

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE APLICAÇÃO ELETROSTÁTICA NA COR DE UMA TINTA AUTOMOTIVA

PIMENTA, Mônica dos Santos Silva; OLIVEIRA, Marcos Fernandes
monica.polimeros@gmail.com; marcosfernandes3003@gmail.com
Centro de Pós-Graduação Oswaldo Cruz

Resumo: *Com o avanço da tecnologia e aumento da concorrência no mercado de tintas automotivas, a exigência na qualidade das aplicações dos produtos vem sendo cada vez mais requeridas nas linhas de pintura de grandes montadoras.*

Atender à necessidade dos clientes, com aspectos inovadores, superfície com características, que tornem o seu produto final diferente da concorrência tais como: superfície plana (sem defeito), com bom aspecto e cor é o desejo de todos os fabricantes de tintas.

O intuito desse artigo é mostrar como utilizar os parâmetros matemáticos para equalizar um processo de pintura eletrostática, para uma tecnologia de tinta automotiva, de forma a obter-se uma melhor qualidade no acabamento, produtividade, rendimento e segurança.

Palavras Chave: *Tecnologia de tinta. Pintura eletrostática. Modelagem matemática.*

Abstract: *With the advancement of technology and increased competition in the automotive coating market, the demand for product application quality is increasingly being demanded in the painting lines of major automakers.*

Meet the needs of customers, with innovative aspects, surface with characteristics, which make your final product different from the competition such as: flat surface (without defect), with good appearance and color is the wish of all coating manufacturers.

The purpose of this paper is to show how to use the mathematical parameters to equalize an electrostatic spray process for an automotive coating technology, in order to obtain better finishing quality, productivity, yield and safety.

Keywords: *Coating Technology. Electrostatic painting. Mathematical modeling.*

1 INTRODUÇÃO

A aplicação eletrostática como proteção contra corrosão dos metais tem sido empregada muito frequentemente utilizando-se revestimentos orgânicos ou inorgânicos para melhorar a durabilidade de componentes ou equipamentos. De aplicação ampla são os revestimentos orgânicos, como tintas e vernizes, frequentemente em combinação com revestimentos inorgânicos, como fosfatos, cromatos ou óxidos. Uma variedade de processos de revestimento está disponível, por exemplo, pintura, escovação, imersão,

pulverização com ar comprimido e o processo de revestimento em pó. Dentro deste os métodos eletrostáticos, pode-se iniciar falando da eletroforese (ED), a primeira camada de tinta propriamente dita, aplicada sobre o carro. Sua função é colaborar na resistência a corrosão e ajudar na aderência das demais camadas de tinta, principalmente o chamado *primer surface*. Este último, por sua vez, servirá de base de ancoragem para o *base coat (metallic base)* e o *verniz (clear coat)*, também aplicados por sistema eletrostático. Na Figura 1, pode-se ter uma visão representativa destas camadas, que compõe uma pintura automotiva original, bem como o papel de cada uma para o bom desempenho do conjunto. Este tipo de pintura, aplicada na montadora durante a confecção do carro, é conhecida na indústria como *Original Equipment Manufacturer*, ou mais comumente, OEM.

Figura 1 – Representação das camadas de tratamento e pintura, utilizadas em um sistema automotivo original (OEM).



Fonte: AKAFUAH, 2016.

A diferença principal entre a aplicação do ED e do *primer*, *base coat* e do *clear coat*, consiste nos métodos de deposição das camadas de tinta. Enquanto que no ED a tinta deposita-se com ajuda da imersão do carro em um tanque, os três materiais seguintes são pulverizados e depois atraídos por um campo eletrostático, gerado pelo equipamento de pintura. O processo de pintura eletrostático por pulverização, tema deste trabalho será detalhado mais adiante. O processo de pintura ED, utiliza corrente elétrica direta para depositar aglutinantes e pigmentos, para que processos predominantemente eletroforéticos operem. Eletroforese, neste contexto, é entendida como a migração de partículas coloidais ou suspensas em um campo elétrico. As partículas migram de acordo com sua carga para o ânodo (que é então chamado de anaforese) ou para o cátodo (cataforese). O processo eletroforético para depositar tintas desta forma é conhecido como *eletropainting*, *eletrocoating* ou eletrodeposição de tinta e só pôde ser aplicado industrialmente, quando foram desenvolvidas novas tintas e vernizes ionizáveis que poderiam ser diluídas em água e que poderiam ser depositadas de um meio aquoso sob a influência de corrente elétrica. Por esta razão, esse processo apresenta alguma semelhança com a eletrodeposição de metais. De acordo com o desenvolvimento histórico da pintura eletrostática, as sugestões mais antigas com soluções aquosas, dispersões ou emulsões de ligantes de tinta apareceram nas especificações de patente em 1959 (Imperial Chemical Industries Ltd.22). A (Ford Motor Company) sugeriu pela primeira vez, um processo para a pintura por imersão eletrostática de carros em 1960 (MACHU,1978).

Já na pintura eletrostática por método de pulverização, é muito comum a utilização de robôs industriais. Para garantir a qualidade e sustentar o processo de otimização é muito importante ter o conhecimento técnico nestes de robôs de aplicação e a tecnologia de aplicação da tinta. Vale salientar que é necessário conhecimento técnico da norma

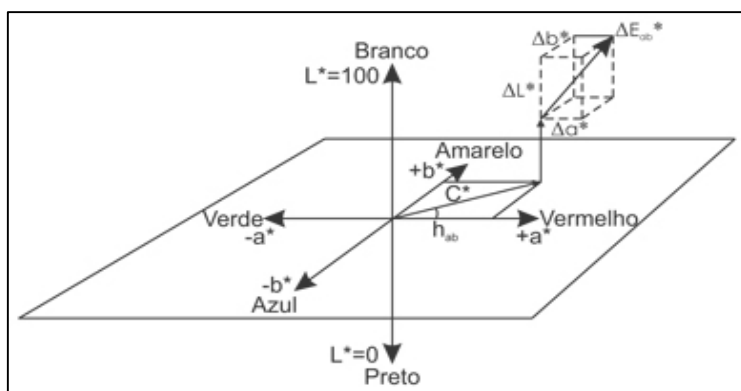
NFPA 33, (*National Fire Protection Association*) para lidar com grandezas elétricas juntamente com produtos inflamáveis, que regem robôs de aplicação em cabines de pintura, onde o ambiente de trabalho para pessoas que atuam nessa atividade geralmente é insalubre, incluindo gases nocivos e prejudiciais no ar, risco de incêndio repentino (*flash fires*) e ruído do bico da pistola pulverizadora.

No sistema de aplicação *waterborne* (base água), apenas o spray de tinta é polarizado com alta tensão, fazendo com que a bomba de tinta, tubulações e reservatórios não recebam potencial elétrico, o que ocorre de forma oposta ao sistema *solventborne* ou base solvente. (GROOVER, 2011).

2 TINTA

As principais funções de uma tinta são decoração e proteção. Além destas duas atribuições, a cor é essencial para complementar a estética e adicionar valores, como exclusividade e atratividade comercial, principalmente em bens de valor agregado, tais como, os automóveis. O princípio da cor baseia-se na radiação eletromagnética, que incide em um material orgânico ou inorgânico. Quando isto ocorre, ela pode ser refletida, absorvida ou transmitida. Sendo assim, cada material absorve, reflete e transmite a radiação incidente de uma forma própria. Esta característica é o princípio para várias técnicas analíticas baseadas em espectrofotometria, como análise por ultravioleta (UV) e infravermelho (IV). Nestas técnicas, detectores especiais são utilizados para receber e registrar a intensidade de absorção/transmissão em diversos comprimentos de onda. O olho humano não percebe a radiação em todo espectro, apenas percebemos a radiação no espectro visível de 380 a 780nm. Para avaliação da cor em tintas automotivas é comum o uso de espectrofotômetros que leem os diversos comprimentos de onda dentro da faixa do visível. Estes aparelhos, chamados de colorímetros, decompõem os comprimentos de onda, nas chamadas coordenadas colorimétricas. O sistema, chamado de espaço L, a, b quantifica as tendências de tonalidade que a cor está apresentando, comparando sempre com um padrão. A avaliação final de cor é obtida com a interpretação do valor de ΔE , expresso como: $\Delta E = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{1/2}$ que quantifica as variações das tonalidades nas chamadas coordenadas “a” (verde/vermelho) e “b” (azul/amarelo) mais a luminosidade “L” (claro ou escuro). Quanto menores as variações de ΔE , menor o desvio de cor da tinta em estudo, em relação ao padrão estipulado pelo cliente. Os valores normalmente de ΔE aceitáveis no mercado automotivo original, podem variar de 0,5 a 1,0 dependendo da cor e exigência do cliente. Na Figura 2 pode ser vista a representação do espaço colorimétrico CIELAB, muito usada em avaliação de cores indústria em geral (BARROS, 2014; DUPONT, 2012).

Figura 2 – Representação do sistema colorimétrico CIELAB



Fonte: BARROS, 2014

3 PRINCÍPIOS DE APLICAÇÃO POR PULVERIZAÇÃO ELETROSTÁTICA

A aplicação por pulverização eletrostática consiste no uso de um campo elétrico e/ou uma carga direta para aplicar partículas de líquidos em um substrato aterrado, logo, a eficiência de transferência pode ser maior que em uma aplicação manual convencional, sem uso de sistema eletrostático. O aumento de eficiência pode ser resultado de menores tamanhos de partículas (gotas) de tintas, obtidas durante a pulverização. Essas partículas são constituídas por meio da fragmentação de fios de tinta, durante as altas rotações do equipamento (força centrífuga). Quanto maior a rotação, menor o tamanho destas gotas. Essas grandezas são inversamente proporcionais, logo, exige ao mesmo tempo uma eficiência de transferência adequada para atingir a peça. (DUPONT, 2012).

No revestimento eletrostático, a tinta líquida ou em pó é atomizada e carregada em um bico conectado a uma fonte de alta tensão. Uma vez carregadas, as partículas de tinta são eletricamente forçadas a sair do trajeto pelo voo do eletrodo em direção ao objeto aterrado. A eficiência e qualidade da pulverização eletrostática depende de parâmetros como tamanho de gotícula e distribuição de carga, evaporação de solventes durante o tempo de trânsito, geometria dos eletrodos e objetos, correntes de íons e fluxo de tinta. Para obter um processo eficiente, é necessário entender os mecanismos de atomização e carregamento, o transporte da tinta no campo elétrico e a deposição da pintura (HAKBERG, 1983).

A aplicação é dividida em 3 critérios: a-) método de carga (condução direta, corona, indução); b-) método de atomização (estacionário, alta velocidade do *spray*, disco rotatório ou *bell*) e c-) natureza do material (líquido ou pó).

Nas tintas líquidas, os métodos utilizados são o de carga direta, corona e por indução. Em tintas em pó, os métodos para esta finalidade são o corona ou o triboelétrico.

O triboelétrico caracteriza-se pelo efeito do impacto da tinta nas paredes da tubulação do sistema de pintura, criando-se uma carga elétrica com polaridade baseada na série triboelétrica.

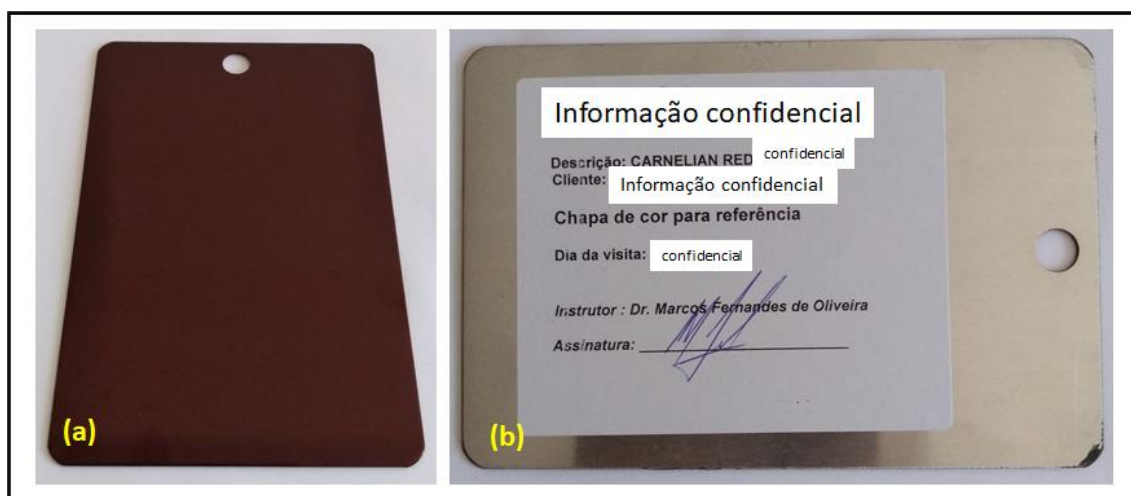
Na condução direta, o material poderá apresentar alta condutividade, assim, a voltagem é aplicada na fonte do material a ser pintado, para isso usa-se a agulha carregada e atomizada. Para carga induzida, a voltagem é aplicada próxima da agulha para que o líquido viaje próximo à fonte e seja induzida por campo elétrico. Para melhor rendimento, os materiais devem ter alta resistividade em geral maior que $10^{16} \Omega.m$. Por causa da baixa eficiência de transferência de carga, é necessário assistência mecânica e atomização rotacional para se ter um bom *spray* (OLIVEIRA, 2015).

Em um de seus primeiros usos industriais, a pulverização eletrostática foi usada para aplicar tinta em peças de metal nas indústrias automotivas, onde ainda é amplamente utilizado, nos dias de hoje. Por causa de eficiência do uso do material e abrangência da cobertura, essa técnica foi aplicada a muitas outras áreas industriais (COLBERT, CAIRNCROSS, 2005).

4 METODOLOGIA

Os ensaios foram realizados em uma cabine de pintura com temperatura e umidade controladas, 24 – 25°C e 55 - 75%, respectivamente. O equipamento utilizado foi um robô de aplicação de tinta automotiva da marca FANUC, podendo se movimentar em deslocamentos horizontais e verticais. Os parâmetros estudados foram a vazão e a rotação, que são condições básicas de operação de um processo de pintura. Demais fatores como tensão e velocidade de aplicação não foram modificadas por serem valores fixos, que não podem ser alterados por exigência do cliente. A tinta avaliada foi um base-coat vermelho base solvente, com tonalidade perolizada, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Chapa com a cor vermelha perolizada, usada na modelagem matemática.
a-) cor vermelha perolizada; b-) verso da chapa com identificação da cor.



Fonte: autores (2019).

4.1 Desenvolvimento

A modelagem compreendeu a utilização do software estatístico Minitab 19.1, usando-se a função DOE “Design Of Experiments”. Com a ajuda do software foi possível a montagem de um pequeno delineamento de experimentos, onde foram avaliados os dados colorimétricos L,a, b e espessura do filme, em função da rotação e vazão estipuladas. Cores de tonalidade vermelha em geral, como a da tinta estudada, apresentam baixos índices de refração, podendo, dependendo da espessura do filme, exibir a tonalidade do substrato e comprometer a cor. Desta forma, a camada também deve atingir uma espessura mínima, neste caso da ordem de 25 – 30 μm para aprovação da cor final.

Com base em históricos de aplicação e de dados reais da linha do cliente, foram estipuladas as seguintes variações para rotação e vazão:

Rotação (RPM): Mínima: 25.000 Máxima: 45.000
 Vazão (ml/min): Mínima: 180 Máxima: 300

De modo a não gerar um número muito grande de experimentos, o que inviabilizaria a execução dos mesmos, pelo grande consumo de matérias-primas e chapas pintadas, o DOE selecionado foi um projeto fatorial 4. Este projeto gera 4 variações de ensaios mais 8 réplicas, as quais são úteis para confirmar a reprodutibilidade dos resultados. A relação de todos os 12 ensaios e os resultados práticos obtidos podem ser visto na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1 – Projeto fatorial gerado pelo Minitab 19.1, mostrando as variações de rotação e vazão, acompanhados dos resultados práticos de cor e camada.

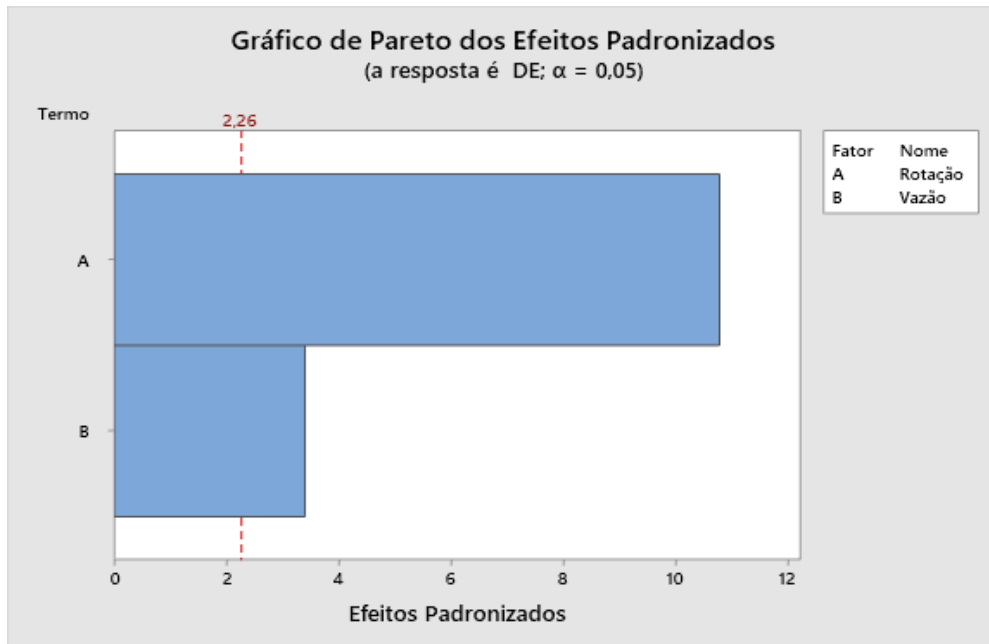
Rotação (rpm)	Vazão (ml/min)	L	a	b	DE	Camada (µm)
45000	180	-0,78	0,03	0,02	0,78	31,59
45000	180	-1,00	0,05	0,01	1,00	35,87
45000	180	0,87	0,05	0,03	0,87	28,85
45000	300	-0,19	0,31	0,62	0,72	43,29
25000	180	2,61	0,93	-0,04	2,77	18,28
25000	300	1,62	0,46	-1,04	1,98	35,64
25000	300	1,67	0,56	-1,19	2,12	39,00
25000	180	2,85	0,99	-0,08	3,02	20,05
25000	180	3,05	0,79	0,02	3,15	22,35
25000	300	1,61	0,57	-1,04	2,00	34,76
45000	300	-0,23	0,33	0,80	0,90	40,65
45000	300	-0,20	0,26	0,62	0,70	42,97
	Mín	Máx				
Rotação (rpm)	25000	45000				
Vazão (ml/min)	180	300				

5 RESULTADOS

Após a execução dos ensaios e com os resultados práticos reais, foi solicitada uma análise do projeto fatorial, com a ferramenta “*Analysis Factorial Design Minitab*”. Esta ferramenta fornece a tendência lógica de cada um dos resultados, cuja análise é feita com a ajuda de gráficos e com as equações que regem os fatores analisados.

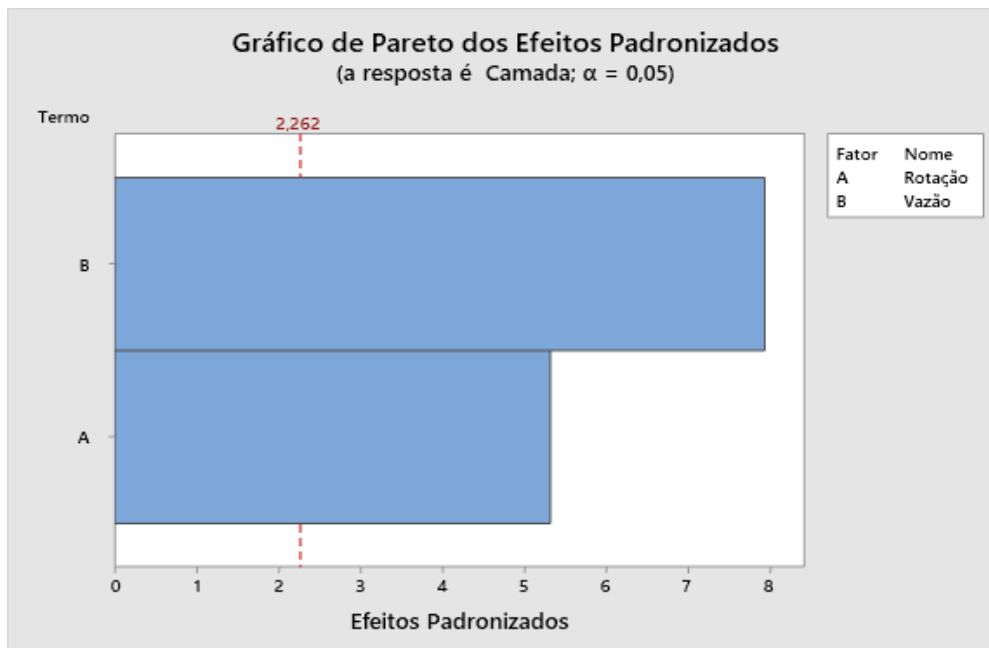
A seguir, nas Figuras de 4 a 5, podem ser vistas as influências da rotação e da vazão no dado colorimétrico ΔE e na camada. Pode-se observar que para o ΔE , o parâmetro de maior influência está na rotação, ou seja, quanto maior a rotação, maior o valor de ΔE obtido. Para o valor da camada, a vazão acaba tendo maior impacto, ou seja, quanto maior a vazão maior a camada final do filme. Tais pontos serão discutidos mais adequadamente no decorrer das análises.

Figura 4 – Influência da rotação e da vazão no dado colorimétrico ΔE



Fonte: Software Minitab 19.1.

Figura 5 – Influência da rotação e da vazão na espessura de camada.



Fonte: Software Minitab 19.1.

A seguir são colocadas as equações (1) e (2) de regressão linear e tendência para cada um dos fatores avaliados:

$$\Delta E = 5,664 - 0,000084 \text{ Rotação (RPM)} - 0,00441 \text{ Vazão(ml/min)} \quad (1)$$

$$\text{Camada} = -9,17 + 0,000443 \text{ Rotação (RPM)} + 0,01102 \text{ Vazão(ml/min)} \quad (2)$$

Após os resultados, realizou-se o processo de otimização, visando a obtenção da rotação e vazão ideais a fim de obter-se os menores valores para os dados colorimétricos e de camada. A ferramenta utilizada do Minitab 19.1 foi a “Responser Optimizer”, fixando-se um valor de camada de 25 - 30 μm e o menor valor ΔE possível. Os valores sugeridos pelo software são a seguir mostrados, nas Tabelas 2 a 7

Tabela 2 – Primeira solicitação de otimização para obtenção de um alvo com camada de 25 μm e um $\Delta E = 0,50$ para o MiniTab 19.1.

Resposta	Meta	Inferior	Alvo	Superior	Peso	Importância
Camada	Alvo	8,2839	25,0	43,2940	1	1
DE	Alvo	0,4500	0,5	3,1507	1	1

Tabela 3 – Resultado da 1ª tentativa de otimização do MiniTab para uma camada esperada de 25 μm e $\Delta E = 0,50$.

Solução	Rotação (RPM)	Vazão (ml/min)	Camada Ajuste	DE Ajuste
1	45000	180	30,5952	1,09287

Tabela 4 – Segunda solicitação de otimização para obtenção de um alvo com camada de 25 μm e um $\Delta E = 1$ para o MiniTab 19.1.

Resposta	Meta	Inferior	Alvo	Superior	Peso	Importância
Camada	Alvo	18,2839	25	43,2940	1	1
DE	Alvo	0,7014	1	3,1507	1	1

Tabela 5 – Resultado da 2ª tentativa de otimização do MiniTab para uma camada esperada de 25 μm e $\Delta E = 1$.

Solução	Rotação (RPM)	Vazão (ml/min)	Camada Ajuste	DE Ajuste
1	45000	180	30,5952	1,09287

Tabela 6 – Terceira solicitação de otimização para obtenção de um alvo com camada de 18 μm e um $\Delta E = 0,7$ para o MiniTab 19.1.

Resposta	Meta	Inferior	Alvo	Superior	Peso	Importância
Camada	Mínimo	-	18,2839	43,2940	1	1
DE	Mínimo	-	0,7014	3,1507	1	1

Tabela 7 Resultado da 3ª tentativa de otimização do MiniTab para uma camada esperada de 18 μm e $\Delta E = 0,70$.

Solução	Rotação (RPM)	Vazão (ml/min)	Camada Ajuste	DE Ajuste
1	45000	180	30,5952	1,09287

Como observado, nas Tabelas, 3, 5 e 7, as três respostas do MiniTab apontam sempre para a mesma combinação de rotação e vazão para os mesmos valores ΔE e camada. Pelos resultados de otimização gerados pelo Software MiniTab 19.1. recomenda-se, assim uma rotação de 45000 rpm e 180 ml/min de vazão para um ΔE de 1,09 com uma camada de 30,59 micra, com base na tendência dos ensaios. De acordo com as condições existentes, não é possível chegar-se em uma camada de 25 micra e um $DE=0,50$, que seria a melhor opção. No entanto, um ΔE de 1,09 e uma camada de 30,59 estão aprovados, dentro da exigência do cliente, sendo desta forma o processo final estabelecido. O resultado prático com uso destes parâmetros pode ser visto a seguir na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultado prático com utilização da otimização sugerida pelo MiniTab 19.1

Solução	Rotação (RPM)	Vazão (ml/min)	Camada Prática	DE Prático
1	45000	180	28,77	0,98

6 CONCLUSÃO

A análise dos gráficos de Pareto para os efeitos analisados leva a concluir que para o dado colorimétrico ΔE , a rotação do equipamento é o fator de maior na influência sobre este resultado. Isto vem de encontro com a dimensão do tamanho de partícula, onde a rotação tem influência direta na cor. Maiores rotações geram partículas menores. Tamanhos de partículas diferentes podem propiciar diferenças em aspecto e acomodação de filme, conseqüentemente influenciando no ΔE . Assim, o controle do tamanho da gota formada pela influência da força centrífuga é de suma importância para minimizar a variação de cor da tinta aplicada.

Com relação à camada, observa-se que para este parâmetro, o gráfico de Pareto mostra que a vazão tem maior influência que a rotação. Enquanto que a rotação, como mencionado está mais relacionada com o processo de pulverização e tem grande peso no aspecto do filme, a vazão define a quantidade de tinta aplicada. Assim, quanto maior a vazão, maior a espessura do filme. Não se pode, no entanto, deixar de considerar que por ser uma cor vermelha com menor índice de refração, a espessura do filme também irá influenciar na cor.

Na análise dos dados e na otimização é mostrado que a modelagem matemática é muito útil, pois economiza-se um tempo precioso, evitando-se muitas vezes, testes desnecessários. Conforme a otimização sugerida pelo MiniTab, seguindo a tendência do experimento, a melhor condição de aplicação da tinta vermelha perolizada seria uma rotação de 45000 rpm e uma vazão de 180 ml/min. Com estes parâmetros, o menor valor teórico possível de ΔE para a cor analisada seria de 1,09, obtida em uma camada

de 30,59 μm . Estas condições estariam ainda aceitáveis e dentro do esperado para algumas cores.

Uma nova execução com estes parâmetros, mostrou um resultado prático de um $\Delta E = 0,98$ com uma camada de 28,77 μm , mostrando assim, a validação do método.

REFERÊNCIAS

AKAFUAH, N.K.; POOZESH, S.; SALAIMEH, A.; PATRICK, G.; LAWLER, K.; SAITO, K. Evolution of the Automotive Body Coating Process—A Review. **Coatings**, n.6, p.1-24, 2016.

BARROS, V.S.; MUNIZ, G.I.B.; MATOS, J.L.M. “Caracterização colorimétrica das madeiras de três espécies florestais da Amazônia” **Cerne**, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis; Universidade Federal do Paraná – Curitiba, Brasil, v.20, n.3, p.337-342, 2014.

COLBERT, S.A.; CAIRNCROSS, R.A. A discrete droplet transport model for predicting spray coating patterns of an electrostatic rotary atomizer. **Journal of Electrostatics**, v. 64 , p. 234-246, 2006.

DUPONT, Apostila – Curso básico de aplicação, 2012

GROOVER, M.P. Automação Industrial e Sistemas de Manutenção. 3.ed. São Paulo, **Pearson**. Robótica industrial, p.172-194, 2011.

HAKBERG, B.; LUNDQVIST, S.; CARLSSON, B.; HÖGBERG, T. A theoretical model for electrostatic spraying and coating. **Journal of Electrostatics**, v.14, p.255-268, 1983.

MACHU, W. “Handbook of Electropainting Technology” **Electrochemical Publications Limited**, p. 1-307, 1978.

OLIVEIRA, M.F, Apostila Módulo de Aplicação Eletrostática, Faculdades Oswaldo Cruz, 2015