumos para tintas estão presentes no país, de modo direto ou através de seus representantes, juntamente com empresas nacionais, muitas delas detentoras de alta tecnologia e com perfil exportador. O faturamento líquido do setor de tintas no Brasil em 2011 foi de US\$4,5 bilhões e um crescimento anual de 2,9% ao ano. (ABRAFATI, 2011).

## 2 OBJETIVOS

Este trabalho de conclusão de curso teve como diretrizes norteadoras os seguintes objetivos:

### 2.1 GERAL

- Descrever os principais equipamentos e tecnologias utilizadas no processo de pintura eletrostática com tinta em pó.

### 2.2 ESPECÍFICOS

- Comparar os principais métodos da pintura eletrostática com tinta em pó considerando aspectos como eficiência e qualidade.
- Discutir a necessidade de rigorosos parâmetros de controle do processo eletrostático de pintura, como temperatura, tensão, velocidade de fluxo e outros na obtenção de um resultado de boa qualidade.

### **3 PROCESSO PRODUTIVO**

As peças que chegam ao setor de pintura de uma indústria apresentam diversas impurezas que podem interferir diretamente no processamento e na qualidade de proteção visada. Desta maneira faz-se necessária a utilização de um pré-tratamento que elimine estes interferentes. Esta etapa é de extrema importância para que ocorra uma boa aderência da tinta no material. O pré-tratamento também auxilia na proteção anticorrosiva. Para que as peças se movimentem pelos diversos estágios da pintura, é utilizado um sistema de transporte que percorre desde o pré-tratamento até o processo final.

#### **3.1 PRÉ TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES**

##### **3.1.1 Desengraxe**

Esta etapa consiste na remoção de sujidades, em sua maioria orgânicas, como óleos e graxas e seu resultado interfere diretamente na qualidade do acabamento, pois qualquer resíduo presente na superfície afeta o desempenho e resulta em uma camada não uniforme.

Os desengraxantes alcalinos, base para o processo de desengraxe, removem filmes e agregados de sujidades que se encontram aderidos às superfícies metálicas. São formados por sais inorgânicos (parte alcalina) e compostos orgânicos (Surfactantes).

Segundo Gentil (2011), os resíduos oleosos são removidos com o uso de solventes adequados como solventes clorados ou soluções alcalinas (desengraxantes) devido à maioria das graxas e óleos serem insolúveis em água. Existem graxas saponificáveis, isto é, passíveis de serem removidas com uso de produtos alcalinos.

A solução dever ter a alcalinidade variando de acordo com a intensidade da sujidade; quando é de natureza severa seu pH varia de 12,4 a 13,8 ; quando a sujidades são medianas, o pH varia de 11,2 a 12,4 e se for de natureza leve o pH limita-se entre 10,5 a 11,2 e os resíduos devem ser solúveis ou miscíveis em água na temperatura de trabalho (60°C – 90°C) . Estes aspectos oferecem um banho com

uma solução homogênea, facilitando a extração de resíduos alcalinos para a etapa seguinte de enxágue.

Geralmente, utiliza-se hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH), fosfatos, carbonatos, silicatos antioxidantes e aditivos na composição de base. (GENTIL, 2011).

Os surfactantes, ou tensoativos, contêm grupos hidrofílicos, isto é, possuem afinidade com a água. Sendo assim, os grupos hidrofóbicos interagem com os compostos orgânicos e partículas contaminantes são retiradas da superfície do metal. Os tensoativos devem ser estáveis à temperatura de trabalho, compatíveis com a base utilizada, solúveis em água e produzir pouca espuma. O desengraxe pode ser feito por imersão ou *spray*.

#### Aplicação por spray

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Os solventes removem os óleos e graxas com facilidade;</li> <li>✓ É de fácil aplicação;</li> <li>✓ Método não requer grandes espaços.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Os solventes, bem como os equipamentos ou utensílios empregados, ficam rapidamente impregnados com óleo e graxa. Logo, deixam de limpar e apenas espalham os contaminantes.</li> <li>✓ Método que requer muita mão de obra envolvendo perda de solvente por evaporação;</li> <li>✓ Grande risco para a saúde e incêndio;</li> <li>✓ Só remove óleo, graxa e poeiras e não tem efeito sobre ferrugem e carepa de laminação.</li> </ul>

Figura 1 - Apresentação das vantagens e desvantagens do método.

Fonte: SILVA (2009).

Nota: Adaptado pelo autor.

Alguns fatores que influenciam a eficiência de um desengraxante são a concentração, a temperatura, tempo e ação mecânica.

Na linha de operação, o tempo é controlado pela velocidade da linha. A temperatura deve ser bem estudada, pois temperaturas muito baixas (abaixo de 60°C) reduzem a eficiência do desengraxe, ao passo que temperaturas muito elevadas (acima de 90°C) causam estrias na peça devido à rápida secagem entre os estágios do pré-tratamento. Outro fator de grande importância é a concentração dos banhos. Uma concentração alta pode atacar a camada de zinco, geralmente encontradas nas superfícies do material a ser tratado, além de contaminar o estágio subsequente de enxágue; uma concentração baixa resulta em uma limpeza inadequada. Os testes de controle dos banhos de desengraxante compreendem os métodos de medição da alcalinidade total, alcalinidade livre, condutividade e pH.

### **3.1.2 Enxágue Pós-Desengraxe**

O objetivo deste estágio é a remoção do resíduo de solução de desengraxante presente na peça, evitando a contaminação do estágio subsequente do processo, enxaguando com água.

### **3.1.3 Decapagem Alcalina**

Segundo Gentil (2011), a ação de certas bases (NaOH, KOH) sobre os metais é bastante conhecida, ocorrendo o ataque do metal. Como a predominância dos materiais usados baseia-se no aço e ferro, pode-se limpá-los por decapagem alcalina. Procura-se usar produtos alcalinos que conseguem solubilizar camadas de ferrugem de superfícies de aço, pois formam sais complexos de ferro solúveis.

### **3.1.4 Fosfatização**

A fosfatização permite a aplicação de camada de fosfato sobre variados materiais metálicos como ferro, zinco, alumínio, cádmio e magnésio. Esse tipo de revestimento tem especial importância que decorre não propriamente das suas propriedades intrínsecas, e sim de seus efeitos secundários. A camada fosfatizante apresenta qualidades fracas; entretanto, o seu uso proporciona a eficiência dos

outros meios de proteção pelo aumento de porosidade e da área específica da superfície tratada, que permite alguma penetração de tinta, criando uma unidade integrada metal base / depósito cristalino / revestimento orgânico. A aderência do filme aplicado é maior do que em uma superfície não tratada. (GENTIL, 2011).

O revestimento fosfático caracteriza-se, então, pela valorização dos outros meios de proteção. A película aplicada permite uma boa aderência da tinta aos substratos e melhora a resistência à corrosão fornecida pelos revestimentos.

Peters (2008) define a fosfatização como um processo em que se realiza o contato entre uma solução fosfatante e uma superfície metálica, de tal forma que os cristais possam aparecer e desenvolver-se em todos os pontos da referida superfície. Os produtos que constituem estes cristais provêm naturalmente não só do meio fosfatante (o banho), mas também do material metálico a tratar superficialmente. O banho de fosfatização não é mais que uma solução aquosa diluída, contendo elementos anódicos e catódicos, capazes de reagir com a superfície metálica, para provocar a formação de cristais sobre essa superfície.

Outros componentes dos banhos de fosfatização, conhecidos como “aceleradores”, atuam sobre a cinética da reação e permitem controlar as reações de redução e oxidação (redox) na interface (são, por exemplo, o cátion  $Zn^{2+}$  e o ânion  $H_2PO_4^-$ ).

Segundo Peters (2008 apud Ghali e Potvin 1982) são quatro os passos para a formação da camada de fosfatização. Em um primeiro passo ocorre o ataque eletroquímico da peça pelo meio ácido do banho. A reação de dissolução eletroquímica do metal e do óxido com o qual está coberto, em meio ácido, pode ser representada por:



e



Estas reações podem ser aceleradas e melhoradas através de ações mecânicas e eletrolíticas, que podem ocasionar também uma superfície ativa propícia à formação de óxidos. Para limitar este efeito, a combinação de

desoxidação e passivação são desejadas. Devido a estas propriedades de formação de filmes, os ácidos fosfóricos são os agentes anti-oxidantes mais indicados. O filme de passivação formado durante a fosfatização fornece uma proteção temporária contra a corrosão e prepara a superfície para uma camada orgânica. (EROL; THOMING, 2005 apud PETERS, 2008).

Para Peters (2008) no segundo passo ocorre a precipitação extremamente fina de cristais de fosfato; o ataque do metal modifica o equilíbrio do banho de fosfato de tal modo que origina a precipitação massiva de fosfatos. Durante esse período, quase todos os elementos necessários à formação de fosfatos estavam precipitados principalmente no estado amorfo. A reação de precipitação pode ser apresentada por:



Num terceiro passo, ocorre a cristalização tendo um aumento da quantidade dos principais constituinte da camada, que passa de fosfato amorfo para cristalinos. E, finalmente, no quarto passo, os fosfatos da camada precipitam rapidamente, resultando em uma reorganização cristalina, junto a um rápido decréscimo de porosidade. Estes mecanismos são realizados sobre o aço perfeitamente limpo em um banho de fosfato, o qual é usualmente constituído por ácido fosfórico, um fosfato primário e um acelerador, sendo muito importante a concentração de diferentes componentes do banho no tipo de película obtida. (BURNS; BRADLY, 1959 apud PETERS 2008).

As películas de “fosfatização ao ferro” possuem elevadas proporções de sais secundários férricos e ferrosos. Os sais secundários são hidratados e são mais solúveis que os terciários. Ocorre uma resistência à corrosão devido à menor solubilidade das películas de conversão nos meios agressivos. Por esse motivo consegue-se uma melhor resistência à corrosão devido à precipitação de sais levemente solúveis na superfície metálica. A transformação dos fosfatos se dá pelo balanço entre as velocidades de hidrólise e cristalização, sendo esta controlada por reações superficiais e a velocidade de formação dos cristais depende da velocidade de nucleação e de crescimento, ou seja, da transformação do germe em cristal.

Ao contrário da fosfatação ao ferro (dita amorfa), cuja reputação assenta nas boas propriedades de aderência que ela confere aos revestimentos orgânicos que sobre ela são aplicados, a fosfatação cristalina tem sido sinônimo de excelentes propriedades de resistência à corrosão. Foi a aparição das tintas para eletrodeposição, anaforese e posteriormente cataforese, que veio provocar a evolução dos banhos de fosfatização cristalina de modo a aumentar as propriedades de aderência dos revestimentos fosfáticos. (PETERS, 2008).

Para alcançar melhores resultados no revestimento por fosfatização e na resistência à corrosão, alguns aditivos e aceleradores (agentes refinadores, surfactantes, etc.) são incorporados às soluções, resultando em banhos de composições variadas. O tipo de acelerador a ser utilizado difere de acordo com a técnica de fosfatização aplicada, bem como com os processos de imersão e *spray*.

### **3.1.5 Enxágue pós-fosfato**

A lavagem pós-fosfato deve ser realizada com abundância de água limpa para diluir a concentração de sais na superfície e diminuir a temperatura (27°C a 30°C), com intuito de parar a reação. Os controles deste tipo de tanque se limitam ao pH e medição da acidez total.

### **3.1.6 Passivação**

É um tratamento pós-fosfatização cujo objetivo é selar as porosidades existentes (a camada de fosfato apresenta certo grau de porosidade independente do tipo de cristal), obter aparência desejada e a resistência à corrosão entre, outros. Consiste em se tratar a superfície após a fosfatização, com soluções de ácido crômico e fosfórico, em concentrações em torno 0,02% e temperaturas de 60°C. Sua ação se dá na redução da área livre dos poros e na passivação da superfície metálica, já que esse tratamento assegura o valor protetor da camada. (GENTIL, 2011).

### **3.1.7 Enxágue de água deionizada**

Com o objetivo de aumentar a resistência contra corrosão na camada de revestimento, a peça passa por um processo que se dá pela utilização de água deionizada para a lavagem final do produto tratado.

Em alguns casos principalmente quando a camada de tinta é muito fina e de cor clara, a coloração característica do cromato pode interferir, causando manchas. Usa-se então, um enxaguamento com água deionizada, no lugar da passivação, com o que se busca remover todo resquício de ácido ocluído nos poros da camada de fosfato e não deixar traços de substâncias solúveis. (GENTIL, 2011, p.257).

### **3.1.8 Secagem**

A secagem das peças é feita em uma estufa com temperatura em torno de 100°C. As peças passam por câmaras nas quais existe uma corrente de ar quente (sistema de convecção forçada). Devido aos sistemas de exaustores e ventiladores, toda a umidade da superfície que possa formar bolhas e prejudicar a pintura é eliminada.

As câmaras são equipadas em seu início e final com ventiladores que provocam um fluxo de ar descendente “cortinas de ar”, que tem a função de minimizar a fuga de ar de dentro da máquina para o ambiente.

#### 4 SISTEMA DE PRÉ-TRATAMENTO POR *SPRAY*

O sistema de circulação por *spray* é muito utilizado devido à sua elevada eficiência e operação contínua. O processo tem um sistema de circulação para cada etapa de limpeza, enxágue e passivação.

Normalmente 5, 6 ou 7 estágios de pré-tratamento são necessários quando se deseja uma pintura de altíssima qualidade. Cada parte do processo tem um reservatório que bombeia a solução química até os bicos, que formam o *spray* para limpar as peças.

As vantagens apresentadas são a facilidade de automatização, eficácia na limpeza, menor consumo de energia e maior fluxo de peças. Porém, apresenta maior custo de manutenção, dificuldade na limpeza de peças com geometria relativamente complexa.

A figura 2 que segue ilustra três tipos de sistema de *spray*. A distância entre os estágios deve-se em tempo do processo e da velocidade da monovia.

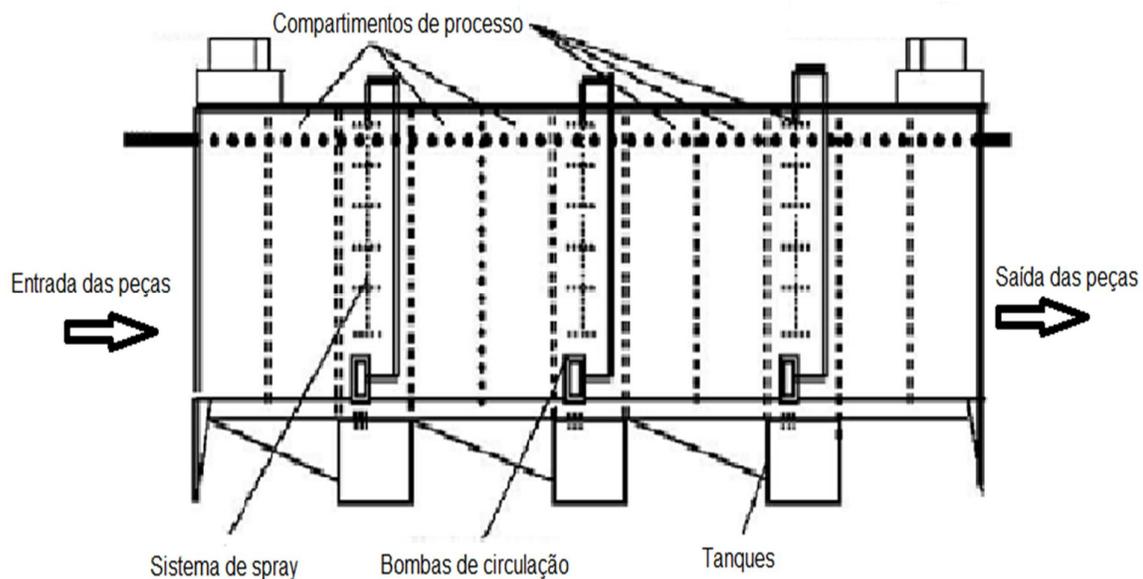


Figura 2 - sistema de pré-tratamento por *spray* em 3 estágios, ou 3 tanques com produtos diferentes. Fonte: SILVA (2009).

Nota: Adaptado pelo autor

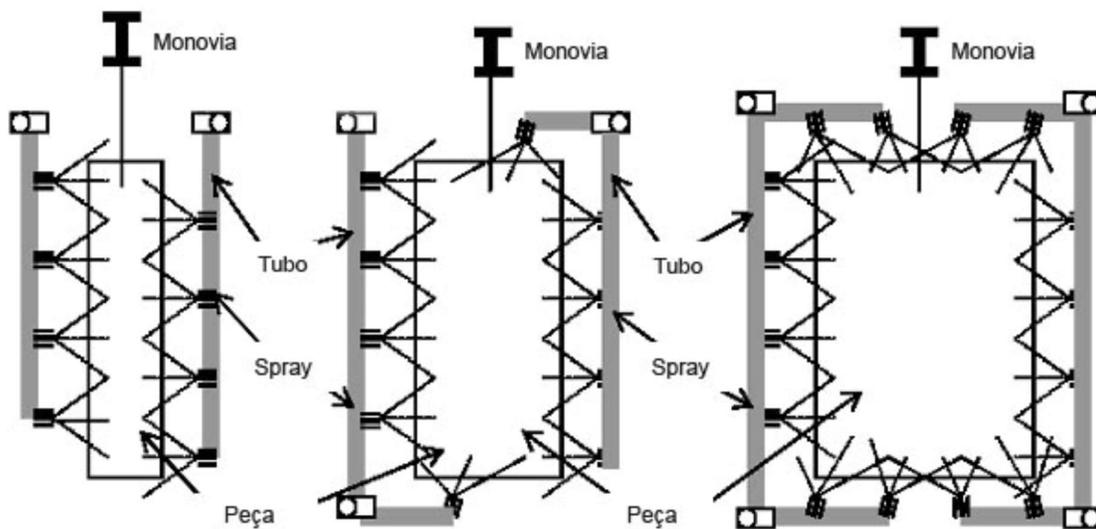


Figura 3 - exemplo de 3 sistemas de *spray*, com variação na quantidade de bicos e posicionamento.  
Fonte: SILVA (2009).

Deve-se observar na configuração do suporte de peças:

- A suspensão deve ser tal que as peças sejam fixadas corretamente e que também não possam se soltar durante o pré-tratamento;
- As peças devem estar suspensas de tal maneira que permitam um bom revestimento;
- Na cabine de pintura somente podem entrar peças completamente secas;
- Os ganchos não podem sofrer deformações, ter a menor superfície possível para que o mínimo de pó se deposite sobre elas;
- Ganchos universais evitam a confusão de suspensão;
- Se possível, deve-se evitar que superfícies grandes sejam suspensas com a face para cima (perigo de contaminação por causa de queda de partículas);

## 5 DEFEITOS OBSERVADOS NA SUPERFÍCIE

Embora não sejam considerados estritamente como contaminantes, os defeitos na superfície contribuem para o aparecimento de falhas no revestimento e precisam ser retificadas como parte do processo de preparação. Esses defeitos provavelmente ficarão expostos, quando eles tendem a se projetar acima da superfície. Nenhum sistema de revestimento pode os cobrir adequadamente ou os proteger. (FAZENDA, 2005).

### 5.1 RACHADURAS E FISSURAS PROFUNDAS

Esse tipo de defeito pode conter umidade que cria pontos de corrosão. Esses defeitos devem ser esmerilhados, a menos que sejam muito profundos, caso em que devem ser preenchidos com solda e depois suavizados por esmerilhamento. (NUNES; LOBO, 2007).

### 5.2 INCLUSÕES

Todas as inclusões nas superfícies das chapas de aço, tais como respingos de solda, inclusive as carepas de laminação não removidas na cabine de jateamento, devem ser removidas por raspagem ou esmerilhamento. (NUNES; LOBO, 2007).

### 5.3 BORDAS AFIADAS OU CANTOS VIVOS

As tintas convencionais, durante o processo de cura, tendem a escorrer das bordas afiadas ou “cantos vivos” originadas dos processos de corte das chapas, deixando um filme fino que se rompe com facilidade. Estas regiões de bordas por estarem com pouca tinta estarão mais susceptíveis à corrosão.

Por isso, todas as bordas afiadas devem ser evitadas (esmerilhadas), inclusive as bordas cortadas a maçarico.

Para peças mais grossas, recomenda-se que as bordas afiadas sejam suavizadas a um raio de 2-3 mm.

De acordo com a necessidade de cada cliente, as tintas podem ser melhoradas quanto à característica de melhor desempenho nas peças nos pontos de cantos vivo, evitando que ocorra o deslocamento da tinta e consequente exposição da peça que ficará sujeita a apresentar início de pontos de corrosão nestes locais.

Quando houver a necessidade, o cliente poderá solicitar a avaliação de melhoria do produto, o que poderá acarretar em aumento de custo. (NUNES; LOBO, 2007).

#### 5.4 POROSIDADES DA SOLDA - “MORDEDURA” DA SOLDA

Não é possível encobrir a porosidade da solda com a aplicação da tinta. Células de corrosão se formam nos defeitos levando à ruptura do revestimento. Os defeitos de porosidade devem ser preenchidos com solda e suavizados por esmerilhamento se necessário. Também conhecidas como “mordeduras” da solda podem ser difíceis de recobrir e podem levar ao aparecimento de falhas no revestimento. (NUNES; LOBO, 2007).

#### 5.5 CORDÕES DE SOLDA IRREGULARES

Os cordões de solda automáticos são geralmente lisos e não apresentam problemas de revestimento, mas as soldas manuais podem ter bordas afiadas ou irregulares que podem causar a ruptura do revestimento. As irregularidades devem ser desbastadas ou removidas por esmerilhamento. (NUNES; LOBO, 2007).

## 6 PROCESSO DE PINTURA ELETROSTÁTICA

### 6.1 CONTEXTO HISTÓRICO

As tintas em pó eletrostáticas surgiram nos Estados Unidos na década de 1950. Eram constituídas por uma mistura seca de resina epoxídica sólida, pigmentos e endurecedores. A sua aplicação se dava pelo processo de leito fluido. Como a tinta em pó apresentava características heterogêneas, havia uma separação dos componentes por tamanho e peso, o que causava grandes variações nos resultados do revestimento. As tintas em pó não eram adequadas para efeitos decorativos e passaram então, a ser utilizadas como isolantes elétricos ou revestimento anti corrosivos e sua espessura ultrapassava 200  $\mu\text{m}$ , obtendo um aspecto de má qualidade e pouco reprodutível.

Em 1964, foi introduzida a extrusora como máquina de produção contínua, que ainda hoje é responsável pela totalidade da produção de tintas em pó.

A aplicação por “revólver” eletrostático foi iniciada em 1962 pela Sames, empresa criada em 1947 para fabricar e comercializar geradores e componentes para pintura eletrostática. O contínuo aperfeiçoamento deste “revólver” resultou nos equipamentos que atualmente conhecemos: leves, facilmente operáveis, podendo ser automatizados.

Somente então a indústria aceitou a idéia da tinta em pó ser “economicamente viável”. (NUNES; LOBO, 2007).

Até meados da década de 70, os sistemas epóxi eram os predominantes e responsáveis por mais de 90% do total de tinta produzidos. Começaram a ser desenvolvidos outros sistemas de resinas: Poliéster, Híbrido (Epóxi / Poliéster) e Poliuretano.

Simultaneamente, foram iniciados desenvolvimentos objetivando aplicações e usos específicos que demandaram tecnologias também específicas, tais como, revestimentos em pó para oleodutos e revestimentos do tipo sanitários para aplicação em interiores de tambores destinados ao acondicionamento de sucos cítricos.

Constatou-se que os sistemas a base de resinas epóxi apresentavam calcinação e um amarelamento quando submetidos à ação da luz solar, características já conhecidas das tintas líquidas também a base de resinas epóxi.

Observou-se também que nos sistemas mistos constituídos por resinas de poliéster com combinação com resinas epoxídicas, esses problemas eram bastante minimizados.

Posteriormente, foi introduzida a tinta em pó do tipo poliéster pura, constituída por resinas poliéster saturada combinadas com um agente de reticulação adequado e que apresentava como característica fundamental um excelente comportamento sob a ação da luz solar, ou seja a calcinação e o amarelamento eram praticamente desprezíveis comparados aos outros sistemas a base de resinas epóxi e híbrida.

Em 1970, surgem na Alemanha as tintas a base de resinas acrílicas, que tiveram maior aceitação no Japão como revestimentos resistentes ao intemperismo. Na década de 80, as tintas Poliuretanas se estabelecem fortemente no mercado Norte Americano e Japonês, sendo menos utilizado na Europa, também como revestimento para uso externo.

A partir de então, os resultados foram surpreendendo, chegando aos produtos atuais, considerados altamente competitivos e de excepcional qualidade. (FAZENDA, 2005).

## 6.2 CLASSIFICAÇÕES DAS TINTAS

As primeiras tintas em pó eram do tipo termoplásticas, uma classe de tintas que não passa por nenhuma transformação química durante a secagem, fundem-se de acordo com a temperatura de exposição e se solidificam com o resfriamento, permanecendo com a mesma estrutura. As tintas em pó termoplásticas foram importante na década de 1950, devido à simplicidade de seu processo de produção, e ao fato de usarem produtos plásticos convencionais da época. Porém, devido a características insatisfatórias como baixas resistências a solventes, altas temperaturas de fusão e pequena aceitação de pigmentos, as tintas em pó termoplásticas foram substituídas por tintas em pó do tipo termoconvertíveis que constituem em uma classe mais importante e mais comum. Apresentam reações químicas irreversíveis durante a cura, transformando a estrutura de linear para

tridimensional, com alta resistência a solventes, excelente aderência e flexibilidade. (FAZENDA, 2005).

### 6.2.1 Tintas em pó termoplásticas baseadas em poliolefinas

Através de um sistema de catálise estérica específica baseada em catalisadores de compostos por coordenação, possibilitou-se a produção, em escala industrial, de poliolefinas com grande interesse prático. Esse sistema de catálise para obtenção de polipropileno, com predominância de determinada estrutura espacial, e de polietileno de baixa densidade, transformou-os nos dois materiais de maior interesse entre os plásticos.

Sua estrutura química, baseada na ligação carbono-carbono, oferece uma elevada resistência química, satisfatória resistência a solvente e excelentes propriedades mecânicas.

O polipropileno possui carbonos assimétricos e isomeria espacial de diferentes estruturas estéricas: Isotática, sindiotática e atática. As duas primeiras apresentam uma estrutura com alto grau de cristalinidade; a atática apresenta uma estrutura amorfa.

O polipropileno é mais quebradiço do que o polietileno; por essa razão, são comuns os copolímeros de propileno com pequena quantidade de etileno (2 a 3%), resultando em um polímero com uma flexibilidade superior, melhoria em sua dureza e resistência a impacto comparado ao polipropileno homopolimérico.

Devido à excelente resistência química dessas poliolefinas seu uso é adequado para tintas em pó indicadas para revestimentos de contêineres, oleodutos e tubulações de produtos químicos em geral. A inércia química faz com que o polipropileno e o polietileno apresentem uma deficiência a adesão a substratos; por esse motivo se faz necessário a aplicação de um *primer* adequado, com tintas epóxi, a fim de conseguir uma adesão satisfatória.

Uma tinta em pó excelente para substratos metálicos, aplicável em uma única etapa, é formado pela mistura de zinco em pó, tinta em epóxi termoconvertível e tinta em pó baseada em polietileno. A cura é efetuada em duas etapas, sendo a primeira de 3 minutos a 150°C, seguida da segunda a 215°C durante 10 minutos.

O substrato fica protegido por um sistema de três camadas aplicado de uma só vez:

1ª camada: Zinco metálico sobre a superfície metálica atuando como um *primer* rico em zinco.

2ª camada: Revestimento epóxi termoconvertido sobre a camada de zinco.

3ª camada: Polietileno sobre o revestimento epóxi.

Esse tipo de revestimento é indicado para proteção de substrato sujeito a condições severas. (FAZENDA, 2005).

### 6.2.2 Tintas em pó termoplásticas vinílicas

Os polímeros mais comuns na obtenção dessa tinta são o poli cloreto de vinílica – (PVC) e o poli fluoreto de vinilidena – (PVDF). São indicadas para revestimento de superfícies ou objetos protegidos do intemperismo.

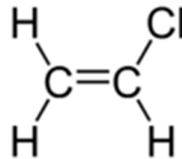


Figura 4-Cloreto de vinílica  
Fonte: Fazenda (2005).

O PVC, por ser quebradiço, necessita ser plastificado e, dependendo da finalidade da tinta podem ser usados ftalato 2-etil-hexila (DOP), ésteres do ácido fosfórico ou plastificantes poliméricos para este fim.

A degradação térmica do PVC é uma característica negativa, por isso, deve ser minimizada através do uso de estabilizadores como estearatos metálicos. (SHREVE; BRINK, 1997).

As tintas em pó baseadas em PVC, quando aplicadas pelo processo de “leito fluidizado” oferecem uma espessura variando entre 200 a 400 µm, e são usadas para revestimentos de fios eletrocondutores e revestimentos isolantes. A aplicação por revólver eletrostático permite a obtenção de camadas mais finas. Estas tintas são muito usadas nos revestimentos de máquinas de lavar roupa e de lavar pratos, que entram em contato com detergentes e água.

Os revestimentos obtidos com a tinta em pó baseada em poli fluoreto de vinilidena – (PVDF) apresentam excelentes resistências ao intemperismo, apresentam boas propriedades mecânicas com destaque ao impacto, bom comportamento frente a abrasão, flexibilidade e dureza satisfatória. Apresentam uma boa resistência a agentes químicos e são insolúveis na maioria dos solventes.

As tintas em pó baseadas em PVDF são indicadas para superfícies que tenham contato com alimentos, pois apresentam satisfatórias propriedades sanitárias. Possuem um baixo coeficiente de atrito e ótima resistência a água e óleos vegetais, não calcinam e nem retêm sujeiras.

Os revestimentos obtidos por tintas em pó baseadas na mistura de poli fluoreto de vinilidena com resinas acrílicas garantem um período de proteção por até 10 anos. (FAZENDA, 2005).

### **6.2.3 Tintas em pó termoplásticas baseadas em nylon**

Em 1982, Carothers desenvolveu nos laboratórios da Du Pont, uma nova classe de polímeros que determinou como *nylon*, obtido através da condensação de diácidos orgânicos ou da autocondensação de aminoácidos.

A excelência obtida nos resultados desse material induziu à pesquisa de outros polímeros similares e de diversas aplicações, que resultou no desenvolvimento de uma grande família de poliamidas que são usadas como adesivos, filmes, tintas e etc.

Os revestimentos obtidos nas aplicações de tintas em pó baseada em nylon apresentam, de um modo geral, propriedades satisfatórias com os seguintes destaques:

- Excelente resistência ao impacto;
- Baixo coeficiente de fricção;
- Excelente isolante térmico;
- Satisfatória resistência a solvente;
- Estabilidade em meio alcalino, apresentando, porém uma baixa estabilidade ao meio ácido;
- Apresentam uma boa resistência ao ataque de fungos e bactérias.

Quando aplicadas pelo processo de “leito fluidizado”, apresentam uma espessura de 200 a 700  $\mu\text{m}$ . A temperatura de fusão para a geração de película varia de 200 a 230°C. A aplicação com revólver eletrostático proporciona uma camada com espessura menor. (FAZENDA, 2005).

### 6.3 TINTAS EM PÓ TERMOCONVERTÍVEIS

Constituem a classe mais importante e o tipo mais comum de tintas. Caracterizam-se pela ocorrência de reações químicas durante o processo de cura que transformam o sistema de estrutura linear em um sistema de estrutura tridimensional, com alta resistência a solvente e a agentes químicos e excelente aderência.

Sua temperatura de cura varia entre 180°C a 210°C.

Cada um destes tipos apresentam diferentes processos de cura devido à possibilidade de uso de diferentes agentes de curas ou endurecedores. (FAZENDA, 2005).

#### 6.3.1 Tintas em pó epoxídica

As resinas epoxídicas são caracterizadas pelos grupos epóxi, localizados nos terminais da molécula linear. Estas estruturas possuem grupos hidroxilas, permitindo grande densidade de ligações reticulares quando da sua cura, obtendo-se um resultando com excelente aderência, dureza e resistência química.

A estrutura química baseada na resina epoxídica apresenta ligações “éter” e “metilênicas” de alta polaridade, o que proporciona aos revestimentos boa resistência química e boa adesão. Devido à presença de núcleos aromáticos, é responsável pela calcinação e fraca estabilidade foto e termoquímica.

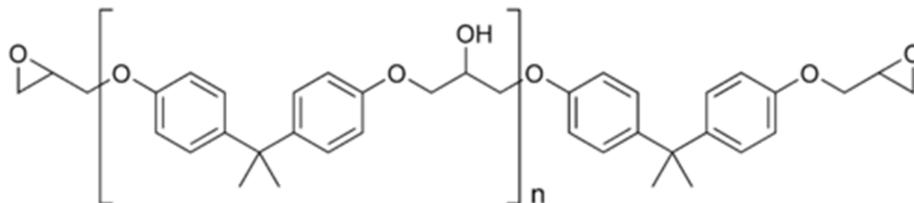


Figura 5 - Estrutura química do polímero Epóxi  
Fonte: Shreve e Brink (1997).

Os agentes de cura usados na tinta em pó epoxídica, dividem-se em:

- a) Catalisadores da homopolimerização da resina através da ação catalítica sobre os grupos funcionais;
- b) Agentes de cura polifuncionais que reagem com a resina epoxídica e, por isso, fazem parte de um filme curado;

Os agentes de cura devem ser escolhidos cuidadosamente, de modo a apresentarem as seguintes propriedades:

- Compatibilidade com a resina epoxídica;
- Não devem ser reativos à temperatura ambiente;
- Não devem ser tóxicos ou originar nenhum produto tóxico;
- Devem ser sólidos em temperatura ambiente e terem granulometria fina e uniforme;
- Não devem interferir nas propriedades do sistema, como brilho, cor, nivelamento, etc;

Essas considerações são válidas para agentes de cura usados em sistemas em pó.

A escolha adequada dos agentes de cura permite controlar as seguintes variáveis:

- Velocidade de cura em diferentes temperaturas;
- Custo;
- Resistência química;
- Propriedades mecânicas do revestimento;
- Comportamento ao sobreforneio (superaquecimento);
- Retenção de cor;

Agentes de cura mais comuns são:

- a) Aminas alifáticas e aromáticas:

Todas as aminas alifáticas primárias são adequadas como agentes de cura para tintas em pó epoxídicas. Apresentam reatividades a um nível que não prejudica a estabilidade na estocagem e ao mesmo tempo apresentam cura satisfatória. São

agentes de cura altamente reativos, possibilitando a cura de sistemas epóxi a 180°C durante cinco minutos, resultando em revestimentos com excelentes propriedades.

Compostos baseados em amidinas cíclicas:

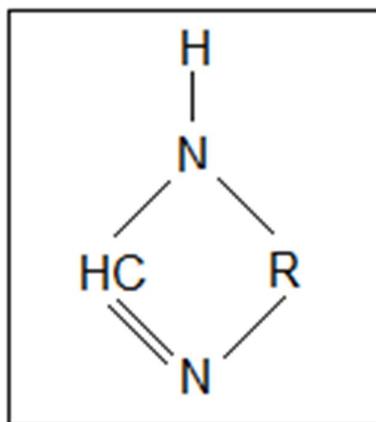


Figura 6 -Amidinas cíclicas  
Fonte: Souto e Duarte (2006).

#### b) Diciandiamidas

São usadas em quantidades aproximadas de 4,5% sobre o total de resina epoxídica, resultando em uma excelente estabilidade. Entretanto apresentam baixa reatividade durante a cura, necessitando de condições energéticas que variam de 30 minutos a 180 °C até 20 minutos a 200 °C. Esse comportamento pode ser explicado pela pouca compatibilidade com a resina e pelo seu alto ponto de fusão: 215°C. (FAZENDA 2005).

Um dos compostos usados é o 1- cianoguanidina representada na figura a seguir:

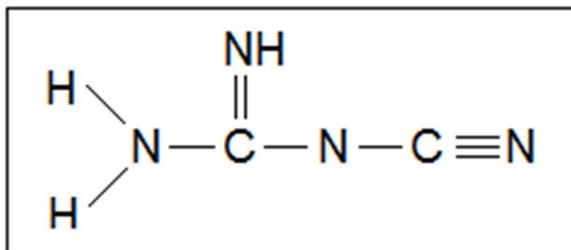


Figura 7 - 1-cianoguanidina  
Fonte: Souto e Duarte (2006).

### 6.3.2 Tinta em pó poliéster

As resinas básicas são poliésteres saturados que são obtidos por meio da poliesterificação de poliácidos ou seus anidridos com poliálcoois: os diácidos e os glicóis são os mais comuns.

A estereficação é uma reação de equilíbrio apresentada abaixo:



As tintas em pó a base de poliéster podem ser classificadas em diferentes tipos:

- Híbridas: a cura é obtida através de reações de poliéster com resina epóxi. Resulta em um revestimento com excelente resistência química, são relativamente deficientes quanto ao intemperismo e ao amarelecimento.
- Poliéster puro: a cura é feita com triglicidil-isocianurato (TGIC), um composto químico que tem três grupos glicidila na sua molécula. Apresentam comportamento superior ao intemperismo, praticamente não ocorre o amarelecimento em condições normais e no subforneio, e apresentam resistência química inferior quando comparados às híbridas e poluretânicas.
- Poliuretânicas: a reticulação é feita através do poliéster com um poliisocianato bloqueado.

As tintas resultantes são vulneráveis ao amarelecimento, com boa resistência química, estabilidade à luz e resistência ao intemperismo. (FAZENDA, 2005).

## 6.4 APLICAÇÕES DAS TINTAS EM PÓ

Os processos para aplicação da tinta em pó podem ser da seguinte forma:

### 6.4.1 Leito fluido eletrostático

Esse processo se aplica a tintas em pó termoconvertíveis. Através deste método, é possível pintar peças com formas geométricas complexas, obtendo um bom controle na camada e resultando em uma boa uniformidade.

O objeto a ser pintado é ligado à terra, e as partículas fluidificadas, carregadas eletrostaticamente por um gerador adequado, são atraídas por ele. (SHREVE; BRINK, 1997). A figura a seguir ilustra um processo de leito fluidizado.

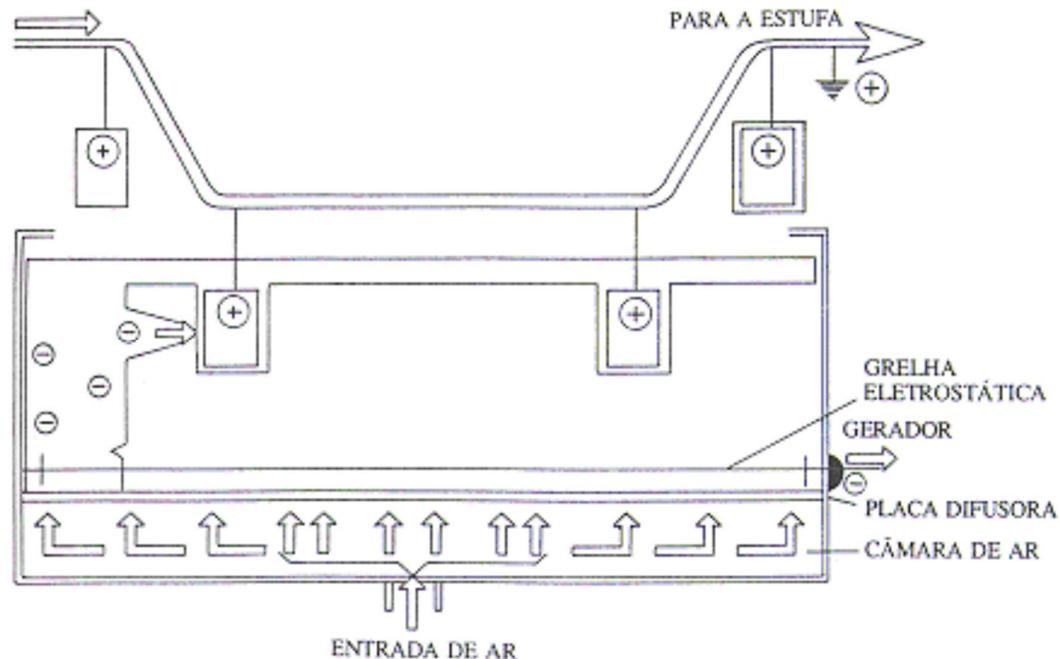


Figura 8 - Funcionamento do leito Fluido eletrostático

Fonte: Fazenda (2005).

#### 6.4.2 Pulverização eletrostática

A pulverização eletrostática foi uma das responsáveis pelo rápido e grande desenvolvimento das tintas em pó termoconvertíveis. A aplicação prática usando cargas eletrostáticas originou o desenvolvimento de uma série de pistolas eletrostáticas.

A pulverização eletrostática dos pós depende de propriedades como tamanho e forma das partículas, resistividades das superfícies, composição química, e outras.

A eficiência da deposição sobre o objeto depende da carga eletrostática adquirida pelas partículas, da velocidade da corrente de ar, da distância que as partículas têm de percorrer, do tamanho e da forma do objeto a ser pintado e da espessura de resistividade da superfície. (TIPLER; MOSCA, 2011).

Alguns fatores são importantes na deposição eletrostática de pós como:

- Partículas esféricas aderem mais rápido do que as com formas irregulares;
- Partículas maiores depositam-se mais rápido na superfície a ser pintada do que as menores, devido a uma eletrização mais eficiente;
- As tintas em pó têm alta resistividade e apresentam um fenômeno de autolimitação, ou seja, uma espessura máxima que se obtém durante a aplicação acima da qual não há deposição eletrostática de novas partículas. Essa espessura normalmente é superior às comercialmente requeridas. (FAZENDA, 2005).

#### **6.4.3 Carga elétrica de pós**

A deposição de tintas em pó em uma superfície metálica é explicada pelo seguinte fenômeno:

Quando uma tinta em pó é submetida à influência de um campo elétrico, todas as suas partículas ficam carregadas eletricamente devido à perda ou ganho de elétrons ou íons; elas tornam-se polarizadas devido à formação de dipolos resultantes da orientação das moléculas que as constituem. (FAZENDA, 2005, p.912).

Para carregar eletrostaticamente as tintas em pó são usados dois processos: Efeito Corona e processo Tribo.

#### **6.4.4 Pulverização eletrostática de efeito corona**

O efeito corona ocorre devido a um potencial elétrico de 20 a 10 KV (quilo volts) nos eletrodos existentes no bico do revólver: as partículas em pó são submetidas a esse campo, adquirindo então a carga elétrica. Nesse processo, o potencial nos eletrodos dos revólveres é garantido por um gerador elétrico adequado que pode suprir 20KV e correntes elétricas baixas, no máximo de 100 mA.

A polaridade nos eletrodos do revólver pode ser positiva ou negativa e a superfície a ser pintada deverá ter uma polaridade contrária; então, as partículas

com sinais opostos se atraem por forças que tendem a aproximá-las. Os geradores elétricos usados para alimentar o sistema de pintura possibilitam tanto a polaridade positiva como a negativa. (HALLIDAY; RESNIC; WALKER, 2010).

Portanto, as partículas carregadas são atraídas pelo objeto a ser pintado em uma velocidade e eficiência que dependem do campo elétrico e de outras variáveis.

Para garantir que quase toda tinta seja aplicada no objeto a ser pintado, é necessário ter uma distância adequada. É necessário ter um campo elétrico de no mínimo 2.000 V/cm entre o revólver e o objeto a ser pintado, e uma distância usual de 25 cm entre os dois pontos, a uma diferença de potencial de pelo menos 50 KV.

A corrente de ar, usada para transportar o pó do alimentador até o bico do revólver, é importante para determinar a eficiência da deposição de tinta. A força da gravidade só é relevante em partículas acima de 100 micrômetros.

A camada de pó depositada no objeto que está sendo pintado coesa e aderida à sua superfície, deve-se a forças eletrostáticas e de Van de Waals, o período de tempo que permanece dessa forma é função da carga elétrica inicial, resistividade da tinta, além de outros fatores.

A maioria das tintas em pó possui uma elevada resistividade. Assim o tempo para estas tintas perderem metade da carga elétrica inicial é de aproximadamente três minutos, tempo suficiente para entrarem em processo de cura nas estufas sem que haja perda de material eletrodepositado.

Tintas que não foram aderidas na peça, geralmente em pequenas quantidades, são recuperadas por um sistema chamado de *over-spray*, que consiste em um mecanismo que leva a tinta, misturando-a no alimentador com o pó novo. (FAZENDA, 2005). A figura a seguir ilustra um sistema de pulverização eletrostática de efeito corona.

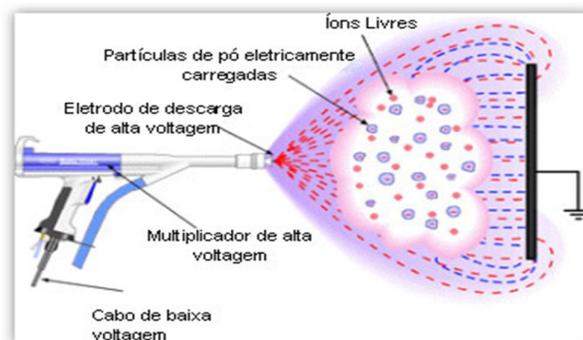


Figura 9 - Revólver, com efeito, corona

Fonte: Isolucks (2011).

#### 6.4.5 Pulverização eletrostática por fricção ou tribo

Neste processo, as partículas de tinta adquirem cargas elétricas quando são friccionadas em uma superfície; o princípio é explicado pelo fenômeno físico que ocorre quando dois materiais são friccionados um contra o outro e, a seguir, são separados, tornando-se eletrizados com cargas elétricas opostas. (SERWAR; JEWETT, 2009).

O processo ocorre na parte interna do revólver, em que há uma superfície na qual as partículas de pó são friccionadas. Esta superfície é, na maioria das vezes, confeccionada de PTFE (teflon) material que reúne uma série de vantagens para tal finalidade, como ser isolante elétrico, ter superfície lisa com pouco atrito dificultando assim aderência do pó na superfície. As partículas em pó passam em alta velocidade, para que possam adquirir cargas elétricas através da fricção na superfície.

A tinta em pó é levada por uma corrente de ar passando pelo revólver em um movimento turbilhonar para que a maioria das partículas adquiram cargas elétricas através da fricção com a superfície de “teflon”, procedimento que faz com que as partículas sejam carregadas positivamente, pois perdem elétrons para a superfície de PTFE.

As partículas em pó carregadas eletricamente são conduzidas em direção à peça a ser pintada que está ligada à terra. Entre o revólver e a peça ocorre uma diferença de potencial, porém de menor intensidade do que a formada no processo corona. (TIPLER; MOSCA, 2011).

Comparando esse processo com o Corona existem algumas vantagens como:

- Não há necessidade de uma fonte de alta voltagem;
- Devido ao campo elétrico de baixa intensidade, não há formação do efeito da “gaiola de Faraday”. Significa que em peças com cavidades ou cantos, há uma facilidade de aderência pois a tinta é impelida pela corrente de ar e não pelo campo elétrico existente entre a peça e o revólver. Com isso obtêm-se uma camada mais uniforme devido ao fato de não existirem linhas de forças que direcionam as partículas em pó para determinadas partes da superfície a ser pintada.

As principais desvantagens são:

- A eficiência do processo diminui com o tempo de operação de pintura; por melhor que seja a superfície interna do revolver, ocorre a deposição de partículas de pó na superfície da pistola, sendo necessária a sua limpeza para que o processo de pintura seja reiniciado;
- O processo de pintura “Tribo” não é indicado para superfícies grandes, em velocidade de fluxo adequada, pois a vazão da tinta é menor do que o processo “Corona”. O tempo de residência do pó no revólver “tribo” tende a ser maior do que no revólver “Corona” por apresentar uma eletrização com melhor eficiência;
- Para que a eletrização da tinta seja eficiente é necessário escolher o tipo de tinta mais adequada, pois este fator pode dificultar a sua aplicação. Este processo é indicado para tintas baseadas em poliéster-TGIC por apresentarem uma alta resistividade.

Atualmente têm sido desenvolvidos novos tipos de tintas com o objetivo de aumentar as opções para aplicação do método de “tribo”. (FAZENDA, 2005).

As figuras a seguir mostra o sistema de pintura por fricção ou triboelétrico:



Figura 10 - Sistema de Pulverização por fricção  
Fonte: : Isolucks (2011).

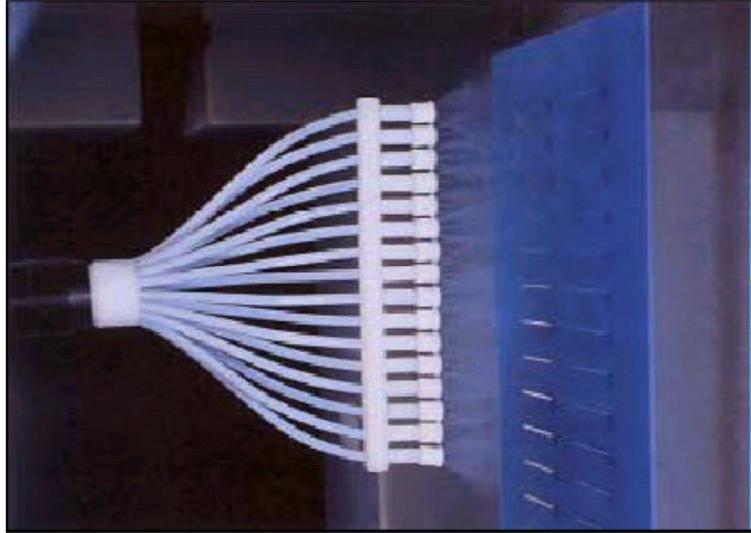


Figura 11 - Aplicação da tinta em pó pelo processo tribo-elétrico  
Fonte: Silva (2009).

## 7 CABINES DE PINTURA

As cabines de pintura para tinta em pó podem ser automáticas ou manuais, sendo feitas, normalmente, de chapas de aço carbono ou aço inox, formando um conjunto compacto e auto-sustentável.

Na versão "automática com ciclone", após a aplicação, a tinta em pó pulverizada é retirada da cabine pelo sistema tipo ciclone intermediário, sendo armazenadas pelo sistema de coleta de pó em caixas e reaproveitadas. Esta cabine permite a troca rápida de cor, substituindo apenas a mangueira de sucção da caixa coletora de pó.

Quando confeccionadas com filtros tipo cartucho cilíndrico, em poliéster laváveis, são limpos automaticamente por jatos de ar comprimido. Tanto o corpo da cabine quanto o sistema de ciclone e coleta de pó podem se movimentar por meio de rodízios deslizantes, sendo também possível a inserção de sistemas de pinturas com osciladores para pistolas automáticas.

As tintas em pó aplicadas, que não foram depositadas nas peças, são direcionadas para recuperação através do sistema de coleta de pó com peneiramento automático e leito fluidizado, para posterior reaproveitamento da tinta.

A cabine é interligada com o sistema de pulmão de ar comprimido necessário para bombeamento e transferência do pó e filtragem com purga automática.

Outra versão é a "automática flexível", com portas independentes laterais com aberturas totais, facilitando a passagem de peças, independente do comprimento delas, adaptando-se tanto para linhas contínuas quanto estacionárias.

Todo o comando e controle elétrico é realizado manualmente através de chave de partida direta, ou automaticamente por um dispositivo de CLP (controlador lógico programável). (NUNES; LOBO, 2007).

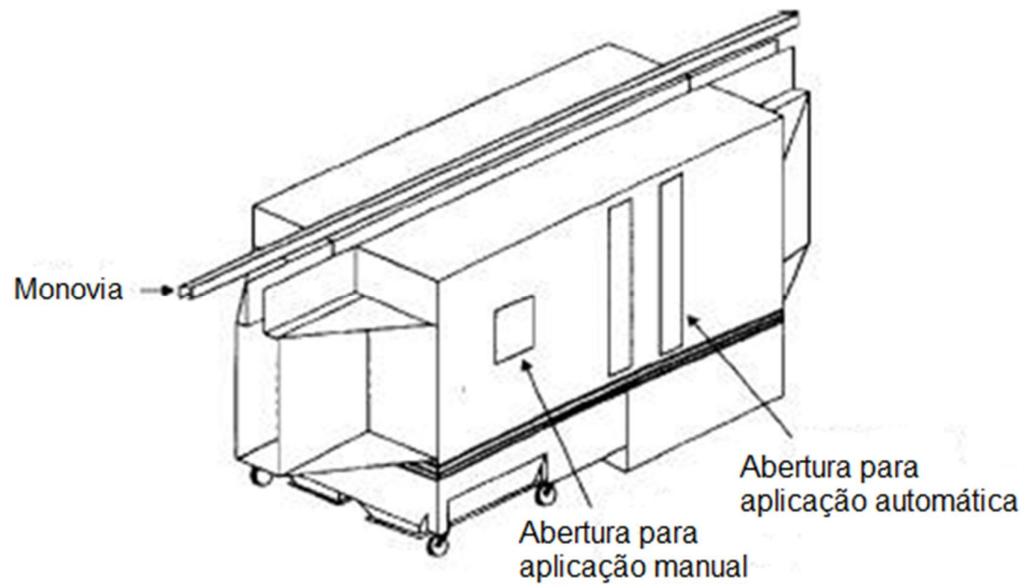


Figura 12 - Cabine de pintura de um sistema contínuo  
Fonte: Silva (2009).



Figura 13 - Cabine de pintura de um sistema contínuo  
Fonte: Silva (2009).

## 8 CURA DAS TINTAS EM PÓ

Após a aplicação, independente do método utilizado, a tinta deve ser curada para atingir as melhores características físicas e químicas.

As peças que receberam a tinta em pó saem da cabine de aplicação direto para a estufa de polimerização.

Sugere-se que a cabine de aplicação se localize o mais próximo possível da estufa, evitando assim problemas de contaminação das peças pintadas.

As principais funções de uma estufa são:

- Realizar a fusão das resinas da tinta;
- Realizar a polimerização do sistema.

Para isto, é necessário que a temperatura da estufa seja regulada a fim de proporcionar uma curva que se adapte à massa das peças e a velocidade do transportador, no caso de sistema contínuo.

Falhas de temperatura podem ocasionar falta de alastramento, falta de aderência, diferença no brilho, além de outros problemas. (TIPLER; MOSCA, 2011).

As estufas são classificadas em função de seu sistema de aquecimento:

- Radiação (infravermelho)
- Convecção (por circulação forçada de ar quente)

O sistema de convecção é o mais utilizado, porém existe uma tendência que incrementa o uso da radiação, que apresenta algumas vantagens.

Para estufas com circulação forçada de ar é necessária uma velocidade bem controlada de ar, para evitar um arraste do pó na primeira parte da cabine e possível contaminação da estufa, além de prejudicar o acabamento da peça pintada.

A fonte geradora de calor, para se obter o ar quente, normalmente depende da localização, da instalação e da influência nos custos. Os mais utilizados são: gás (GLP e natural), óleo (diesel, térmico) e eletricidade. (FAZENDA, 2005).

## 8.1 ESTUFAS POR IRRADIAÇÃO

Na cura por infravermelho a energia da radiação emitida é a responsável pela cura da tinta.

Parte da energia emitida é refletida pela superfície, outra é absorvida pelo polímero e outra parte transmitida para o substrato.

Devido à concentração de energia, o aquecimento é muito rápido e o tempo de polimerização do filme de tinta é muito breve.

Há casos em que a cura por infravermelho é melhor que a cura por convecção, por exemplo, em chapas muito grossas e pesadas. Em caso de diferentes peças com espessura e peso diferentes, se faz necessário o ajuste constante da intensidade de radiação sobre a peça.

O uso na indústria é devido às seguintes razões:

- Rápida transferência de calor; Pode ser utilizada como parte inicial da estufa contínua a gás para acelerar o aquecimento;
- Simples controle de temperatura;
- Ideal para automatização;
- Diminui o tempo de resfriamento em peças de massa elevada (grossas);
- Livre contaminação de produtos de combustão;
- Equipamentos compactos, economizando espaços.

Desvantagens a serem consideradas

- Alto custo de instalação;
- Consumo de energia;
- Formato das peças (aplicável mais a peças planas). (SILVA, 2009).

## 8.2 ESTUFAS POR CONVECÇÃO

Na estufa por convecção, geralmente é utilizado o gás como fonte de calor. Com auxílio da ventilação, toda a estufa é aquecida por igual, o que mantém a temperatura homogênea durante o ciclo completo de cura.

É importante manter a ventilação interna da estufa bem controlada, pois se a velocidade do ar estiver muito alta poderá espalhar o pó pela estufa ou para outras peças, comprometendo assim todo o trabalho realizado até o momento.

O tempo de cura varia de um tipo de tinta para outro, sendo o ciclo mais comum de 10 minutos a 200°C (a peça atingindo 200°C).

Atualmente, existem tecnologias que permitem a formulação de produtos que são curados em menor temperatura, chamados “tinta baixa cura”.

Para estufas estacionárias e contínuas, o tempo de cura deve ser contado a partir do momento em que as peças frias atinjam a temperatura especificada (200°C). O tempo deve ser regulado de modo que as peças permaneçam por tempo suficiente na temperatura de cura do produto. (SILVA, 2009).

## 8.3 ESTUFAS ESTACIONÁRIAS

Geralmente são fabricadas em chapas de aço galvanizado, formando um conjunto monobloco com isolamento de alta eficiência, obtendo-se retenção do calor gerado e redução da troca térmica com o ambiente. A estufa estacionária pode usar sistemas de aquecimento elétrico, a gás GLP (gás liquefeito de petróleo) ou GN (gás natural) com trocador de calor. A circulação do ar é forçada, deixando a temperatura interna homogênea

As peças aplicadas são colocadas em carrinhos transportadores e direcionadas para o interior da estufa, somente após se atingir a temperatura determinada. As peças são mantidas na estufa por um período suficiente para que a temperatura efetue o processo de cura da tinta no objeto. (SILVA, 2009).

## 8.4 ESTUFAS CONTÍNUAS

Normalmente são feitas de chapas de aço galvanizadas. Apresentam sua estrutura interna em perfis e painéis modulares com isolamento térmico muito

eficiente, permitindo a retenção do calor gerado e redução na troca térmica com o ambiente.

É composta por sistemas de distribuição de ar forçado (convecção forçada) e por cortinas de ar na entrada e saída da estufa, assegurando uma excelente homogeneidade da temperatura interna da estufa, que pode ser fornecida por sistemas de aquecimento direto ou indireto através de gás GLP (gás liquefeito de petróleo) ou GN (gás natural), eletricidade ou óleo diesel.

Quando as peças entram na estufa pelo transportador, é necessário um controle rigoroso da velocidade do mesmo, de modo que as peças permaneçam na estufa por um período suficiente para cura da tinta. (SILVA, 2009).

## 9 CONCLUSÃO

Conforme o estudo realizado, concluiu-se que a eficiência do processo de pintura eletrostática em pó está diretamente ligada a uma boa qualidade durante todas as etapas compreendidas no processo, que ocorrem desde o pré-tratamento até a fase de cura das tintas

A escolha do método utilizado deve ser previamente analisada para determinar maior eficácia no processo, dependendo, principalmente, do tipo de peça e material que a compõe.

Comparando os métodos de aplicação, o efeito corona é indicado para peças que possuem grandes superfícies por apresentar maior vazão e melhor eficiência; já nas superfícies que possuem cavidades é indicado o tipo de pintura de efeito tribo elétrico, pois no tipo corona existe a possibilidade do efeito da gaiola de Faraday o que impede a uniformidade na deposição de tintas em sua superfície.

Esse tipo de pintura vem adquirindo importância no mercado, pois garante uma boa qualidade no produto final, com excelente resistência ao intemperismo e corrosão e também apresenta uma boa aparência estética.

Aspectos tecnológicos também podem ser aplicados possibilitando a automatização do processo, o que assegura sua praticidade sem necessidade de mão de obra especializada. Outra vantagem que deve ser levada em consideração é que o processo tem altos rendimentos, em torno de 98% de aproveitamento e a técnica causa baixos impactos ambientais.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE TINTAS. Números do setor de tintas no Brasil. **ABRAFATI**, [2011?]. Disponível em:<<http://www.abrafati.com.br>>. Acesso em: 2 nov.2012.

FAZENDA, Jorge M. R. **Tinta e vernizes ciência e tecnologia**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, ABRAFATI, 2005.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6.ed. Rio de Janeiro:LTC, 2011.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos da física: eletromagnetismo**. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. v.3.

ISOLUCKS do Brasil. Tintas eletrostáticas em pó. Tinta em pó.20011. Disponível em: <[http://www.isolucks.com.br/novo/index.php?option=com\\_content&view=article&id=51&Itemid=59](http://www.isolucks.com.br/novo/index.php?option=com_content&view=article&id=51&Itemid=59)>. Acesso em 10/12/2012.

NUNES, Laerce P.; LOBO, Alfredo C. O. **Pintura industrial na proteção anticorrosiva**. 3. ed. Rio de Janeiro:Petrobrás, 2007.

PETERS, Patrícia. **Minimização do efluente gerado em pré-tratamento de pintura automotiva: um caso industrial**. 2008.211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em:<[http://www.pgmecc.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao\\_097\\_patricia\\_tetto\\_de\\_bem.pdf](http://www.pgmecc.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao_097_patricia_tetto_de_bem.pdf)>. Acesso em 05 out.2012.

SERWAY, Raymond A.; JEWETT, John J. R. W. **Princípios de Física: eletromagnetismo**. 3 ed. São Paulo:CengageLearnig, 2009.

SHREVE, R.Norris; BRINK JR, Joseph A: **Indústrias de processos químicos**. 4. ed. Rio de Janeiro. Guanabara Koogan, 1997.

SILVA, Silvio Domingues da.**Apostila para curso de pintura industrial em pó DT-13**.Guaramirim: Weg Indústrias, 2009. 91 f. Apostila. Disponível em:<[Http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-pintura-industrial-em-po-manual-portugues-br.pdf](http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-pintura-industrial-em-po-manual-portugues-br.pdf)>. Acesso em 07 out.2012

SOUTO, Carlos R.O; DUARTE, Humberto C. **Química da vida**. Natal: EDUFRN, 2006.

TIPLER, Paula. A; MOSCA, Gene. **Física para cientista e engenheiros: volume 2: eletricidade e magnetismo**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.