



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Engenharia de Produção



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**Aplicação do método de engenharia robusta em um processo manual de
pintura eletrostática de alta temperatura**

Sthael Mariane Almeida Cavalcanti

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
JOÃO MONLEVADE
Abril, 2018.**



Aplicação do método de engenharia robusta em um processo manual de pintura eletrostática de alta temperatura

Monografia submetida à banca examinadora designada pelo Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto - Campus João Monlevade, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientação: Prof. Dra. Luciana Paula Reis.

ATA DE DEFESA

Aos 27 dias do mês de abril de 2018, às 13 horas, na sala B104 deste instituto, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso pela aluna Sthael Mariane Almeida Cavalcanti, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: June Marques Fernandes, Luciana, Paula Reis e Wagner Ragi Curi Filho. A aluna apresentou o trabalho intitulado: Aplicação do método de engenharia robusta em um processo manual de pintura eletrostática de alta temperatura. A comissão examinadora deliberou, pela:

Aprovação

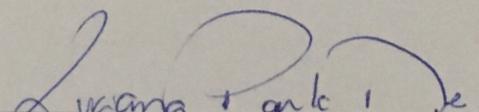
Aprovação com Ressalva - Prazo concedido para as correções:

Reprovação com Ressalva - Prazo para marcação da nova banca:

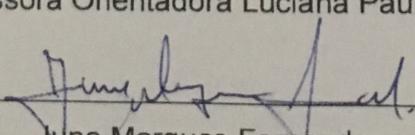
Reprovação

do(a) aluno(a), com a nota 8,5. Na forma regulamentar e seguindo as determinações da resolução COEP 04/2017 foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo aluno.

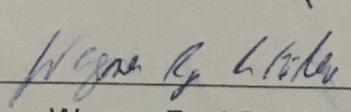
João Monlevade, 27 de abril de 2018.



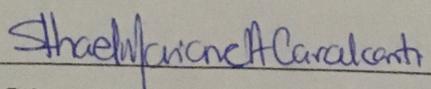
Professora Orientadora Luciana Paula Reis



June Marques Fernandes



Wagner Ragi Curi Filho



Sthael Mariane Almeida Cavalcanti



ANEXO IX - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Aplicação do método de engenharia robusta em um processo manual de pintura eletrostática de alta temperatura” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem o devido referenciamento ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 25 de maio de 2018.

Sthael Mariane Almeida Cavalcanti

Sthael Mariane Almeida Cavalcanti



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Engenharia de Produção



Dedico este trabalho a minha família, a base de tudo. Em especial a minha mãe, Zelinha, que me apoiou incondicionalmente em toda minha vida e nunca me deixou desistir. E a Saullo e Melissa, minhas maiores joias, porque representam a magia do ciclo da vida.



AGRADECIMENTOS

Este trabalho é resultado da união de esforços de muitas pessoas. Cada um foi fundamental para que eu pudesse chegar neste momento. Por isso, agradeço os esforços de todos os que, de alguma forma, me deram suporte e apoio na conclusão desta pesquisa.

Agradeço a minha querida orientadora, Luciana Paula Reis, porque acreditou em mim, esteve ao meu lado e me incentivou em todos os momentos. Muito obrigada Lu, não cabe aqui o tamanho da minha gratidão por você.

A CNH industrial, por ter aberto suas portas. Em especial, a todo o departamento de qualidade que se tornou um ambiente de muito aprendizado e amizade.

A Franciele Amorim, dona deste projeto, por toda a paciência de ensinar e por todo o carinho em compartilhar seu trabalho conosco.

Aos meus amigos, por terem ouvido as minhas aventuras e vibrado comigo as conquistas ao longo deste trabalho.

Por fim, sou grata a mim mesma, por ter aprendido desde cedo o valor de me esforçar intensamente para conquistar meus objetivos e realizar meus sonhos. Sou grata ao momento em que aprendi a detestar a palavra impossível, a quando aprendi a desconfiar dos pensamentos negativos e a quando eu decidi deixar para trás o peso da opinião dos outros e perseguir minha essência.



“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota”.

(Theodore Roosevelt)



RESUMO

A engenharia robusta permite analisar o comportamento de processos buscando redução da variabilidade dos mesmos. Por meio do desenho de experimentos, da análise de variância (ANOVA) e da razão Sinal/Ruído, é possível identificar configurações de parâmetros menos sensíveis aos fatores que provocam tais variações. Nesse viés, este trabalho dedica-se a estudar um processo manual de pintura eletrostática, realizado em máquinas para mineração e construção civil. Diante de uma reformulação da tinta utilizada no processo, tornou-se necessário o estudo de uma nova programação de parâmetros de processo. Assim, almeja-se responder ao questionamento de qual é a melhor configuração dos parâmetros do processo de pintura (vazão do líquido, pressão de ar, capa da pistola de tinta e bico da pistola de tinta) que garante a menor variabilidade causada pelo operador na espessura da camada de tinta? Para responder a esta pergunta, este trabalho fundamentou-se em uma metodologia quantitativa experimental, a engenharia robusta, objetivando identificar a configuração dos parâmetros de processo que reduzem a variabilidade causada pelos ruídos no processo em questão, garantindo maior estabilidade e mitigando possíveis perdas incorrentes de defeitos na camada de tinta. Os resultados confirmaram que todos os fatores analisados exercem efeitos significativos na espessura de camada. Ainda, estes indicaram a combinação ótima dos fatores como sendo: vazão de líquido = 350 ml/minuto; pressão de ar = 6 bar; capa da pistola de tinta = 24N379; bico da pistola de tinta = 1.2.

Palavras Chave: Metodologia Taguchi, Engenharia Robusta, Pintura Eletrostática



ABSTRACT

Robust engineering allows to analyze the behavior of processes in order to reduce its variability. Through the design of experiments, analysis of variance (ANOVA) and the signal-to-noise ratio, it is possible to identify parameters settings less sensitive to the cause factors to such variations. Therefore, this work is dedicated to study a manual process of electrostatic painting, realized in machines for mining and civil construction. There was a recent reformulation of the ink used in the process, which required the study of new programming of process parameters. Thus, it is intended to answer the question of which is the best configuration of the parameters of the painting process (liquid flow, air pressure, ink gun cover and ink gun nozzle) that guarantees the lower variability caused by the operator in the thickness of the ink layer? To answer this question, this work is based on a quantitative experimental methodology, robust engineering, aiming to identify the configuration of the process parameters that reduce the variability caused by the noise in the process in question, guaranteeing greater stability and reducing possible losses due to defects in the ink layer. The results confirmed that all the analyzed factors exert significant effects on the layer thickness. Still, this is the indicated optimal combination of factors as: liquid flow = 350 milliliters / minute; air pressure = 6 bar; ink gun cover = 24N379; nozzle of the paint gun = 1.2.

Keywords: Taguchi Methodology, Robust Engineering, Electrostatic Painting



LISTA DE FUGURAS

Figura 1 - Função de perda de qualidade de taguchi	17
Figura 2 - Gráfico P	20
Figura 3 - Aspecto visual dos principais defeitos de camada	27
Figura 4 - Esquema representativo dos parâmetros envolvidos no processo de pintura.....	36
Figura 5 - Operador executando a aplicação do <i>primer</i>	37
Figura 6 - Parâmetros da pistola eletrostática	38
Figura 7 – Disposição dos corpos de prova no experimento	43
Figura 8 - Instrumento usado para medir espessura da camada de tinta	43
Figura 9 - Análise de variância (ANOVA)	45
Figura 10 - Resultado das cálculos do minitab 16.....	46
Figura 11 - Gráfico de efeitos principais para S/R.....	47



LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Etapas do processo de pintura.....	35
Tabela 2 - Parâmetros de controle	39
Tabela 3 - Matriz de experimentos	41
Tabela 4 - Resultados da leitura da espessura de camada.....	44



SUMÁRIO

1	Introdução	11
1.1	Problema de pesquisa	12
1.2	Objetivo geral	13
1.2.1	Objetivos Específicos	13
1.3	Justificativa.....	13
1.4	Estrutura do trabalho	14
2	Referencial teórico.....	15
2.1	Qualidade e a função de perda.....	15
2.1.1	A Função de perda	16
2.2	Engenharia robusta: o método taguchi	19
2.2.1	O conceito de Sinal Ruído.....	21
2.2.2	Arranjos ortogonais	22
2.2.3	Análise de variância (ANOVA)	23
2.2.4	Etapas de aplicação da metodologia robusta	24
2.3	Pintura eletrostática de alta temperatura	26
2.3.1	A camada de tinta	26
2.3.2	Fatores que impactam no sistema de pintura	28
3	Metodologia de pesquisa.....	30
3.1	Classificação da pesquisa	30
3.2	Sistema de coleta de dados.....	30
3.3	Sistema de análise de dados.....	31
4	Caso prático.....	33
4.1	Descrição do contexto da pesquisa e do processo em estudo.....	33
4.2	Apresentação dos dados	34
4.2.1	Mapeamento do processo de pintura eletrostática de alta temperatura	34
4.2.2	Definição dos parâmetros controláveis	37
4.2.3	Definição dos parâmetros não controláveis	40
4.2.4	Seleção do arranjo ortogonal	41
4.3	Análise dos dados.....	45
5	Resultados e conclusões	48
6	Referências bibliográficas.....	50



1 Introdução

Um processo pode ser descrito como uma sequência de ações com o objetivo de gerar um resultado comum. No processo de produção de um objeto, diversas forças de transformação atuam até que o objeto esteja como se deseja. Ocorre que é natural que um processo sofra perturbações e apresente uma resposta diferente cada vez que é executado. Isso acontece porque nem todas as forças atuantes permitem que seu comportamento seja controlado. Então, a medida que essas oscilam, o processo varia em seu funcionamento.

A essas forças, chamamos de parâmetros de processos e sua variabilidade é indesejável porque quão maior a diversidade dos resultados de sua atuação, maiores serão os controles necessários para impedir que defeitos e produtos não satisfatórios sigam para a próxima etapa ou cheguem ao cliente. Em geral, variabilidades representam perdas de desempenho, podendo incorrer em retrabalho e custos adicionais. Esses transtornos podem ser evitados ao se planejar processos sob controle, ou seja, que apresentem o mínimo de variabilidade. Para isso, é necessário que a configuração dos parâmetros seja cuidadosamente estudada buscando encontrar a combinação de seus níveis que demonstre menor sensibilidade a fatores externos.

Algumas combinações nos níveis dos parâmetros podem ser mais, ou menos, vulneráveis. De forma que, cada combinação resulta em um nível de variabilidade diferente. Assim, estabelecer uma combinação que resulte em mínima variabilidade é um dos maiores desafios na gestão de processos.

Para apoiar a solução de problemas como esse, Taguchi (2005) relata uma metodologia experimental que visa identificar tal configuração de parâmetros. A metodologia, conhecida como pelo nome do seu criador, o Dr. Taguchi, vem sendo amplamente aplicada em diversos contextos. Bilga (2016) aborda a aplicação desta metodologia com foco para a redução do consumo de energia em uma operação, Pandle *et al.* (2016) com foco na otimização da fabricação de nanotubos de carbono, Kishore (2017) na configuração de um refrigerador termoelétrico a base de bismuto-telurídeo, Souza (2015) na otimização de um processo de pintura automotiva, entre diversos outros exemplos.

Nessa linha, a metodologia taguchi foi a ferramenta escolhida para dar apoio à redução da variabilidade na espessura de camada em um processo de pintura



eletrostática em uma indústria de maquinário para construção civil e mineração. O objetivo da aplicação desta metodologia consiste em encontrar os parâmetros de processo que garantam menor ocorrência de defeitos na espessura da camada pintada após a implementação de uma nova formulação na tinta.

1.1 Problema de pesquisa

Um processo de pintura eletrostática se difere de outras tecnologias de pintura por sua aplicação, que é feita manualmente por um operador treinado. Nesse tipo de processo, cabe ao operador “configurar” alguns parâmetros de aplicação no momento de execução da atividade. Por exemplo, a distância entre a pistola de tinta e a peça está diretamente relacionada a percepção espacial do operador e pode sofrer grande variabilidade ao longo do processo. Em um caso como esse, a uniformidade na espessura da camada de tinta é diretamente afetada porque uma menor distância representa maior deposição de material. A essas variações denomina-se parâmetros incontroláveis, porque seu comportamento não pode ser garantido com precisão, o que por sua vez gera um resultado final do processo fora de controle. Na pintura eletrostática manual, o resultado dessa situação pode ser observado por meio dos defeitos visuais na superfície da peça pintada.

Esse sistema de pintura envolve diversos parâmetros como pressão de ar, abertura do leque de tinta, distância de aplicação, velocidade de aplicação, viscosidade da tinta, entre diversos outros. A resposta desejada do sistema é a deposição de uma camada de tinta conforme as especificações do projeto de engenharia. Ocorre que, uma vez que o processo é realizado de forma manual, é natural que haja um alto índice de variabilidade na camada de tinta, e conforme discutido anteriormente, esta é uma característica altamente indesejável para qualquer processo.

No caso da camada de tinta, qualquer variabilidade afeta diretamente seu aspecto visual, que por sua vez impacta significativamente a percepção de qualidade estética que o cliente tem em relação ao produto. A camada deve ter uma boa cobertura e apresentar uma espessura ideal. Isso porque caso ela seja muito espessa, pode gerar defeitos como escorrimento da tinta, porosidade, rugosidade, ao mesmo tempo se ela for muito fina pode gerar falta de tinta em determinados pontos. Portanto, deseja-se mitigar a possibilidade de ocorrência desses defeitos,



por meio da redução da variabilidade do resultado do processo, garantindo ao produto um aspecto visual satisfatório.

O processo de pintura abordado neste trabalho é realizado há mais de 45 anos por esta organização. Ao longo desse tempo, a empresa foi ganhando perícia e promovendo melhorias até que o processo pudesse ser executado com um nível de estabilidade aceitável. Entretanto, recentemente ocorreu uma modificação na formulação da tinta utilizada, o que gerou a necessidade de preparar o processo para manter seu comportamento após a mudança.

Desconhecendo a melhor configuração do processo de pintura para a nova tinta, deseja-se aplicar a metodologia taguchi para responder a seguinte pergunta: qual a combinação viável dos parâmetros do processo de pintura eletrostática (vazão do líquido, pressão de ar, capa da pistola de tinta e bico da pistola de tinta) que garante a menor variabilidade causada pelo operador na espessura da camada de tinta?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Propor uma combinação viável dos fatores de controle no processo manual de pintura eletrostática que minimize o impacto dos ruídos na espessura da camada de tinta, por meio da aplicação da metodologia taguchi.

1.2.2 Objetivos específicos

- Mapear o processo de pintura eletrostática de alta temperatura
- Definir os parâmetros controláveis
- Definir os parâmetros não controláveis
- Identificar o melhor arranjo ortogonal
- Planejar o procedimento experimental

1.3 Justificativa

A relevância deste estudo consiste em evitar desestabilização do processo de pintura na organização estudada, no momento em que se alterar a formulação da tinta utilizada. Ao analisar o comportamento do processo de pintura e buscar sua adequação em relação as alterações físico químicas da tinta, ele trará o benefício de



minimizar a possibilidade de ocorrência de falhas, evitando os custos de retrabalho e insatisfação do consumidor.

Ademais, a aplicação da metodologia de engenharia robusta, tornará o processo mais resistente contra as variabilidades causadas por aqueles fatores cujo controle não é possível ou é muito difícil de ser estabelecido. Permitindo que, com baixos custos de investimento, o processo continue a resultar em uma camada de tinta uniforme e mantenha sua confiabilidade.

Por fim, este trabalho trará contribuições para a literatura ao relatar uma experiência de aplicação da metodologia robusta em um contexto de pintura de maquinário para construção civil e mineração. Poucos relatos foram identificados sobre a aplicação da metodologia taguchi em um processo de pintura, ao passo que em relação a pintura eletrostática, não foi encontrado nenhum relato. Assim, espera-se reportar uma experiência com a utilização desse método em contextos diversos, enriquecendo seu campo de aplicação.

1.4 Estrutura do trabalho

Para melhor apresentar o conteúdo desta pesquisa, este trabalho foi dividido em 5 capítulos: introdução, referencial teórico, metodologia, caso prático e resultados. O primeiro capítulo trata da introdução ao tema e enunciado do problema de pesquisa e objetivo, seguido da relevância do tema e das principais contribuições deste estudo. No segundo capítulo, é apresentada uma revisão de literatura sobre os conceitos de qualidade, função de perda, seguidos pela descrição da metodologia de engenharia robusta e do processo de pintura a ser estudado. No terceiro capítulo, é apresentada a metodologia de pesquisa e o passo a passo para aplicação da metodologia taguchi na otimização de um processo de pintura eletrostática. Já no quarto capítulo, é apresentado o caso prático em detalhes por meio da descrição da aplicação da metodologia, desde a elaboração dos experimentos até a análise de dados. Por fim, no quinto capítulo, os resultados são discutidos e analisados os impactos desses resultados no processo estudado.



2 Referencial teórico

Neste capítulo, contempla-se a fundamentação teórica relevante para o estudo da metodologia taguchi aplicada a um processo de pintura. Iniciando com a abordagem dos conceitos de qualidade segundo a visão taguchi, dando sequência com enfoque mais específico sobre a metodologia e, posteriormente, abordando informações referentes ao processo de pintura.

2.1 Qualidade e a função de perda

Taguchi *et al.* (2005) diz que produtividade é a medida da otimização dos recursos sociais de forma que beneficie toda a população. Essa visão do conceito de produtividade, sob um ponto de vista do consumidor, é chamada de produtividade social total. Para o autor a produtividade pode ser caracterizada como a soma das liberdades individuais. Isto é, quanto maior a disponibilidade para a utilização dos recursos que esta sociedade produz, mais produtiva ela é. Assim, produtividade está relacionada não apenas ao ganho de determinada empresa ao vender seus produtos ou serviços, mas também está diretamente relacionada ao benefício obtido por seus consumidores. Por essa razão, Phadke (1995) discute que quando um produto adquirido por um consumidor não apresenta o desempenho desejado, sua qualidade é considerada inferior. Esta perda de desempenho representa a improdutividade da sociedade, uma vez que esta produziu um produto indisponível para utilização.

Para qualquer produto, a medida do seu desempenho pode variar dependendo da condição ambiental, da condição de uso ou de uma unidade de para outra. Entretanto, quando o consumidor adquire este produto, ele traz uma expectativa que necessita ser satisfeita. Ao apresentar desvios em seu desempenho, o produto deixa de satisfazer a necessidade do consumidor. Esta condição incorre em perdas do usuário ao consumi-lo, da fábrica ao produzi-lo e também de toda a sociedade em termos de sua produtividade total. Dessa forma, baixa qualidade é definida pela incapacidade que o produto tem de cumprir o propósito para o qual foi criado, ou ainda como a incapacidade de atingir o desempenho desejado.

Ainda, Phadke (1995, p. 4) enuncia que após os estudos do taguchi, “medimos a qualidade de um produto em termos de perda total para a sociedade



devido à variação funcional e efeitos colaterais nocivos. Sob a qualidade ideal, a perda seria zero; quanto maior a perda, menor a qualidade”. Corroborando com esse conceito, a Sociedade Americana de Controle de Qualidade (2017) define a qualidade como: “a) as características de um produto ou serviço que tenham sua capacidade de satisfazer as necessidades declaradas ou implícitas; b) um produto ou serviço livre de deficiências”. Então, conclui-se que o objetivo da característica de qualidade de um produto consiste em maximizar a produtividade social total, ou a disponibilidade dos recursos sociais, por meio da eliminação das perdas causadas pelas variabilidades em seu desempenho durante o uso.

O baixo desempenho de um produto pode causar desde inconveniência, dano físico ao consumidor a perdas financeiras. Dessa forma, a percepção de qualidade está atrelada a satisfação que um consumidor obtém ao investir seu dinheiro em determinado produto. Nesse caso, podemos entender a medida de qualidade como “o valor esperado da perda monetária causada por desvios das características de desempenho em relação ao desejado ou especificado” (ALMEIDA & TOLEDO, 1989).

Assim, a produtividade social total depende da qualidade dos produtos gerados por uma sociedade, de forma que estes estejam sempre disponíveis para utilização no nível de desempenho desejado. Quaisquer variabilidades no funcionamento destes produtos, são consideradas perdas, caracterizadas como desvios de qualidade, que podem ser quantificadas por meio de uma função quadrática chamada função de perda.

2.1.1 A Função de perda

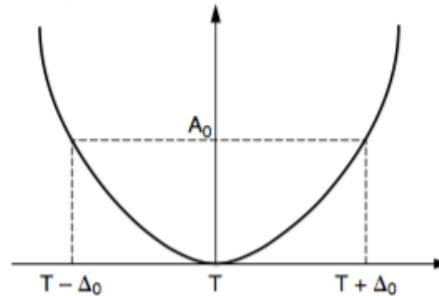
A figura 1 ilustra o conceito de função de perda. Neste gráfico de Yang e El-Haik (2003), T é representado como o valor alvo para determinada característica, ou seja, um valor de parâmetro que faz com que o produto satisfaça as necessidades do consumidor. Os limites de tolerância de variabilidade dessa característica são representados por Δ_0 , e A representa a perda monetária incorrida de desvios do valor alvo, quanto maior o desvio, maior a perda incorrida.

Os desvios ocorridos entre $T - \Delta_0$ e $T + \Delta_0$, são aceitáveis pelo fabricante, apesar de gerar menor desempenho do produto. Por outro lado, os desvios maiores



que esses limites incorrem em um custo A_0 , que é considerado o custo de reposição do produto quando este falhar. Souza (2015) interpreta que os custos incorridos dentro dos limites de tolerância, geram mais impacto para os clientes do que para o fabricante em si. Porque com a característica nesses níveis, o produto continua a funcionar, mas não atinge os níveis de desempenho desejados pelo cliente.

Figura 1 - Função de perda de qualidade de taguchi



Fonte: Yang & El-Haik (2003, p. 440)

O gráfico, representado na figura 1, trata de uma função que tem como objetivo atingir um valor alvo para determinada característica, nesse caso, o desempenho é melhor quanto mais próximo do valor nominal estabelecido. Em alguns casos, o desempenho é melhor, quanto menor o valor característica analisada. Por exemplo, quanto menor o consumo de energia em um sistema, melhor o seu desempenho em termos de economia de recursos. Em outros casos, é preferível que esse valor seja maximizado. Por exemplo, quando se trata de atingir maior potência em um sistema gastando o mesmo nível de energia. Para cada um desses casos, Park & Lee (2006) trazem as equações para estimar o nível de perda gerada pelo processo, conforme citado abaixo:

- Caraterística Nominal-Melhor

Para esse tipo de função, a qualidade é avaliada com base nas tolerâncias projetadas. Trata-se de uma função simétrica, o que indica que os desvios para quaisquer sentidos implicam em perdas proporcionais. O valo alvo para o requisito é diferente de 0. A função matemática para esse tipo de característica está representada pela equação 1.

$$L = kE(Y - T)^2 \quad (1)$$

Sendo, L a perda de qualidade; E o valor esperado da característica; T o valor alvo para Y e k o coeficiente de perda de qualidade. Em que, k é calculado por $k =$



$\frac{A_0}{\Delta_0^2}$. A perda total depende diretamente do coeficiente de perda, do valor esperado da característica e do quadrado da diferença entre o valor obtido e o valor alvo. Assim, qualquer desvio no valor de Y, implicará na ocorrência de perda de qualidade.

- Caraterística Menor-Melhor

Trata-se de uma função de minimização que representa características que tem 0 como o valor mais desejável. Nesses casos, quanto maior for o valor obtido para o requisito analisado, maior a perda incorrida no sistema. Para esse tipo de função, o valor alvo deve ser 0.

$$L = kEY^2 \quad (2)$$

Como no caso anterior, a equação 2 mostra que perda total depende diretamente do coeficiente de perda, do valor esperado da característica, mas aqui, esse valor é multiplicado pelo quadrado da do valor obtido. Ou seja, quanto maior o valor obtido para Y, maior será a perda de qualidade incorrida.

- Caraterística Maior-Melhor

Em uma função de maximização, a característica analisada não pode ser negativa, seu melhor valor é o infinito e seu pior valor é 0. Quando menor o valor lido, maior a perda incorrida. Essa característica é a inversa da anterior.

$$L = kE\left(\frac{1}{Y^2}\right) \quad (3)$$

Aqui também, a equação 3 mostra que a perda total depende diretamente do coeficiente de perda, do valor esperado da característica e, ao contrario do anterior, esse valor é multiplicado pelo inverso do quadrado da do valor obtido. Ou seja, quanto menor o valor obtido para Y, maior será a perda de qualidade incorrida (PARK & LEE, 2006).

Dados essas três diferentes características para avaliação de perda, foi enunciado então, o uso de projetos de experimentos para encontrar a configuração dos parâmetros do processo que atendesse ao tipo de função simétrica, maximização ou minimização. Essa técnica ficou conhecida como design de parâmetros robusto. O objetivo desta técnica é tornar os processos insensíveis a fatores ambientais ou fatores difíceis de controlar. Isto é, tornar os produtos insensíveis à variação transmitida pelos componentes individuais e procurar níveis dos fatores de processo que ajustem a média a um valor desejado, reduzindo a variabilidade em torno desse valor. Taguchi sugeriu desenhos fatoriais altamente



fracionados e arranjos ortogonais, juntamente com alguns novos métodos estatísticos para resolver esses problemas (MONTGOMERY, 2017).

2.2 Engenharia robusta: o método taguchi

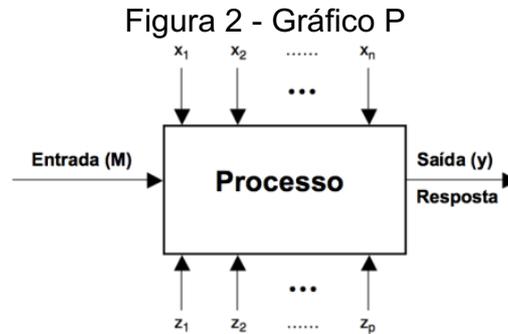
A visão geral da engenharia de qualidade é reduzir ao mínimo a perda incorrida ao consumidor durante o uso de um produto. Isso se dá por meio da garantia da performance deste de acordo com a característica de perda que melhor descreve seu funcionamento. O grande diferencial da engenharia robusta é que por meio dela Taguchi desafiou a abordagem tradicional do controle de qualidade que acaba enrijecendo os controles sobre o sistema de produção para atingir um comportamento satisfatório. Nessa visão os custos crescentes sobre os processos de controles levam o produto a um retorno econômico decrescente. Por outro lado, a abordagem da engenharia robusta visa o caminho oposto. A ideia é simples, em vez de concentrar esforços em controles, devemos projetar produtos robustos o suficiente de forma a resistir a eventuais variabilidades no processo e no uso (ALMEIDA & TOLEDO, 1989).

Ao abordar-se a qualidade de um produto, leva-se como foco a melhoria de sua funcionalidade principal. Esta pode se dar de diferentes maneiras, por exemplo, um alimentador de papel em uma impressora pode ser projetado com a utilização de cintos, ar ou rolos que garantam a movimentação do papel até a posição desejada. A escolha entre cada uma dessas opções define a funcionalidade do sistema, e é chamada de projeto do sistema. Este projeto é executado combinando elementos de forma que o objeto consiga cumprir sua função principal, chamada de função de transferência. Para melhorar a funcionalidade, durante o desenvolvimento do produto devem ser realizados testes variando os níveis dos parâmetros até encontrar a condição de desempenho mais otimizada, isso é chamado de projeto de parâmetros. Por meio da abordagem do projeto de parâmetros é possível aumentar a qualidade do produto, reduzindo sua variabilidade e conseqüentemente reduzindo a incorrência de perdas, sem que seja necessária a realização de investimentos significativos no processo (TAGUCHI *et al.*, 2005).

Para entender melhor como chegamos a esse resultado, vamos observar a figura 2 que ilustra em diagrama de blocos o funcionamento de um sistema genérico. O sinal de entrada (M) é transformado em um processo e gera uma saída (Y) que



representa o desempenho do sistema. Este processo é regido por parâmetros do projeto (x_1, x_2, \dots, x_n) e pelos fatores não controláveis Z (z_1, z_2, \dots, z_p). Esses fatores controláveis e não controláveis atuarão sobre o sistema influenciando diretamente o nível de desempenho da saída. (MONTGOMERY, 2014)



Fonte: Traduzido de Yang & El-Haik (2003, p. 438)

Taguchi (2000) define robustez como "o estado em que a tecnologia, o produto ou o desempenho do processo são minimamente sensíveis a fatores que causam variabilidade (seja na fabricação ou no ambiente do usuário) e no envelhecimento no menor custo de fabricação da unidade". Para compreender melhor a engenharia robusta, é necessário explorar um pouco melhor esses fatores que influenciam um sistema, conforme mencionado acima. Nesse sentido, Phadke (1995) classifica esses parâmetros em três categorias, como segue:

- Fator de sinal (M): São os parâmetros definidos pelo usuário ou pela engenharia de produto, para expressar o valor desejado para determinada resposta. Por exemplo, em um sistema de freios, a quantidade que se aperta o pedal, define a distância que o carro vai frear.
- Fator de ruído (Z): São os parâmetros que não podem ser controlados pelos projetores, porque são impossíveis de controlar ou porque são muito caros de controlar. Eles afetam significativamente o desempenho do sistema, fazendo com que a resposta desvie do valor designado pelo sinal, incorrendo em perda de qualidade.
- Fator de controle (x): São os parâmetros que permitem estabelecer controles. Cada um desses fatores pode assumir muitos valores, o que chamamos de níveis. É papel do projetista do processo definir o nível ideal dos fatores de controle que maximizem o desempenho do sistema.



O ponto central da técnica do Taguchi é o uso do projeto de parâmetros, que se consiste em “um método de engenharia para design de produtos ou processos que se concentra na determinação de parâmetros (fator) que produzem os melhores níveis de uma característica de qualidade (medida de desempenho) com variação mínima” (KARNA & SAHAI, 2012). Para estudar essa variação, precisa-se de uma relação que demonstre o quanto uma característica é desviada do objetivo pela ação dos ruídos, a relação Sinal Ruído será melhor explorada a seguir.

2.2.1 O conceito de Sinal Ruído

Na engenharia de telecomunicações a razão Sinal / Ruído é uma medida de desempenho de circuitos elétricos. Em um sistema de comunicação, um sinal (M) é emitido e em um caso ideal, o valor de saída (y) será exatamente como desejado. Na prática, esse sinal está sob a influencia de diversos ruídos (R), fazendo com que a resposta tenha variação ao longo do tempo. Para se obter um sistema de comunicação excelente, o sinal deve sofrer a mínima variabilidade desses ruídos, gerando maior confiabilidade da resposta (YANG & EL-HAIK, 2003).

A razão S/R envolve diferentes relações conforme as características de qualidade da função de perda do sistema, citadas no item 2.1.1. Seu valor é calculado de forma diferente para cada característica por meio de uma equação derivada das equações mencionados no tópico acima referido. O objetivo do cálculo consiste em encontrar a configuração que apresente o maior valor para a relação S/R, demonstrando assim que o impacto do ruído foi o menor possível sobre o valor do sinal. Conforme relatado em Taguchi (2005), essas relações são as apresentadas nas equações de 4 a 6:

- Nominal Melhor

$$\frac{S}{R} = -10 \log (y_i^2) \quad (4)$$

- Menor Maior

$$\frac{S}{R} = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^2) \quad (5)$$

- Maior Melhor

$$\frac{S}{R} = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{y_i^2} \right) \quad (6)$$

Em que,



- $\frac{S}{R}$ é a razão sinal ruído
- y é a característica de desempenho do produto
- n é o número de unidades

O controle de qualidade nas fases de desenvolvimento de produto, caracteriza uma ação que taguchi chamou de ‘controle de qualidade *off-line*’, enquanto esse controle durante a produção seria chamado de ‘controle de qualidade *on-line*’. Conforme enunciado por Almeida & Toledo (1989), o controle *on-line* é realizado por meio de procedimentos de controle de qualidade na produção, enquanto a principal característica do controle de qualidade *off-line* é a condução de experimentos através de uma matriz ortogonal para identificar a condição que otimiza a relação sinal ruído. Essas matrizes permitem projetar experimentos de modo que cálculos estatísticos consigam gerar conclusões sobre o sistema, guiando a decisão sobre os parâmetros ideais. Entenderemos um pouco mais sobre essas matrizes ortogonais a seguir.

2.2.2 Arranjos ortogonais

Para compreender realmente o comportamento de um processo e suas relações de causa e efeito é necessário que se altere deliberadamente as variáveis e observe as mudanças que essas modificações produzem, ou seja, é necessário conduzir experimentos. Assim, o projeto estatístico de experimentos é o “processo de planejamento do experimento para que dados apropriados sejam coletados e analisados por métodos estatísticos, resultando em conclusões válidas e objetivas” (MONTGOMERY, 2014).

O projeto de experimentos é organizado por meio de uma matriz experimental, em que cada linha representa um tratamento, ou seja, um experimento a ser realizado. Por exemplo, em um processo com 8 fatores, cada um com 3 níveis, são possíveis 8^3 combinações, o que nos dá 6561 tratamentos. Com o objetivo de reduzir o número de experimentos necessários para chegar a uma resposta, taguchi desenvolveu o conceito de arranjos ortogonais. Segundo Yang & El-Haik (2003), um arranjo ortogonal consiste em uma fração da matriz de experimentos que é ortogonal e balanceado. Adicionalmente, Park & Lee (2006) dizem que “um arranjo ortogonal é uma matriz experimental simples para determinar os efeitos dos fatores, ignorando



as altas interações entre os fatores”. Nesse sentido, o exemplo anterior poderia ser executado em um arranjo ortogonal com 18 combinações. A utilização desses arranjos gera economias significativas de tempo e recurso, sem prejudicar substancialmente a análise.

Para a construção do arranjo do experimento é necessário que se identifique todos os fatores de controle que se deseja experimentar. Geralmente seleciona-se aqueles que conhecidamente exercem impacto sobre a saída analisada ou aqueles que se deseja saber seu impacto no processo. Posteriormente deve-se selecionar os fatores de ruídos a serem experimentados. É importante considerar aqueles que são possíveis variar sistematicamente, de forma que torne o processo de experimentação possível. Cada tipo de fatores e seus níveis são agrupados em arranjos ortogonais. O experimento consiste então na combinação entre essas matrizes. (ALMEIDA & TOLEDO, 1989)

Após a elaboração do arranjo, os experimentos são conduzidos e as respostas são utilizadas para a análise estatística. Essa análise é feita por meio de uma análise de variância (ANOVA), buscando compreender nível de variabilidade causada na resposta por cada alteração nos fatores.

2.2.3 Análise de variância (ANOVA)

A análise de variância é um procedimento para isolar fontes de variabilidade em um conjunto de dados. O objetivo consiste em identificar se o efeito de alguma variável independente pode ser considerado significativo. O procedimento de análise é realizado a partir da coleta repetida de medidas envolvendo o mesmo grupo de fatores. O número de medidas necessárias será um valor múltiplo da quantidade de níveis combinados dos fatores, o que chamamos de tratamento (GIRDEN, 1992).

O nome análise de variância deriva do procedimento de analisar a variabilidade total de um grupo de dados separando-o em suas componentes individuais, a variância entre os tratamentos e a variância dentro de cada tratamento.

A medida da variabilidade total é calculada por meio da equação 7, usando a soma das variabilidades entre e dentro dos tratamentos (MONTGOMERY, 2014).

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \quad (7)$$



Na metodologia Taguchi, utiliza-se da análise de variância para determinar se os fatores são estatisticamente significativos para a variável resposta analisada. Caso haja divergência entre os valores de media lidos entre os tratamentos após o experimento, pode-se confirmar os fatores que impactam isoladamente no valor da variável resposta. Sendo assim, é de grande importância encontrar seu nível ideal de configuração. No caso contrário, em que as se apresentam iguais, é possível concluir que esses fatores não têm efeito sobre a variabilidade da resposta, de forma que o nível escolhido seria indiferente na configuração do processo.

A análise de variância é o procedimento matemático por meio do qual se permite identificar a significância dos fatores em relação a alterações no processo. Combinada com a análise da razão S/R, ela permite identificar quais fatores merecem maior atenção e em quais níveis esses fatores devem ser configurados. Para resumir todas as etapas até a conclusão sobre os fatores, o procedimento sequencial de aplicação da metodologia taguchi está resumido no item 2.2.4.

2.2.4 Etapas de aplicação da metodologia robusta

A metodologia taguchi é executada de forma sequencial, uma vez que se conhece o processo a ser otimizado, seus efeitos colaterais e modos de falha, cada passo determina uma etapa que prepara os dados para a etapa seguinte. Porém, esta sequência pode se dar em diferentes combinações, o que dá certa liberdade para o executor da metodologia. Com o intuito de guiar o desenvolvimento desta pesquisa, elaborou-se uma combinação resumida das propostas de alguns autores (Taguchi *et al.*, 2005; Phadke, 1995; Yang e El-Haik, 2003; Karna & Sahai, 2012; Park & Lee, 2006) quanto a sequencia e forma de execução da metodologia, conforme esta apresentado abaixo:

Etapa 1: A metodologia se inicia pela identificação da função principal do sistema. É importante desenhar um gráfico que identifica todas as entradas, o processamento de energia e as saídas do processo. É também nesta etapa que identificamos a variável resposta a ser lida no experimento. Deve-se buscar a variável que melhor demonstra o desempenho do sistema e que seja de fácil quantificação. Então identificamos o objetivo da função: minimizar, maximizar ou atingir um valor alvo.



Etapa 2: Conhecendo o processo e a variável resposta, é hora de identificar quais fatores envolvidos no processo afetam essa resposta. Primeiramente analisa-se os fatores que podem ser configurados e controlados no processo. Então deve-se observar quais níveis podem ser configurados e carecem de ser estudados. Quando não se sabe se um fator impacta significativamente ou não a resposta, deve-se coloca-lo no sistema e experimenta-lo de forma que a análise da ANOVA possa determinar seu grau de impacto.

Etapa 3: Uma vez que se conhece a função do sistema, os fatores de controle, a variável resposta e seu objetivo, resta apenas compreender quais fatores causam desvios no desempenho desta função. Deve-se analisar quais os ruídos realmente impactam no processo e entender em quais níveis eles ocorrem. Esta etapa exige certo cuidado, os ruídos analisados precisam ser controlados pelo menos durante o momento do experimento. Caso isso não seja possível, a ANOVA fica comprometida, correndo o risco de não representar a realidade.

Etapa 4: Para montar o experimento, deve-se alocar os fatores e seus respectivos níveis em um arranjo ortogonal. De forma que se conheça as combinações necessárias para viabilizar uma análise de variância com confiabilidade suficiente para se entender o impacto de cada fator isolado na variável resposta. Para um número de fatores e níveis são possíveis, diversos arranjos ortogonais, com maior ou menor quantidade de tratamentos. A escolha depende do nível de confiabilidade que se deseja obter do experimento. Os arranjos ortogonais para cada caso podem ser encontrados em softwares de apoio, como o Minitab 16 usado neste experimento.

Etapa 5: Tão importante quanto compreender o processo, é elaborar um meio de experimentação o mais fiel a ele possível. Nesta etapa, elabora-se o procedimento de experimentação de modo que ele seja cuidadoso para que todas as condições reais sejam representadas no momento do experimento. Só assim é possível garantir confiabilidade ao resultado obtido após a aplicação da metodologia.

Etapa 6: Esta é a etapa de análise dos dados. Após a execução do experimento, os dados são alimentados no software para a análise. Este, calculará uma ANOVA e o valor de S/R. Inicialmente deve-se observar quais fatores impactam significativamente a resposta. Isso pode ser feito por meio da comparação do P valor. Caso este seja menor que 0,05, então pode-se afirmar que esse fator impacta



com 95% de confiabilidade. Sabendo disso, deve-se observar a razão S/R para cada fator de forma a chegar nos níveis ótimos de desempenho, que são os níveis que maximizam essa razão.

Etapa 7: Por fim, após prever os níveis ótimos deve-se realizar o experimento de confirmação. Este é realizado testando a combinação que maximiza a razão S/R e identificando se ela efetivamente produz menor variabilidade, como desejado. Caso se confirme que a combinação não apresenta o desempenho desejado, deve-se retornar ao passo 1 e rever todo o processo.

2.3 Pintura eletrostática de alta temperatura

A pintura eletrostática é uma forma de garantir tratamento, revestimento e decoração de uma superfície metálica. Ela conta com a vantagem de conferir flexibilidade a peça sem ofender o substrato. Em um processo de pintura eletrostática de alta temperatura, utiliza-se um pó químico ou fluido que recebe uma carga elétrica oposta à da peça, fazendo com que ele se fixe na mesma. Após tal procedimento, a peça é levada a uma estufa a uma temperatura entre 200°C a 230°C. Quando a estufa aquece, a tinta se liquefaz e posteriormente endurece, formando uma película de alto acabamento, uniformidade e resistência (FAZENDA, 2005).

2.3.1 A camada de tinta

A camada final da tinta é, na verdade, composta pela aplicação de 3 camadas de materiais químicos diferentes. Su *et al.* (2014) explica que a primeira camada consiste de um preparo que protege o substrato metálico contra corrosão. Em seguida, é aplicado o *primer* que tem como função promover a adesão entre a primeira camada e a seguinte, além de suavizar a rugosidade da superfície. A camada final, chamada de *top coat*, fornece a cor para todo o sistema de pintura. É devido a essa camada que é possível identificar diferentes cores nas máquinas produzidas pela empresa estudada.

O processo de aplicação dessas camadas é delicado pois, a realização de um procedimento impreciso, pode gerar defeitos em quaisquer uma das camadas citadas. Para Jozsef & Blaga (2015), não-conformidades visuais da camada de tinta são aqueles defeitos que causam impacto e desconforto visual, quando presentes



na superfície do produto. Estas podem derivar de diversas fontes, como má qualidade de matéria prima, característica da tinta imprópria para dobraduras ou camada de tinta com espessura imprópria.

Neste estudo, concentraremos nossos esforços em avaliar aqueles defeitos provenientes de variabilidade na espessura da camada de tinta. Para caracterizar não conformidade, em geral o valor medido não deve ser inferior a 80% da espessura mínima requerida. Genericamente, é necessário que os parâmetros projetem uma espessura entre 60-90 microns (JOZSEF & BLAGA, 2015). Souza (2015) resume o entendimento de diversos autores quanto aos defeitos provenientes desta variabilidade, os principais estão citados abaixo:

- Falta de tinta: Caso em que, mesmo sem usar um dispositivo de medição de espessura, pode-se notar uma sombra desigual e a aparência da tinta, diferente da do produto padrão (> 48 microns).
- Casca de laranja: Nesse caso, a superfície pintada adquire uma aparência rugosa como a casca de uma laranja devido a um desnivelamento da película de tinta. Esse defeito pode ser causado por evaporação muito rápida do solvente, temperatura muito elevada, pressão de ar inadequada e principalmente por uma camada de tinta excessiva. (< 108 microns)
- Escorrimento: Refere-se à formação de acúmulos de tinta em uma superfície vertical. É causado por fatores como baixa pressão do ar, tinta com baixa viscosidade, aplicação sobre superfícies muito lisas e principalmente devido a aplicação de camadas muito espessas. Esse fenômeno está ilustrado na figura 3.
- Fervura: É caracterizada pela formação de bolhas na superfície que podem ser observadas após a cura da tinta. As bolhas são causadas por uma evaporação muito acelerada dos solventes através do revestimento da tinta. Ocorre quando se utiliza de técnicas de secagem mais rápida ou alta temperatura ambiente.

Figura 3 - Aspecto visual dos principais defeitos de camada





Fonte: A autora.

A ocorrência desses defeitos depende de uma série de fatores que de forma combinada determinam a qualidade da pintura. Para compreender a atuação desses fatores, se faz necessária uma breve explanação sobre o processo de pintura eletrostática em si.

2.3.2 Fatores que impactam no sistema de pintura

A aplicação eletrostática tem como fundamento a geração de uma diferença de potencial entre a superfície a ser pintada e a tinta. A atração gerada por esse fenômeno pode chegar a uma diferença de potencial de aproximadamente 100 kVolt (HINES, 1996).

O processo de deposição das partículas no substrato pode ser descrito da seguinte forma:

“As partículas de tinta, resinas e pigmentos, migram inicialmente para os lugares de maior intensidade do campo elétrico, neles se depositando. A camada assim formada é uniforme em toda a superfície, salientando-se a ótima cobertura de cantos, pontas e arestas, o que não pode ser conseguido por nenhum outro processo de pintura” (SOUZA, 2015 apud PIEROZAN, 2001, p. 35).

A matéria-prima utilizada na aplicação eletrostática pode ser tanto a tinta no estado líquido como em pó e o modo da aplicação eletrostática pode ser manual, por meio da pistola convencional, ou automático, através de um equipamento robotizado (FAZENDA, 2005). Este trabalho concentra-se em estudar um processo convencional, ou seja, a pintura eletrostática de alta temperatura é executada de forma manual.

No sistema de pintura estudado, o operador deve ser experiente e bem treinado para coordenar a velocidade de aplicação de forma que a quantidade precisa de tinta seja depositada em cada parte do substrato, evitando assim a ocorrência dos defeitos acima mencionados. É esperado que sejam aplicadas duas camadas do fluido, a uma distância média de 30 centímetros da peça. Depois desse processo, a peça pintada deve ser levada a uma estufa para curar o filme de tinta e conferir uniformidade na superfície aplicada.



Entre os diversos fatores que podem impactar significativamente a uniformidade da camada de tinta estão a pressão definida para o líquido, a viscosidade da tinta, a concentração de aditivos na formulação, a pressão do ar nos bicos da pistola de tinta, a tecnologia dessa pistola, a vazão do fluido, o diâmetro do bico, o tipo de capa da pistola, a temperatura da cabine de pintura, a velocidade da linha de produção e distância da pistola até a peça (FAZENDA, 2005). Cada um desses parâmetros necessita ser cuidadosamente estudado para identificar seus possíveis impactos no caso da mudança da formulação da tinta no processo.



3 Metodologia de pesquisa

A engenharia robusta é uma técnica que exige planejamento sistemático para sua aplicação. Assim, este capítulo apresenta a classificação do procedimento metodológico desta pesquisa, seguida da descrição do planejamento do sistema de coleta de dados e do sistema de análise de dados.

3.1 Classificação da pesquisa

Este trabalho é classificado como uma pesquisa quantitativa que, segundo Creswell (2007), é o tipo de pesquisa que envolve experimentos reais. Complementarmente, Gil (2002) classifica esse tipo de pesquisa como experimental, um tipo de estudo científico que envolve investigação de diferentes cenários. No caso deste trabalho, utiliza-se um delineamento experimental que Gil (2002) define como uma análise em que são selecionadas as variáveis que influenciam o objeto de estudo e mensurados seus efeitos. O objetivo final de um estudo experimental é definir formas de controle e de observação dos efeitos provocados por estas variáveis no objeto de estudo. Neste caso, estudaremos os efeitos de parâmetros de controle do processo de pintura na uniformidade da camada de tinta, com o objetivo de encontrar a configuração desses parâmetros que gere menor variabilidade no processo e conseqüentemente, maior garantia de atendimento às necessidades do consumidor. Este tipo de pesquisa deve seguir um planejamento e uma ordem sequencial de coleta de informações e análises de dados.

3.2 Sistema de coleta de dados

Os dados desta pesquisa foram coletados em 2 fases. A primeira fase correspondeu a atividade de mapeamento do processo de pintura na empresa estudada, buscando compreender o sequenciamento das atividades e os diversos parâmetros envolvidos. Enquanto a segunda etapa foi composta pela efetiva realização dos procedimentos experimentais com as diversas configurações possíveis para o processo. Todos os dados coletados serviram de base para tomada de decisão quanto ao melhor cenário do processo.

A primeira fase foi realizada durante 2 meses com o objetivo de mapear e descrever os sistemas e subsistemas do processo de pintura. A atividade consistiu



em realizar o levantamento de todas as variáveis correlacionadas com a espessura da camada de tinta. A fonte primária de informações para esse levantamento foram os projetos anteriormente realizados nesta área, o que tornou possível elaborar uma visão ampla do processo. De posse da análise inicial, foram realizadas entrevistas abertas com o time técnico responsável pela execução do projeto com foco em consolidar as principais etapas do processo de pintura e selecionar as variáveis que efetivamente exercem maior influência sobre o resultado final.

A segunda fase durou mais 2 meses e consistiu em experimentar diferentes combinações de configurações dos parâmetros de processo de pintura. Para isso, foi elaborado um procedimento experimental, um guia descritivo sobre todas as etapas de experimentação. A maior preocupação dessa fase foi garantir que os dados coletados representassem de forma mais fiel possível a realidade do processo de pintura da empresa. Assim, a experimentação aconteceu em corpos de prova acoplados em um suporte, de forma a garantir uma distância segura para evitar contaminação entre as pinturas. Só então, foi realizado o procedimento de pintura, executado por dois operadores diferentes e configurados com diferentes parâmetros de processo, a fim de permitir a comparação dos resultados. Ao final da pintura, os corpos de prova seguiram para a estufa onde foi realizado a cura da tinta. Depois de o filme de tinta estar pronto, estes seguiram para o laboratório para que fossem coletadas, por meio de um medidor de camadas, as medidas de espessura das camadas de tinta que permitiram a efetiva análise dos resultados.

3.3 Sistema de análise de dados

Após a realização da pintura com diferentes parâmetros em cada corpo de prova, os dados de espessura de camada coletados foram analisados com o auxílio de um software de análises estatísticas, o Minitab 16. Este software dispõe de uma funcionalidade para análise de experimentos projetados e contempla a execução do método taguchi. Ao indicar a quantidade de fatores a serem considerados no estudo e seus respectivos níveis, o software apresenta opções de arranjos ortogonais possíveis e retorna à sequência de tratamentos que devem ser experimentados. Ao final da coleta de dados, os valores são inseridos no software como resposta dos respectivos tratamentos, permitindo a comparação entre os resultados.



O objetivo principal desta metodologia é analisar a relação S/N em cada tratamento, permitindo identificar a combinação que representa o menor grau de variabilidade do processo em relação aos fatores de ruídos. Um outro cálculo relevante que o software pode realizar é o valor da ANOVA do arranjo ortogonal experimentado. Esse número nos permite identificar o nível de significância que cada parâmetro estudado exerce sobre a resposta mensurada. O software possibilita ainda o cálculo de outros indicadores relevantes para interpretação do comportamento do processo, como os valores de medias, desvios padrão, residual, entre outras análises.



4 Caso prático

Este capítulo dedica-se ao desenvolvimento do problema de pesquisa, iniciando com a descrição do contexto da pesquisa e do processo em estudo. Em seguida apresenta-se os dados coletados, como o mapeamento do processo de pintura eletrostática de alta temperatura, a seleção dos parâmetros controláveis, dos não controláveis e do arranjo ortogonal. Por fim, apresenta-se a análise dos dados.

4.1 Descrição do contexto da pesquisa e do processo em estudo.

O processo de pintura analisado neste estudo é realizado por uma empresa montadora de máquinas para as indústrias de mineração e construção civil. Sendo assim, as máquinas produzidas são preparadas para trabalho intensivo com materiais pesados e volumosos, e em condições climáticas intensificadas. Portanto, estas máquinas exigem características de pintura compatíveis com tais condições, resistentes e capazes de proteger o substrato da peça.

Isso porque paralelamente ao aspecto estético, a pintura exerce um papel relevante de proteção em relação ao substrato em que foi aplicada. É a tinta quem garante menor exposição do metal ao oxigênio, evitando oxidação, e ao intemperismo, evitando corrosão e outros desgastes. Tal proteção é conferida especialmente pela resina, um composto químico da tinta que atua como uma proteção dos raios UVA e UVB, retardando a degradação dos outros materiais dos quais a tinta é composta. Quando a peça está exposta a condições solares intensas, esses raios atuam primeiramente sobre a resina, e apenas quando esta perde suas características é que esses raios vão atuar sobre as outras camadas do *top coat*. A característica visual pela qual se percebe o nível de desgaste da resina é a retenção de brilho, ou seja, a aparência de superfície polida. Ao longo do tempo em que o produto fica exposto as características de intempéries, a superfície vai perdendo seu brilho e se tornando cada vez mais opaca e, conseqüentemente, mais frágil. Com o passar do tempo, a resina vai se degradando e expondo os outros elementos da tinta que pode vir a perder adesão, deixando a peça de aço exposta e vulnerável à corrosão.

Para testar a resistência da tinta aplicada ao intemperismo, os laboratórios utilizam de um teste chamado *weather-o-meter*, que acelera e intensifica essas



condições para observar a capacidade de retenção de brilho da tinta ao longo do tempo. Em uma análise de concorrentes, a empresa estudada concluiu que sua tinta apresentava menor capacidade de retenção de brilho em relação a um concorrente. Uma vez que isso poderia vir a representar uma menor qualidade da máquina, identificou-se uma oportunidade de melhoria, com foco no desenvolvimento de uma nova formulação química para a tinta, de forma que sua característica de resistência se tornasse mais competitiva.

Uma vez tomada a decisão de alteração das características físico químicas da tinta, a configuração do processo deveria ser reestudada, a fim de garantir sua confiabilidade. Isso porque, o processo de aplicação de tinta é realizado de forma manual, o que implica em um nível de variabilidade acima do desejado. Nesse processo, o operador é responsável por acionar e mover a pistola de tinta provocando a cobertura da peça. A consequência disso é que, não raramente, se encontram peças com defeitos na camada de pintura, o que afeta diretamente a percepção do cliente quanto à qualidade do produto. Portanto, a oportunidade de gerar uma melhoria no produto, por meio de uma inovação traz consigo os desafios de configuração dos parâmetros de processo que devem ser cuidadosamente estudados. O processo de pintura de alta temperatura depende de variáveis que vão afetar diretamente a uniformidade da camada de tinta e a característica de proteção que esta vai oferecer ao substrato. A engenharia robusta permite planejar a minimização da ocorrência de defeitos no processo, antes mesmo da nova tinta ser implementada.

4.2 Apresentação dos dados

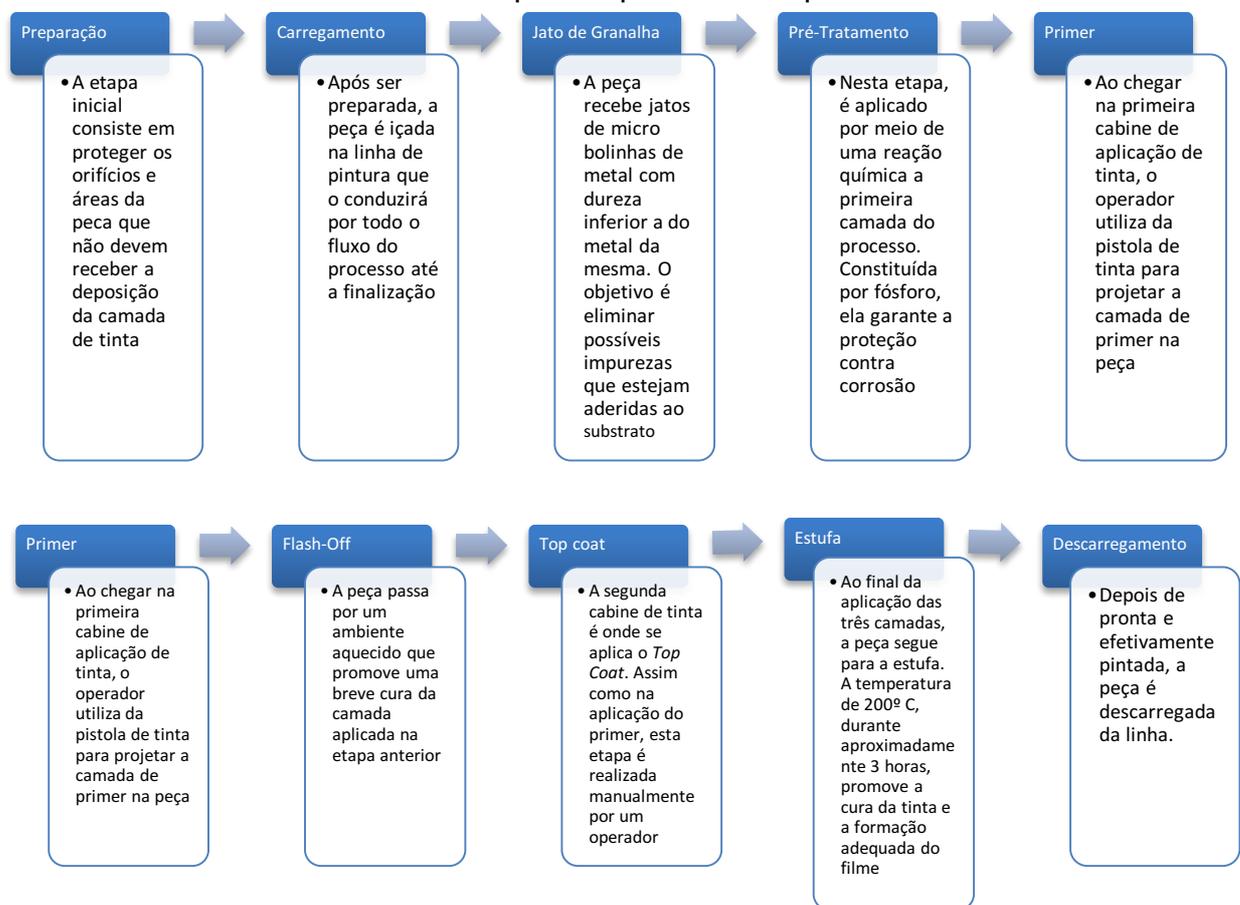
4.2.1 Mapeamento do processo de pintura eletrostática de alta temperatura

O processo de pintura é um processo delicado, composto por diversas etapas de preparações, aplicações e cura da tinta. É possível executar essas etapas de muitas maneiras diferentes, dependendo do tipo de tecnologia e do tipo de material a ser pintado. Dessa forma, cada empresa adota a execução da pintura de maneira particular, atendendo a suas necessidades e restrições.



Na empresa estudada, o processo é desenhado para realizar a pintura em peças com dimensões que podem chegar a até 2 metros. Além disso, há uma grande variabilidade entre os formatos das diversas partes a serem pintadas. Essas particularidades tornam inviáveis processos mais automatizados ou pintura por imersão. Assim, a aplicação da tinta por meio da pistola eletrostática se demonstra a melhor escolha para esta empresa. O mapeamento deste processo está descrito na tabela 1.

Tabela 1 - Etapas do processo de pintura



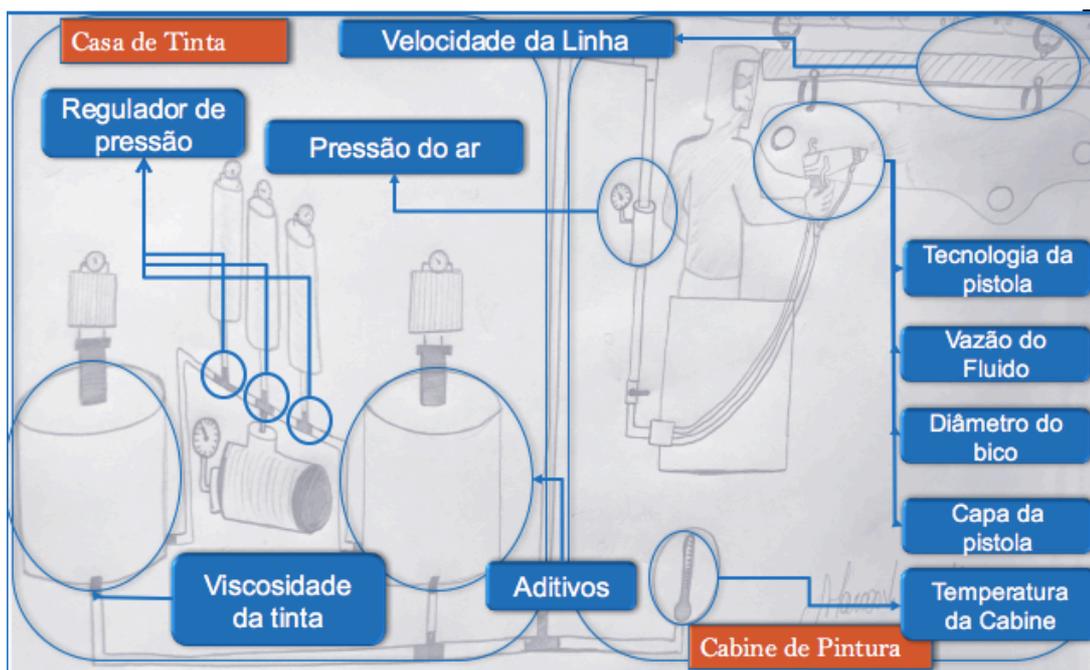
Fonte: A autora.

Uma vez que o foco do estudo se concentra no estudo das imperfeições de camada, há a necessidade de compreender melhor as etapas de aplicação efetiva da tinta no substrato. Conforme descrito na tabela 1, essas etapas começam com o pré-tratamento, em seguida tem-se a aplicação do *primer* e por fim a efetiva aplicação do *top coat*. Sendo a última etapa, a mais crítica para as características de defeitos visuais.



Estas etapas do processo ocorrem na cabine de pintura, que é o local onde o operador fica, elevado por uma plataforma móvel, segurando a pistola de tinta. As peças são movidas pelo transporte aéreo a uma velocidade constante. Anexa a cabine de pintura, está a casa de tinta, a sala onde a tinta é misturada para alimentar o processo de pintura. A figura 4 mostra um esquema dessas áreas, destacando a localização de atuação dos parâmetros da pintura. Na casa de tinta, podem ser configurados os parâmetros de pressão do líquido, viscosidade da tinta e aditivos. Já na cabine de pintura, os parâmetros são velocidade da linha, pressão de ar, tecnologia da pistola de tinta, vazão do fluido, diâmetro do bico, capa da pistola de tinta e temperatura da cabine.

Figura 4 - Esquema representativo dos parâmetros envolvidos no processo de pintura



Fonte: A Autora.

Na aplicação do *primer* e do *top coat*, a peça chega a cabine após passar por um *flash off* que inicia a secagem do *primer*. O operador fica suspenso em uma plataforma e segura a pistola de tinta na mão no momento da aplicação. O jato de tinta deve passar cerca de três vezes em cada área para uma cobertura adequada. Deve haver um cuidado com a distância de aplicação porque esta influencia a concentração da tinta. Uma distância adequada é que a pistola esteja a 30 centímetros da peça. Uma distância maior, pode resultar em falta de tinta no local.



Enquanto uma distância menor pode resultar em escorrimento de tinta. A figura 5 ilustra o momento da aplicação do *primer* em que o operador segura a pistola de tinta a 30cm da peça.

Figura 5 - Operador executando a aplicação do *primer*



Fonte: A autora.

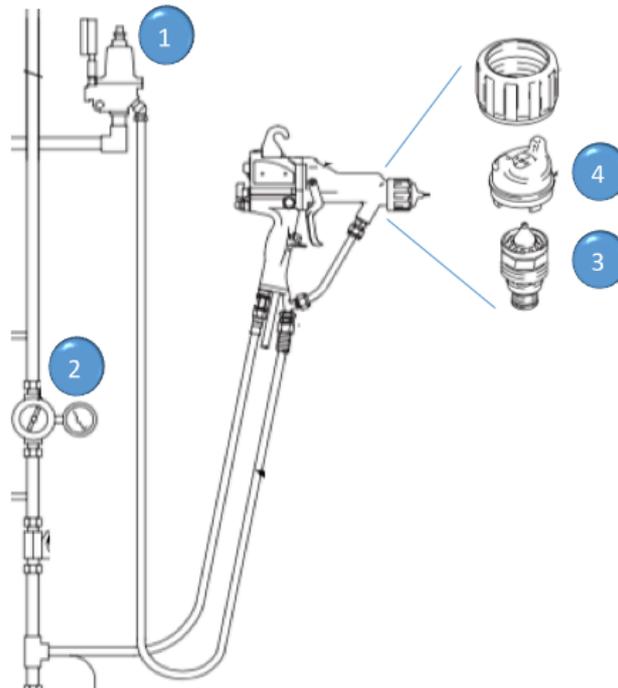
Um dos grandes desafios do processo analisado é a geometria das peças que em geral são complexas, com curvas, dobras e cantos de difícil acesso. Isso adiciona particularidades na atividade de pintura, uma vez que o operador deve mudar de posição repetidas vezes para cada peça para alcançar os cantos mais difíceis. A consequência é o agravamento das variabilidades no processo, porque é exigido do operador efetuar os cálculos de distância e velocidade de aplicação a cada mudança de posição. Esses parâmetros são incontroláveis, porque não se pode garantir a acuracidade do valor. Para garantir o melhor resultado na camada de tinta, deve-se buscar a configuração dos parâmetros controláveis que sofre menor influência dos parâmetros que dependem do operador.

4.2.2 Definição dos parâmetros controláveis

Após o mapeamento do processo, buscou-se a identificação dos parâmetros controláveis no processo de pintura. Uma das fontes de informação estudada foram os projetos anteriores realizados na área, que permitiram identificar uma configuração ideal considerando a característica da tinta utilizada antes da melhoria

na formulação. Por exemplo, para evitar entupimentos no sistema, é interessante que se utilize a pressão do fluido no valor máximo. Quanto à temperatura da cabine, este é um valor constante e inviável de ser alterado. Já em relação à viscosidade da tinta e a concentração de aditivos, são parâmetros que devem seguir as recomendações do fabricante. A tecnologia da pistola de tinta, foi considerado um parâmetro inviável para avaliação, uma vez que havia sido feito um investimento recente na modernização do sistema. Por fim, restaram quatro parâmetros cujas configurações ideais se desconheciam: a vazão de fluido de tinta, a pressão do ar, o diâmetro do bico da pistola e a capa da pistola. A figura 6 ilustra a relação desses parâmetros com o processo de pintura.

Figura 6 - Parâmetros da pistola eletrostática



Fonte: Adaptado do manual da Graco PSX4

Buscando maior conhecimento sobre o funcionamento dos parâmetros restantes, os operadores foram entrevistados e chegou-se a seguinte descrição de cada um deles:

1. **Vazão do fluido:** A vazão da tinta é regulada por uma espécie de torneira. Quanto mais aberta, mais fluido passa para a mangueira e chegará até a pistola de tinta. Quanto maior o volume de vazão, há a tendência de ser mais espessa a camada. Isso porque em menos tempo, seria depositada uma quantidade maior de material.



- Pressão do ar:** Há uma bomba que leva o ar pela mangueira até a pistola. Esse ar é responsável por espalhar as gotículas de tinta, formando um leque. Quanto maior a pressão do ar, mais ampla é a formação do leque e com isso a camada se torna mais dispersa. Enquanto menores valores de pressão, geram um leque mais estreito, provocando maior concentração de material.
- Bico:** O bico da pistola é uma estrutura de aplicação por onde o líquido é jateado. Ele é responsável pela atomização da tinta, pela linearidade da aplicação e pelo equilíbrio na estrutura das camadas. O diâmetro do bico influencia muito na qualidade da camada. Isso porque um diâmetro menor tende a concentrar o jato de tinta, assim como um diâmetro maior tende a espalhá-la mais.
- Capa:** A capa da pistola é o componente da estrutura de aplicação responsável por liberar o jato de ar. Existem diferentes modelos no mercado e cada um pode gerar um formato de leque diferente. O fato a ser observado é que alguns jatos podem causar irregularidades na dispersão da camada ao longo da extensão da peça.

Para cada um dos fatores citados acima, foram associados os respectivos níveis relativos a configuração do processo, conforme mostra a tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de controle

	Vazão de Fluido (ml/min)	Pressão de ar (bar)	Tipo de Capa	Diâmetro do Bico (mm)
Nível 1	350	5.1	24N477	1
Nível 2	500	5.5	24N479	1.2
Nível 3	-	6	-	1.5

Fonte: A autora.

Os níveis de cada parâmetro foram selecionados de forma a contemplar as faixas mais prováveis de utilização, de acordo com a experiência de processo dos operadores. Para a vazão de fluido, optou-se por selecionar um valor extremo e um valor intermediário na possível faixa de configuração da máquina de forma a se estudar a sensibilidade do processo em relação a este parâmetro. Assim, um valor alto seria a máxima vazão do sistema 500 ml/min, em contraponto foi selecionado um valor intermediário de 350 ml/min. A pressão de ar foi testada de acordo com as



únicas possibilidades de configuração permitidas pela máquina, que são os valores de 5.1 bar, 5.5 bar ou 6 bar. Quanto as capas e bicos, existe grande diversidade desses produtos no mercado. Para a pistola de tinta utilizada pela empresa estudada haviam disponíveis os modelos de capas 24N477 e 24N79 e de bicos de 1 mm de diâmetro, 1.2 mm e 1.5 mm fornecidos pelo mesmo fabricante da pistola de tinta.

4.2.3 Definição dos parâmetros não controláveis

Após a seleção dos parâmetros controláveis a serem estudados, aprofundou-se na análise dos ruídos que afetam o resultado do procedimento de pintura, sabendo que estes estão diretamente associados ao operador. Isso porque um processo automático garante um certo nível de confiabilidade por possuir altos controles. Enquanto um processo manual, está sujeito a uma grande variabilidade associada a dificuldade humana de repetir precisamente um comportamento.

Essas variabilidades podem ser minimizadas à medida que o operador adquire expertise do processo. A experiência na aplicação do *primer* e da tinta gera maior conhecimento do operador sobre o comportamento da camada em relação as diferentes distâncias, velocidades e ângulos de aplicação. Com o desenvolvimento dessas habilidades, torna-se mais fácil manter a camada aplicada na superfície mais uniforme. Visando potencializar esse processo, a empresa definiu que o treinamento do operador de pintura deve começar seu treinamento na aplicação do *primer*, onde este deve atuar por no mínimo dois anos. Após esse período, ele pode ser efetivamente treinado para aplicação da camada mais superficial, o *top coat*.

Em resumo, o operador mais treinado tende a conseguir uma camada de tinta mais uniforme. O caso contrario também é verdadeiro, uma vez que o operador menos treinado tende a produzir uma camada com maior índice de defeitos. A título de experimentação, é importante representar os casos extremos do ruído de forma a evidenciar a configuração dos parâmetros controláveis que sofre menor interferência destes. Na prática, buscamos encontrar a configuração desses parâmetros que gera um valor de camada mais próximo do outro quando pintada por um operador experiente e por um operador menos experiente. Isso representa uma menor vulnerabilidade do processo em relação as variáveis não controláveis.



Sendo assim, foram selecionados dois operadores de acordo com suas habilidades para executar o procedimento experimental. Para julgar essa classificação, os operadores passaram por uma bateria de testes de habilidades manuais de forma a identificar o operador mais habilidoso e o menos habilidoso. Assim, de acordo com o arranjo ortogonal selecionado, cada operador estaria escalado para realizar a pintura de metade dos corpos de prova.

4.2.4 Seleção do arranjo ortogonal

Para acomodar um experimento com 4 fatores, foi escolhido um arranjo ortogonal L18. Esse tipo de arranjo comportaria 3 fatores de 3 níveis e 1 fator de 2 níveis. Uma vez que o experimento analisado neste trabalho tem 2 fatores com 2 níveis e 2 fatores com 3 níveis, utilizou-se uma técnica chamada tratamento *dummy* (ROSS, 1991). Ela permite simular apenas dois níveis em uma coluna inicialmente desenhada para acomodar 3, de forma que o valor de um dos níveis deve ser testado apenas repetindo um nível já alocado.

Os valores selecionados para os níveis de cada fator foram inseridos no Minitab. Como resposta, obteve-se a matriz de experimentos que descreve a combinação de cada tratamento. A tabela 3 demonstra o resultado final dos fatores acomodados em um arranjo L18.

Tabela 3 - Matriz de experimentos



Vazão	Pressão	Capa	Bico
350	5.1	24N477	1
350	5.1	24N479	1.2
350	5.1	24N479	1.5
350	5.5	24N477	1
350	5.5	24N479	1.2
350	5.5	24N479	1.5
350	6	24N477	1.2
350	6	24N479	1.5
350	6	24N479	1
500	5.1	24N477	1.5
500	5.1	24N479	1
500	5.1	24N479	1.2
500	5.5	24N477	1.2
500	5.5	24N479	1.5
500	5.5	24N479	1
500	6	24N477	1.5
500	6	24N479	1
500	6	24N479	1.2

Fonte: A autora.

Para cada nível dos fatores de ruído a combinação do tratamento foi repetido, totalizando a quantidade de 36 experimentos. Ou seja, o operador experiente pintou 18 corpos de prova, enquanto o operador pouco experiente pintou os outros 18. A experimentação foi realizada de acordo com os padrões elaborados e descritos pelo time de desenvolvimento do projeto.

4.2.5 Descrição do procedimento experimental

O procedimento experimental foi desenhado com o objetivo de representar ao máximo as condições reais do processo. Isso garante que os valores encontrados descrevem a realidade, permitindo uma análise segura e realmente capaz de gerar resultados de melhoria quando implementado o novo padrão de processo.

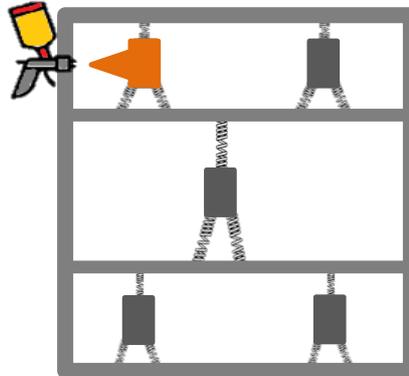
Os corpos de prova, onde a pintura seria depositada, foram confeccionados utilizando uma chapa de aço de 0,5 cm de espessura, com dimensões de 8 cm de largura e 15 cm de comprimento. Como ilustra a figura 6, as placas foram acopladas em estruturas metálicas específicas para serem carregadas na linha de pintura. Cada estrutura comportou 5 placas, conforme a ilustração. A disposição das placas nos extremos da estrutura foi definida com o objetivo de manter a maior distancia



entre elas, evitando respingos de tinta que poderiam alterar a uniformidade da camada ao final do experimento.

Todas as estruturas foram carregadas na linha de pintura em movimento. Dessa forma, as placas metálicas passaram pelos tratamentos de preparação, até chegarem nas cabines de aplicação, onde as camadas de *primer* e *top coat* foram efetivamente aplicadas de acordo com a variação de parâmetros descrita pela matriz de experimentos. Após a aplicação e cura da tinta na estufa, foram realizadas medições na espessura da camada de tinta.

Figura 7 – Disposição dos corpos de prova no experimento



Fonte: A autora.

O instrumento utilizado foi um medidor de espessura de camada byko-test 8500, conforme mostrado pela figura 8. Este instrumento eletrônico é capaz de identificar a espessura da camada de tinta ao ser posicionado na superfície de interesse.

Figura 8 - Instrumento usado para medir espessura da camada de tinta



Fonte: A autora.



Em cada produto verificado, a espessura da camada deve ser medida em pelo menos 5 áreas, com aproximadamente 1 cm² a fim de garantir a repetibilidade do experimento. O valor médio das leituras representa o valor medido e registrado como resposta (JOZSEF & BLAGA, 2015). Para atender a essa especificação, foi confeccionada uma máscara retangular com 6 pontos marcados a fim de garantir que todos os corpos de prova sejam medidos de forma isonômica.

A Tabela 4 mostra na coluna R1 os resultados da leitura de camada para o nível com menor impacto do ruído e na coluna R2 os resultados para o caso com maior impacto do ruído.

Tabela 4 - Resultados da leitura da espessura de camada

Vazão	Pressão	Capa	Bico	R1	R2
350	5.1	24N477	1	57	41
350	5.1	24N479	1.2	55	51
350	5.1	24N479	1.5	55	48
350	5.5	24N477	1	62	49
350	5.5	24N479	1.2	50	52
350	5.5	24N479	1.5	64	53
350	6	24N477	1.2	50	59
350	6	24N479	1.5	54	57
350	6	24N479	1	53	45
500	5.1	24N477	1.5	75	60
500	5.1	24N479	1	64	52
500	5.1	24N479	1.2	51	61
500	5.5	24N477	1.2	67	80
500	5.5	24N479	1.5	88	49
500	5.5	24N479	1	82	46
500	6	24N477	1.5	87	59
500	6	24N479	1	69	55
500	6	24N479	1.2	64	68

Fonte: A autora

Segundo a norma interna de pintura da empresa, o filme de tinta após a cura deve ter entre 0.025mm e 0.051mm de espessura provenientes do *top coat*. Assim, deseja-se manter a leitura da espessura de camada entre 0.040 e 0.066.

Com todos os dados no software, o Minitab analisa o arranjo ortogonal e retorna os resultados desejados. Para este experimento, utilizou-se a análise de variância dos fatores e o gráfico de efeitos principais para a razão S/R.



4.3 Análise dos dados

O planejamento e o procedimento de coleta de dados são etapas muito importantes da execução da metodologia taguchi porque determinam a qualidade dos dados a serem analisados. Uma vez de posse de dados que realmente representam a realidade do processo a ser melhorado, a fase de análise consiste basicamente em calcular a relação S/R e analisar os efeitos principais de cada fator.

Com o auxílio do Minitab 16, esses cálculos foram realizados para o arranjo ortogonal deste experimento, resultando na análise de variância demonstrada pela figura 9. A última coluna desta tabela representa o P-valor, sua magnitude demonstra a influencia que cada fator exerce sobre a resposta. Para valores iguais ou menores que 0.05, o fator analisado realiza impacto significantes na resposta. Dessa forma, a análise de variância confirma os quatro fatores analisados como significativos. Por isso, a alteração na configuração de cada um deles resultará em alterações na espessura de camada. Uma vez concluída a análise do comportamento desses fatores, o próximo passo consistiu em descobrir qual nível desses fatores gera um melhor resultado para o sistema estudado.

Figura 9 - Análise de variância (ANOVA)

Analysis of Variance for Means

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vazao	1	684,50	684,50	684,500	105,14	0,000
Pressao	2	113,44	113,44	56,722	8,71	0,005
Capa	1	78,03	78,03	78,028	11,99	0,005
Bico	2	114,53	114,53	57,264	8,80	0,005
Residual Error	11	71,61	71,61	6,510		
Total	17	1062,11				

Fonte: Saída do Minitab 16.

Os experimentos foram realizados conforme descrição do sistema de coleta de dados no tópico 3.2. As respostas coletadas com o medidor de camada foram alocadas no arranjo ortogonal da tabela 4, em que a coluna R1 mostra os experimentos realizados para o caso mais severo dos ruídos e a coluna R2 mostra os experimentos para o caso mais leve. A figura 10 mostra esses números analisados pelo Minitab 16. As três últimas colunas representam os valores de S/R, Desvio-padrão e media para cada tratamento.



Figura 10 - Resultado das cálculos do minitab 16

Vazão (mm/min)	Pressão (bar)	Bico	Capa	New*20cm	Old*30cm	SNRA1	STDE1	MEAN1
350	3.5	1	1	27,0	25	-3,0103	1,41421	26,00
350	3.5	2	2	27,2	27	16,9897	0,14142	27,10
350	3.5	3	3	28,4	29	7,4473	0,42426	28,70
350	4	1	1	33,5	32	-0,5115	1,06066	32,75
350	4	2	2	34,8	34	4,9485	0,56569	34,40
350	4	3	3	42,0	40	-3,0103	1,41421	41,00
350	4.5	1	2	43,5	43	9,0309	0,35355	43,25
350	4.5	2	3	44,5	44	9,0309	0,35355	44,25
350	4.5	3	1	44,6	46	0,0877	0,98995	45,30
500	3.5	1	3	52,5	52	9,0309	0,35355	52,25
500	3.5	2	1	53,5	53	9,0309	0,35355	53,25
500	3.5	3	2	54,5	54	9,0309	0,35355	54,25
500	4	1	2	56,2	56	16,9897	0,14142	56,10
500	4	2	3	58,2	58	16,9897	0,14142	58,10
500	4	3	1	60,5	60	9,0309	0,35355	60,25
500	4.5	1	3	62,5	62	9,0309	0,35355	62,25
500	4.5	2	1	64,2	64	16,9897	0,14142	64,10
500	4.5	3	2	66,5	66	9,0309	0,35355	66,25

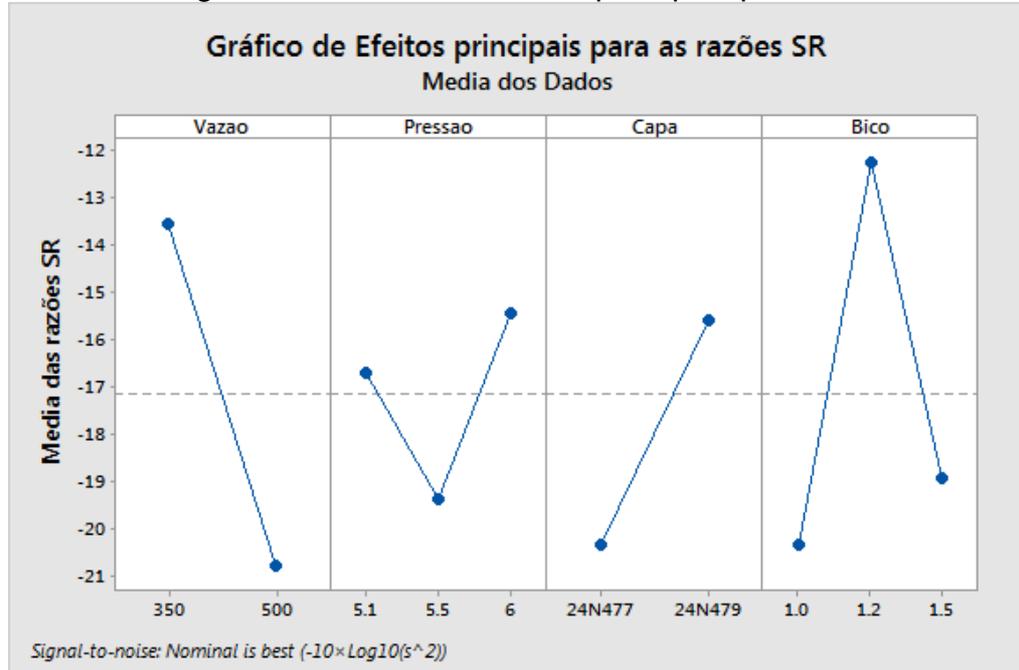
Fonte: Saída do Minitab 16.

Uma vez que a camada de tinta tem uma faixa de valores desejável e que valores fora dessa faixa caracterizam defeitos, a função analisada no *software* foi nominal-melhor, utilizando a fórmula correspondente para o cálculo da razão S/R.

Para quaisquer tipos de função escolhida, a maximização da razão sinal ruído representa uma maior robustez do processo. Sendo assim, por meio da figura 11, busca-se identificar a configuração dos fatores que representa essa maximização. Os valores mais altos de cada fator representam a melhor configuração, sendo assim: Vazão 350, Pressão 6, capa 24N479, bico 1.2.



Figura 11 - Gráfico de efeitos principais para S/R



Fonte: Saída do Minitab 16.

O objetivo da análise dos dados coletados no procedimento de experimentação é identificar aquelas combinações que apresentaram menor variabilidade ao serem expostas níveis extremos de ruído, um mais leve e um mais severo. A combinação que apresentou menor variabilidade é aquela que demonstra maior confiabilidade para o processo. Nesse caso, esta combinação da configuração do processo de pintura representa a opção que garantirá melhores condições de implementação da nova tinta.



5 Resultados e conclusões

A medida de produtividade representa o maior indicador de uma empresa de seu potencial de rentabilidade. É um objetivo comum das empresas produzir produtos realmente capazes de satisfazer seu consumidor. O grande desafio é atingir esse objetivo ao menor custo possível. A pergunta que os profissionais da indústria buscam responder é “como podemos garantir produtividade e qualidade dos processos e produtos ainda nas fases de projeto e planejamento?”. A metodologia taguchi é a resposta para essa pergunta. Por meio do projeto robusto, é possível projetar produtos e processos capazes de reduzir os desperdícios e otimizar seu desempenho, com a necessidade de nenhum ou baixíssimos investimentos.

O grande diferencial desta metodologia é a possibilidade reduzir as variabilidades inerentes de um processo por meio da identificação da configuração dos parâmetros menos vulnerável aos ruídos. Após a realização dos experimentos, pode-se propor uma combinação viável dos fatores de controle no processo manual de pintura eletrostática.

O processo de pintura mapeado passa pelas etapas de Preparação, Carregamento, Jato de Granalha, Pré-Tratamento, *Primer*, *Flash-Off*, *Top Coat*, Estufa e Descarregamento. Esta pesquisa teve como foco a etapa de aplicação do *Top Coat*, onde foram identificados os parâmetros controláveis. Dentre todas as variáveis desta etapa, estudou-se a vazão, a pressão, o bico e a capa da pistola. A maior fonte de ruídos nesse processo é devido a impossibilidade de padronização do movimento do operador, assim os fatores de ruído foram um operador mais experiente e outro menos experiente. A tabela de experimentos a ser executada foi alocada em um arranjo ortogonal L18.

A experimentação foi realizada em corpos de prova projetados para receber pintura. Os 36 corpos de prova foram presos a placas e içados na linha de pintura. Dois operadores realizaram as pinturas para cada combinação dos parâmetros de controle. Ao final da pintura, os resultados foram coletados por um leitor de camadas de tinta.

Os dados do experimento foram inseridos no software Minitab 16 para realizar os devidos cálculos. A ANOVA demonstrou que os quatro fatores são significantes



para a espessura de camada, enquanto a razão S/R mostrou a seguinte configuração ótima, sendo ela: Vazão 350, Pressão 6, capa 24N479, bico 1.2. Após a implementação desta configuração, observa-se um processo com menor desvios no resultado observado, minimizando o impacto dos ruídos na espessura da camada de tinta.

O processo de pintura analisado demonstra um desafio para estabelecer controles devido a sua característica de pintura manual, em que é natural que variabilidades estejam associadas ao operador. Portanto faz-se extremamente necessário o uso de técnicas que possam minimizar o impacto destas, sem que isso implique em aumento de custos. Isso demonstra a adequação da metodologia taguchi para estudar melhorias no processo desta empresa.

Diante do desafio de implementar a alteração na formulação de tinta sem que isso gerasse grandes perturbações no comportamento do processo, as oportunidades de melhoria identificadas estão relacionadas a minimização da ocorrência de cascas de laranja, escorrido de tinta, fervura e falta de tinta. A configuração dos parâmetros de controle revelada pela análise da ANOVA e da razão S/R se mostrou capaz de assegurar maior confiabilidade do processo quanto a esses defeitos.

O principal resultado desta pesquisa consistiu em contribuir para que a empresa dona do processo pudesse melhorar seu produto para os clientes, assegurando que estes teriam suas necessidades satisfeitas ao consumir um produto com um nível de desempenho desejado. Com isso, a empresa contribui para o nível de produtividade de toda a sociedade.

Como limitações da pesquisa pode-se apontar a ausência do relato do experimento de confirmação. Até a data de finalização deste texto, os procedimentos de realização deste experimento e testes finais não haviam sido executados. Esta etapa final é fundamental para conclusões concretas porque assegura que o processo real foi fielmente representado no procedimento experimental.



6 Referências bibliográficas

ALMEIDA, Henrique Silveira; DE TOLEDO, José Carlos. Método Taguchi: Qualidade voltada para o projeto do produto e do processo. **Revista de Administração da Universidade de São Paulo**, v. 24, n. 4, 1989.

ANANT, Ravi Kishore *et al.* **Taguchi optimization of bismuth-telluride based thermoelectric cooler**. *Journal of Applied Physics*, v.122, 2017.

ASQC (2017). Glossary and Tables for Statistical Quality Control Milwaukee, Wis.: American Society for Quality Control. (<https://asq.org/quality-resources/quality-glossary>)

CRESWELL, John W. Procedimentos qualitativos. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto**, v. 2, p. 32-33, 2007.

FAZENDA, J. M. R. **Tintas & Vernizes** – Ciência e Tecnologia. 3ª Edição. Editora Edgard Blucher. 2005.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999. Como elaborar projetos de pesquisa, v. 4, 2005.

GIRDEN, Ellen R. ANOVA: Repeated measures. *Journal of cleaner production* No. 84. Sage, 1992.

HINES, R. L. **Electrostatic atomization and spray painting**. *Journal of Applied Physics*, v. 37, n. 7, p. 2730-2736, 1996.

JOZSEF, Boer; BLAGA, Petruța. **Factors that generate nonconformities in the electrostatic powder painting**. *Procedia Technology*, v. 19, p. 1089-1093, 2015.

JOZSEF, Boer; BLAGA, Petruța. **Production Quality Control in the Process of Coating in an Electrostatic Field**. The 7th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2013, 10-11 October 2013, Petru Maior University of Tirgu Mures, Romania



KARNA, Shyam Kumar; SAHAI, Rajeshwar. An overview on Taguchi method. **International Journal of Engineering and Mathematical Sciences**, v. 1, n. 1, p. 1-7, 2012.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and analysis of experiments**. John Wiley & Sons, 2017.

MONTGOMERY, Douglas C. **Textbook: Design and Analysis of Experiments**. 2014. John Wiley & Sons, Inc.

PANDER, Adam. **Optimization of catalyst formation conditions for synthesis of carbon nanotubes using Taguchi method**. Applied surface Science, v. 371 p. 425-435, 2016.

PARK, G., & LEE, T. **Robust Design : An Overview**. Aiaa Journal, v.1 p. 44, 2006.

PHADKE, Madhan Shridhar. **Quality engineering using robust design**. Prentice Hall PTR, 1995.

PHILIP, J. Ross. **Taguchi techniques for quality engineering**. 1988.

PIEROZAN, L. **Estabilização de processos: Um estudo de caso no setor de pintura automotiva**. Dissertação do curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia. Porto Alegre, 2001.

SOUZA, Bruno de. **Uso do projeto robusto para identificação de fatores que contribuem na intensidade do aspecto de" casca de laranja" em superfície de para-choques pintados**. Dissertação do curso de Mestrado em Engenharia da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

SU, Ke; SHEN, Yao-Chun; ZEITLER, J. Axel. **Terahertz sensor for non-contact thickness and quality measurement of automobile paints of varying complexity**. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, v. 4, n. 4, p. 432-439, 2014.

TAGUCHI, Genichi *et al.* **Taguchi's quality engineering handbook**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2005.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Engenharia de Produção



TAGUCHI, Genichi *et al.* **Robust Engineering: An Overview.** McGraw–Hill, New York, 2000.

YANG, Kai EL-HAIK, Kai Yang-Basem. **Design for Six Sigma, A Roadmap for Product Development.** RR Donnelly, SAD, str, v. 21, 2003.