



Uso do projeto robusto para identificação de fatores que contribuem para a intensidade do aspecto de “casca de laranja” em superfície de para-choques pintados

Use of the robust design methodology for identification of factors that contribute to the intensity of the “orange peel” aspect on painted bumper surfaces

Bruno de Souza¹
Adriana de Paula Lacerda Santos¹
Mauro Lacerda Santos Filho²

Resumo: Mesmo com a evolução considerável das técnicas de pintura automotiva nas últimas décadas, o para-choque é uma autopeça que ainda tem diversos problemas relacionados ao aspecto da sua superfície pintada. O objetivo deste artigo foi identificar os fatores de aplicação do verniz que interferem na intensidade do aspecto de casca de laranja em superfícies de para-choques pintados e propor uma combinação ótima dos fatores através da metodologia do projeto robusto. Na pesquisa realizada no setor de pintura automatizada de uma empresa de para-choques, o projeto robusto auxiliou na identificação das formas de variabilidade do processo de produção através da aplicação de um experimento e de técnicas estatísticas, de forma ágil e com pouco desperdício de material. O experimento testou várias combinações dos níveis dos fatores de aplicação do verniz (velocidade, vazão, rotação por minuto, alta tensão, ar modelador) em amostras de para-choques. A intensidade da casca de laranja em superfícies pintadas de verniz das amostras foi medida pelo equipamento *Wave Scan*, o qual fornece a leitura do comprimento de onda em função de duas medidas: *Short Wave* e *Long Wave*. Os principais resultados obtidos através da análise da variância da razão sinal ruído revelaram que os fatores que têm efeitos significativos no valor resposta do comprimento de onda *Short Wave* são: rotação por minuto, alta tensão além das interações vazão*alta tensão e velocidade*alta tensão. Já os fatores que afetaram significativamente o valor resposta do comprimento de onda *Long Wave* são: vazão, ar modelador, rotação por minuto, alta tensão e a interação velocidade*alta tensão. Como resultado da análise das médias do sinal ruído, foi apresentada neste trabalho a combinação ótima dos fatores: velocidade = 920 m/s; vazão = 160 mililitros/minuto; ar modelador = 180 bar; rotação = 90 rotações/minuto; alta tensão = 180 quilovolts.

Palavras-chave: Pintura automotiva; Casca de laranja; Para-choque; Projeto robusto.

Abstract: *Even with the considerable development of techniques for automotive paint in recent decades, the bumper is a car part that still has many problems related to the aspect of its painted surface. This study aimed to identify the clear coat application factors that affect on the intensity of orange peel appearance on painted bumper surfaces and offer an optimum design of factors through the robust design methodology. In this research conducted in automated paint sector of a bumper company, the robust design helped in the identification of variability cause in a production process by applying an experiment and statistical techniques, in an agile and with little waste material way. The experiment tested various combinations of levels of the clear coat application factors (speed, flow, revolution per minute, operation voltage, atomizing air pressure) in the bumper samples. The intensity of the orange peel on coated surfaces samples was measured by a Wave Scan device that provides the wavelength reading as a function of two measures: Long Wave and Short Wave. The main results obtained by variance analysis of noise signal ratio showed that the factors that have significant effects on the value of the Short Wave response wavelength are: revolution per minute, operation voltage and the interactions flow*operation voltage and speed*operation voltage. The factors that significantly affected the response value of the Long Wave wavelength are: flow, atomizing*

¹ Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – PPGEP, Universidade Federal do Paraná – UFPR, Centro Politécnico, s/n, Jardim das Américas, CEP 81531-980, Curitiba, PR, Brasil, e-mail: brunodesouza_89@hotmail.com; adrianapls1@gmail.com

² Departamento de Construção Civil – DCC, Universidade Federal do Paraná – UFPR, Centro Politécnico, s/n, Jardim das Américas, CEP 81531-980, Curitiba, PR, Brasil, e-mail: maurolacerda1982@gmail.com

*air pressure, revolution per minute, operation voltage and the interaction speed*operation voltage. As a result of analysis of the noise signal mean, it is presented the factors optimum design: speed = 920 m / s; flow = 160 ml/min; atomizing air pressure = 180 bar; revolution per minute = 90 revolutions / minute; operation voltage = 180 kilovolts.*

Keywords: Automotive paint; Orange peel; Bumpers; Robust design.

1 Introdução

A competitividade dentro do setor automotivo tem transformado a economia mundial desde a década de 1970, quando as empresas ocidentais montadoras de veículos começaram a perder a soberania do mercado para as concorrentes japonesas (Costa & Queiroz, 2000, p. 27). Também no fim dessa década, montadoras passaram por um processo de “desintegração vertical”, caminho inverso à integração vertical, que consistiu na perda da responsabilidade e controle de todos os processos produtivos de um produto, ou seja, empresas terceirizadas passaram a ser envolvidas. O resultado disso foi o aumento da complexidade e importância do relacionamento com seus fornecedores e as exigências referentes aos produtos fornecidos (Vanalle & Salles, 2011, p. 238).

No Brasil, a competitividade do setor automotivo acirrou-se após a abertura do mercado interno para as importações de automóveis em 1992 e a vinda de mais montadoras estrangeiras, além das tradicionais GM, Ford, Volkswagen e Fiat (Pierozan, 2001, p. 13). A competição entre as grandes indústrias de automóvel impulsionou o desenvolvimento de tecnologias nos processos relacionados ao seu sistema produtivo. A pintura automotiva, por exemplo, acompanhou esse cenário de melhoria de qualidade, uma vez que era importante para as montadoras que os carros produzidos possuíssem tintas diferenciadas, as quais suprissem as exigências quanto a brilho, tonalidade da cor, durabilidade à corrosão, quebras e arranhões, entre outros agentes nocivos. No entanto, a melhoria técnica desse ramo da pintura não pode ser somente atribuída à vontade de as empresas melhorarem seus processos. A legislação tem uma grande parcela de responsabilidade nessas mudanças, visto as exigências fundamentadas, as normas ambientais, de saúde e segurança que passaram a valer para estimular a responsabilidade das empresas quanto à toxicidade e reciclagem de seu material, principalmente substâncias como tintas e solventes (Jurgetz, 1995, p. 53).

A concorrência na indústria automotiva brasileira contribuiu para a instalação de fábricas de autopeças no país, que evoluíram em seus processos devido ao interesse de as montadoras contarem com fornecedores de alto nível no mercado. A linha de pintura das empresas fabricantes de para-choques é um exemplo. Entre as exigências que as montadoras impuseram ao setor de pintura incluem-se processos automatizados e simplificados, além de sistemas compactos com

baixo tempo do produto no processo de pintura (Mirrha, 2013, p. 61).

Em paralelo à preocupação de desenvolver processos e produzir em um tempo de ciclo cada vez menor, existe a necessidade de produzir produtos com qualidade. Perante a decisão de compra, o cliente tem a tendência de equiparar ao valor da qualidade, custo e prazo de entrega (Montgomery & Runger, 2012).

A pintura de um automóvel é sem dúvida um dos requisitos de qualidade mais visíveis e palpáveis, considerada de grande importância pela maioria dos compradores (Pierozan, 2001, p. 13).

Portanto, o papel que a qualidade exerce como fator de decisão mostra o seu valor competitivo e torna-se um diferencial na habilidade de controlar a qualidade dos produtos e garantir um processo estável. Sendo assim, a qualidade de um produto pode ser assegurada através da minimização da variabilidade de parâmetros do processo em uma linha de produção (Samohyl, 2009).

Nas indústrias automotivas, métodos estatísticos são amplamente usados pela engenharia para o controle e melhoria da qualidade. Segundo Samohyl (2009), a aplicação dos conceitos estatísticos no controle da qualidade nas indústrias iniciou-se através de Walter Shewhart, na década de 1920, nos Estados Unidos. No entanto, o maior divulgador dos benefícios da estatística aplicada nas fábricas foi William Edwards Deming, que difundiu o Controle Estatístico da Qualidade (CEQ) nas montadoras do Japão (Chiavenato, 2004). O controle estatístico de processo é uma ferramenta eficiente para um processo que busca a estabilidade e melhorias através da redução da variabilidade das operações (Montgomery & Runger, 2012). Para Monks (1987), ferramentas estatísticas como os gráficos de controle são primordiais para o controle de processos. Portanto, o desafio não está apenas em controlar os processos, mas em utilizar os conceitos estatísticos no objetivo de alcançar melhorias e o entendimento do processo. Para isso, as técnicas de planejamento de experimentos são bastante úteis na resolução de problemas da engenharia. A partir da premissa de que todos os processos são constituídos por variáveis controláveis através de um planejamento, experimentos podem ser aplicados para determinar quais variáveis têm maior influência no desempenho do processo (Montgomery & Runger, 2012, p. 338). O projeto robusto é um método que reduz o número de experimentos para descobrir uma combinação

ideal entre as variáveis controláveis do processo, proporcionando a melhoria de qualidade a custos reduzidos (Chen & Chuang, 2008, p. 668).

Nesse contexto, este trabalho buscou responder o seguinte problema de pesquisa: Quais são os fatores que interferem no surgimento da casca de laranja em superfície de para-choques pintados?

A hipótese de trabalho utilizada foi que existia uma combinação ótima dos fatores controláveis para a aplicação de verniz em para-choques e que com a Metodologia do Projeto Robusto era possível identificá-la.

Buscando validar esta hipótese, este artigo apresenta quais são os fatores de aplicação de verniz que interferem na intensidade do aspecto de casca de laranja em superfície de para-choques pintados.

2 Controle da qualidade na pintura automotiva

As exigências dos clientes por *Total Quality Management (TQM)* e a certificação ISO fizeram a indústria de pintura de autopeças implantar e intensificar o controle de qualidade em seu processo (Weiss, 1997, p. 223).

O produto final do processo da pintura automotiva envolve um complexo conjunto de requisitos. Entre eles estão brilho, cor, durabilidade, resistência à quebra, adesão das camadas de tinta e resistência a arranhões (Jurgetz, 1995, p. 53). Na prática, toda superfície de revestimento automotivo tem uma intensidade de casca de laranja, mesmo que mínima (Adamsons, 2000, p. 1382). Quando essa intensidade ultrapassa os valores aceitáveis, vários dos requisitos de qualidade das peças são afetados. A influência da intensidade da casca de laranja em superfícies, nas propriedades e características funcionais do produto é um receio da indústria, que busca caracterizar o problema (Najjar et al., 2005, p. 6088).

O controle de qualidade da intensidade da casca de laranja da peça e do brilho pode ser feito através de um aparelho que mensura o comprimento de onda existente na superfície da peça pintada e a intensidade de luz refletida. O aparelho Wave Scan tem a função de medir a aparência do revestimento de pintura. O equipamento calcula, através do comprimento de onda, a distinção da imagem (*Distinctness of Image*), ou seja, mensura a qualidade da imagem de um objeto que é refletido pela superfície da peça (Domenico & Henshaw, 2012, p. 676).

Segundo Adamsons (2012, p. 751) é possível identificar a relação entre a diminuição do brilho e a perda da distinção da imagem. O Wave Scan é capaz de medir tanto a intensidade do aspecto de casca de laranja quanto o brilho da peça. O instrumento é equipado com um refletor que mede a intensidade da luz refletida. Por meio de uma luz

LED (*light Emitting Diode*) a superfície da peça é iluminada em um ângulo de 20° . A reflexão é captada pela lente de um dispositivo e então mensurada (Domenico & Henshaw, 2012, p. 676). A Figura 1 ilustra os conceitos de brilho, casca de laranja e *DOI* (*Distinctness of Image*).

2.1 Tipos de defeitos de qualidade na pintura automotiva

O desafio de uma linha de pintura é manter a aplicação de modo a garantir o aspecto da peça e as exigências do cliente quanto a alguns parâmetros de qualidade. No entanto, vários problemas de aplicação podem ser identificados em uma linha de processo de pintura industrial. Alguns problemas de pintura podem ser percebidos durante a aplicação dos revestimentos de tinta, outros somente são detectados após a cura das camadas de tinta. Conforme Carvalho (1993, p. 47), as falhas referentes a composição, preparação e processo de aplicação da tinta são frequentes.

No intuito de estudar os defeitos provenientes do processo de pintura, tecnologias de medição de microscopia são utilizadas para a análise dessas imperfeições que aparecem na superfície pintada. Portanto, a partir da microscopia é possível perceber mudanças no revestimento. As imagens geradas pelo microscópio podem ser geradas através da vista da superfície ou da secção transversal (Adamsons, 2012, p. 745).

Baseado nas considerações feitas por Carvalho (1993, p. 47-57), Fazenda (2005, p. 712-718) e Pierozan (2001, p. 80-83), alguns dos principais defeitos relacionados à pintura industrial são:

- **Escorrimento:** Trata-se de um acúmulo de tinta em superfícies verticais. O escorrimento pode ocorrer com qualquer tipo de substância, primer, base ou verniz;

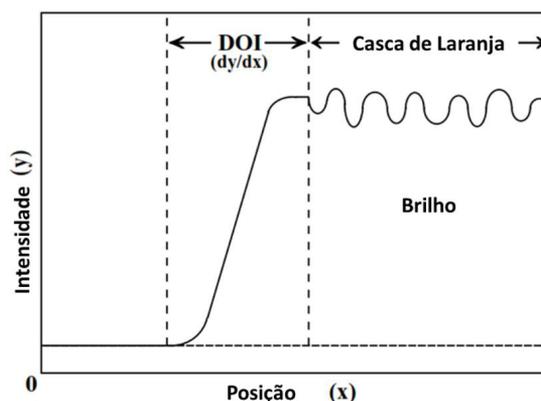


Figura 1. Características dos aspectos usados para monitorar alterações dos sistemas automotivos. Fonte: Adaptado de Adamsons (2000, p. 1365).

- **Casca de laranja (Orange Peel):** A casca de laranja, como o próprio nome diz, refere-se a mesma aparência da superfície da casca de uma laranja. Nesse caso ocorre o desnivelamento da película da tinta;
- **Fervura:** É um problema de aplicação semelhante a pequenas bolhas que surgem na superfície da peça após a aplicação e secagem da tinta. As pequenas bolhas são causadas pela evaporação desordenada de solventes na tinta através do revestimento da tinta;
- **Desplacamento:** Trata-se da perda de aderência de uma camada com a outra ou de uma camada com a superfície do substrato;
- **Mancha:** Refere-se a não uniformidade da cor na superfície da peça pintada. É mais facilmente percebida em peças de cores metálicas do que em peças de cores sólidas, pelo aspecto de “sombra” que apresenta nas regiões da superfície;
- **Crateras:** É um problema de aplicação que apresenta depressões na superfície da peça, as quais podem expor as camadas inferiores. As crateras que se revelam no filme da tinta são formadas por bolhas as quais, após romperem-se, não mais se nivelam;
- **Impurezas:** São partículas provenientes do próprio sistema de pintura ou do ambiente que se alojam na superfície da unidade antes da cura da tinta. As impurezas podem aparecer em qualquer camada dos revestimentos da pintura.

3 Planejamento de experimentos

A estatística é bastante requisitada em situações nas quais existe uma grande quantidade de informação para ser analisada. No entanto, é no momento do planejamento de um experimento que as atividades estatísticas se destacam. É nessa hora que é feita a coleta dos dados e qualquer erro de planejamento pode levar a conclusões equivocadas na etapa final de análise dos dados (Barros et al., 2010, p. 19).

Experimentos planejados baseados na estatística favorecem o desenvolvimento do processo experimental e, auxiliados pelas técnicas estatísticas durante a coleta e análise de dados, resultam na objetividade científica em prol da resolução do problema (Montgomery & Runger, 2012, p. 339). O planejamento de experimentos é um método científico capaz de identificar e associar os níveis ideais dos fatores de um processo para aprimorar o desempenho e capacidade de produção (Muhammad et al., 2013, p. 1175). No processo de planejamento e análise de experimentos, as técnicas

estatísticas auxiliam na identificação de fatores (parâmetros) que interferem nas características da qualidade, ou seja, na variável resposta (Costa et al., 2005, p. 16).

Uma técnica estatística do planejamento de experimentos é o Projeto Robusto, o qual fornece um modo de identificar os fatores significativos de um processo com um número reduzido de experimentos.

3.1 Projeto robusto

A Metodologia do Projeto Robusto foi desenvolvida pelo engenheiro japonês Genichi Taguchi e introduzida em grandes empresas norte-americanas na década de 1980 (Montgomery, 2005, p. 464).

O fundamento do projeto robusto é a minimização da variabilidade dos produtos e processos com o objetivo de melhorar a qualidade e a confiabilidade dos mesmos. A metodologia desenvolvida por Taguchi utiliza-se do delineamento de experimentos para determinar uma configuração ideal dos parâmetros do processo, assim como para analisar as interações existentes entre os fatores controláveis (Lai et al., 2005, p. 446).

O projeto robusto tem como principal vantagem a obtenção de resultados em tempo e custo reduzidos quando comparados a outras técnicas estatísticas (Muhammad et al., 2013).

Conforme a metodologia de Taguchi, as variáveis não controláveis são chamadas de fatores ruidos (Kim et al., 2004, p. 56). Esses fatores representam qualquer coisa que seja responsável por causar interferências no desempenho de uma característica funcional de um produto. Segundo Arvidsson & Gremyr (2008, p. 26), o ruído nada mais é que uma fonte de variação que desvia um parâmetro responsável pela característica de qualidade do valor-alvo e induz a perda. O nível mais indicado para um parâmetro ou a combinação entre eles é estabelecido segundo a redução dos ruídos de uma característica funcional do produto.

Nas duas áreas que o controle da engenharia de qualidade atua, fora da linha de produção (*off-line quality control*) e dentro da linha de produção (*on-line quality control*), é possível detectar ruídos. As diferentes fontes pelas quais um ruído pode ser detectado tornaram apropriada a categorização dos mesmos da seguinte maneira (Arvidsson & Gremyr, 2008, p. 27; Ross, 1991, p. 201): Ruídos Externos, Ruídos Internos e Ruídos de Unidade para Unidade.

Os ruídos externos são os fatores que causam variação e têm origem ambiental, que vêm de fora e afetam o produto. Por exemplo, temperatura, umidade, pressão, tempo e até mesmo indivíduos.

Os ruídos internos são responsáveis pela variabilidade que ocorre no interior do produto. São as mudanças internas do produto ou processo resultado da

deterioração do seu desempenho. A corrente de uma bateria e a quilometragem de um carro são exemplos de ruídos internos. Tanto os ruídos externos quanto os ruídos internos são detectados apenas pelo controle de qualidade, fora da linha de produção.

Os ruídos chamados de unidade para unidade são resultado da incapacidade de um processo de fabricação produzir unidades idênticas. Matéria-prima de um produto e processos sem padronização são as maiores fontes desse tipo de ruído. No caso dos ruídos de unidade para unidade, podem ser detectados pelo controle de qualidade *off-line* e *on-line*.

Em benefício do melhor desempenho do experimento, é importante classificar os fatores de maneira apropriada. Esses fatores podem ser divididos em cinco grupos (Mori, 1990, p. 91):

- Fatores de controle: São fatores dos quais é possível estabelecer os níveis e mantê-los. Por exemplo: Elementos de um circuito elétrico;
- Fatores indicativos: São fatores aos quais se pode atribuir níveis. No entanto, os níveis mais altos não fazem sentido se aplicados no experimento. Por exemplo: diferença da condição de uso de um produto;
- Fatores de bloco: São fatores aos quais se pode atribuir níveis, mas para os quais não existe comprovação técnica para que sejam aplicados os níveis mais altos. Esses fatores são classificados para evitar que os efeitos deles se confundam com os efeitos dos fatores de controle. Por exemplo: maquinário e lotes novos;
- Fatores suplementares: Fatores utilizados somente para registrar as condições experimentais e ambientais;

- Fatores ruídos: São os fatores para os quais os valores não podem ser determinados nem mantidos. Eles influenciam nos resultados do experimento.

4 Método de pesquisa

Esta pesquisa classifica-se como quantitativa e explicativa. O procedimento técnico utilizado neste trabalho foi o experimento. Um experimento é conduzido por um pesquisador que fazendo o uso de hipóteses identifica o relacionamento entre variáveis. O controle planejado das variáveis independentes faz com que o pesquisador seja capaz analisar os efeitos na variável dependente (Miguel et al., 2010, p. 48).

A empresa escolhida para o desenvolvimento desta pesquisa é uma multinacional alemã fabricante de componentes plásticos para automóveis, fornecedora das principais montadoras mundiais. Possui três indústrias na América do Sul, sendo uma no México e duas no Brasil. O principal componente produzido é o para-choque, a produção média é de 2.500 para-choques/dia. Os processos que envolvem a produção dos para-choques são: injeção, pintura e montagem. A linha de pintura dessa indústria de componentes plásticos tem uma variedade de 20 modelos de para-choques que podem ser pintados em 10 cores diferentes cada.

Para o desenvolvimento da pesquisa foi adotado método do projeto robusto, o qual envolveu oito etapas classificadas nas seguintes fases: planejamento, execução e análise (Bernardin, 1994, p. 38; Kumar et al., 1996, p. 89; Lai et al., 2005, p. 449; Wu & Chen, 2005, p. 2407). As etapas realizadas nesta pesquisa estão ilustradas na Figura 2.

A fase de planejamento envolveu quatro etapas do método do projeto robusto. A primeira etapa refere-se à definição do problema e objetivo. Nessa etapa foi apresentado o impacto do problema da

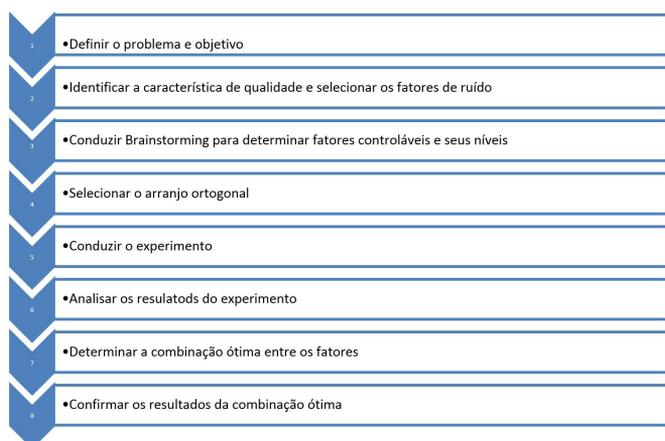


Figura 2. Etapas do projeto robusto realizadas. Fonte: Autores (2015).

casca de laranja na linha de pintura de para-choques e foram definidos os objetivos para identificar os fatores que interferem na intensidade do problema. A segunda etapa foi a identificação da característica de qualidade e dos fatores ruídos. A etapa exigiu a definição da característica de qualidade referente ao problema estudado. Além disso, foram determinados quais os fatores ruídos que tinham relação com a característica de qualidade. Na terceira etapa foi conduzido um *brainstorming* para a determinação dos fatores controláveis e seus níveis. Nesse ponto do trabalho foi utilizado o diagrama de causa e efeito para classificar os diversos fatores inseridos no processo e, com base na norma ASTM D5286 (ASTM, 2005), foram escolhidos os fatores controláveis do experimento. Os níveis de cada fator controlável foram estabelecidos por meio de histórico técnico adquirido pelos técnicos e engenheiros envolvidos no processo de pintura. A última etapa da fase de planejamento tratou da seleção do arranjo ortogonal. A quarta etapa necessitou das informações da etapa anterior, na qual foram determinados o número de fatores controláveis e o número de níveis de cada um deles. Esses valores possibilitaram a escolha do arranjo ortogonal mais pertinente ao experimento.

A próxima fase foi a execução, que englobou somente a quinta etapa do método do projeto robusto. Para que fosse realizada a condução dos testes do experimento antes foi necessária a preparação dos corpos de prova, a montagem de um suporte para essas peças e a programação dos robôs de pintura. Só então foi executada cada combinação dos tratamentos dos fatores de controle que o arranjo ortogonal escolhido determinou em sua matriz, assim como a replicação de cada ensaio do experimento. A medição da intensidade do aspecto de casca de laranja das amostras pintadas foi realizada através do equipamento Wave Scan modelo BYK AW-4824 Micro-Wave-Scan.

A fase final do projeto foi a análise dos dados. Nessa fase foi usado o *software* MINITAB para calcular a razão sinal-ruído, gerar a tabela da ANOVA e os gráficos de interações entre os fatores de controle. Na sétima etapa do projeto robusto foi determinada a combinação ótima entre os fatores. Nesse ponto, a partir da análise das médias dos valores da razão sinal-ruído, foram calculados os níveis ótimos dos fatores de controle e a interação entre eles. Na etapa número oito ocorreu a confirmação da combinação ótima. Nessa etapa foi realizado o teste de verificação para assegurar que a combinação ótima resultasse em valores aceitáveis da medição da intensidade da casca de laranja. Ou seja, um novo ensaio do experimento foi realizado usando os níveis conforme a combinação ótima estabelecida através da razão sinal-ruído e verificados os valores dos fatores ruídos.

5 A estruturação do projeto robusto

A primeira etapa do projeto robusto refere-se à definição do problema e objetivo, elementos que nortearam os experimentos. O processo completo de fabricação do para-choque inicia-se na injeção dos grânulos de polipropileno, passa pela pintura do para-choque virgem e depois a montagem dos componentes dos para-choques já pintados. A Figura 3 mostra o fluxograma de produção de para-choques da empresa estudada, com ênfase no processo de pintura. Como se pode perceber na Figura 3 o para-choque virgem chega do processo de injeção e é colocado em um suporte (gancheira) que está afixado ao transportador da linha. O transportador conduz a peça para as limpezas manuais nº 1 e nº 2. A primeira, uma limpeza com pano umedecido com álcool e ar comprimido. Já na segunda é feita uma limpeza com pano resinado e ar ionizado. Após as limpezas a peça passa pelas cabines, onde é submetida às operações de flambagem, aplicação de primer, base e verniz, através de robôs de pintura. Depois da aplicação de todas as camadas de tinta, o para-choque fica 40 minutos no forno da linha de pintura, responsável por auxiliar a cura do verniz. Depois do período dentro do forno, a peça é retirada da linha e levada aos postos de trabalho, nos quais é realizada uma inspeção visual. Nela é avaliada a qualidade da pintura do para-choque e definido o seu destino. Existem quatro caminhos que a peça pode seguir a partir deste ponto: montagem, polimento, lixamento e *scrap*.

As peças em conformidade vão diretamente para a montagem, de onde são enviadas para o cliente. As peças que apresentam problemas que são considerados complexos vão para o lixamento. Essa fase corresponde à retirada das camadas de tinta por meio de uma lixa. A partir daí as peças poderão ser retrabalhadas, ou seja, passarão por todo o processo de pintura novamente. Os defeitos identificados nos para-choques que não podem ser retrabalhados tornam as peças inapropriadas para a montagem e venda ao cliente. Por isso, elas são enviadas para o *scrap*, onde são moídas e reaproveitadas no processo de injeção. Já as peças que apresentam defeitos simples, que podem ser reparados, vão para o processo de polimento. Nele, as peças ficam em postos de trabalho nos quais os operadores utilizam lixa fina para nivelar a região defeituosa e polir a peça. Depois de completada a operação de polimento, o operador realiza outra inspeção na peça. Caso o para-choque esteja em condições aceitáveis, é enviado para o processo de montagem. Do contrário, a peça recebe o lixamento e retorna à linha de pintura para ser retrabalhada. Os operadores da inspeção visual consideram 48% das peças que passam pelo processo de pintura como em conformidade. O restante das peças, em torno de 52%, é considerado não conforme.

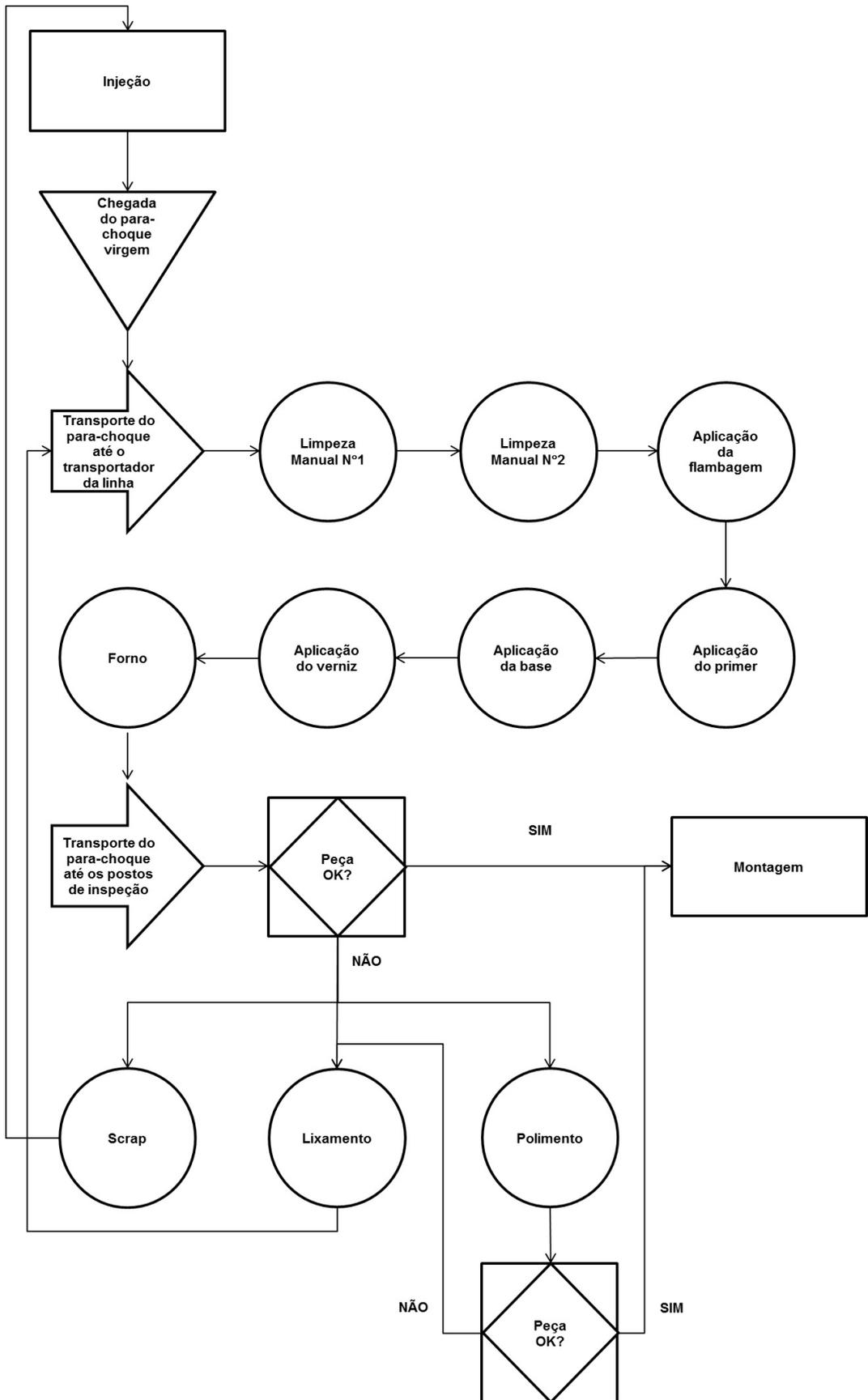


Figura 3. Fluxograma linha de pintura automática. Fonte: Autores (2015).

Das peças não conformes, aproximadamente 31% são encaminhadas para a operação de polimento. Parte das peças que vão para o processo de polimento ainda pode ser recuperada e enviada para a montagem. No entanto, o trabalho de polimento demanda um número significativo de operadores, oito por turno, responsáveis por repararem essas peças defeituosas.

Entre os defeitos das peças enviadas para o polimento (casca de laranja, verniz, sujeira, crateras, gases, manchas de pintura, craqueamento, fervura), a casca de laranja predomina como principal. A casca de laranja quase representa sozinha a mesma proporção da soma de todos os outros defeitos. Além disso, na operação de polimento, para-choques com esse tipo de defeito possuem um tempo de reparo duas vezes maior que as demais falhas de pintura.

O nível de casca de laranja nas peças pode ser medido pelo equipamento Wave Scan através de dois valores que representam o comprimento de onda, SW (*Short Wave*) e LW (*Long Wave*), ambos tem a unidade em milímetros.

As condições de aprovação dos valores de SW e LW são estipuladas por uma norma interna do cliente (Tabela 1).

Considerando que a utilização do Wave Scan em 100% das peças pintadas é inviável para o fluxo produtivo, esse método de medição só se aplica à inspeção por amostragem. Portanto, somente a inspeção visual de pós-pintura realizada pelos operadores nos para-choques abre brechas para falhas na identificação de peças com níveis não aceitáveis de casca de laranja.

Para entender melhor a amplitude do problema da casca de laranja na empresa estudada, a Figura 4 apresenta um histograma que demonstra a dispersão dos dados de SW para uma amostra de 55 para-choques pintados, do mesmo modelo, escolhidos aleatoriamente e submetidas a leitura do Wave Scan. Na Figura 5 pode-se concluir que a medição mais comum de casca de laranja nas peças está entre $40 \pm 2,5$ mm. Também, constata-se que aproximadamente 90% dos para-choques medidos possuem níveis reprováveis. No histograma, a linha pontilhada ilustra a linha que separa os níveis aceitáveis dos não aceitáveis para o comprimento de onda SW.

A medição do comprimento de onda do conjunto de para-choques também apresentou a dispersão do comprimento de onda LW, através da Figura 5. Nela pode-se identificar uma concentração de medições entre o intervalo 12 ± 2 mm. Em comparação com o histograma que representa o comprimento de onda SW, em LW tem-se maior frequência de valores mais próximos dos considerados aceitáveis pelo cliente.

No entanto, ainda assim há uma quantidade de aproximadamente 85% de peças acima dos desejáveis 8 mm, conforme marca a linha pontilhada. Sendo assim, o problema da casca de laranja foi identificado

Tabela 1. Norma de qualidade para o Wave Scan.

FATOR RUÍDO	CONDIÇÃO ACEITÁVEL	CONDIÇÃO NÃO ACEITÁVEL
<i>Short Wave (SW)</i>	$0 \leq SW \leq 25$	$SW > 25$
<i>Long Wave (LW)</i>	$0 \leq LW \leq 8$	$LW > 8$

Fonte: Autores (2015).

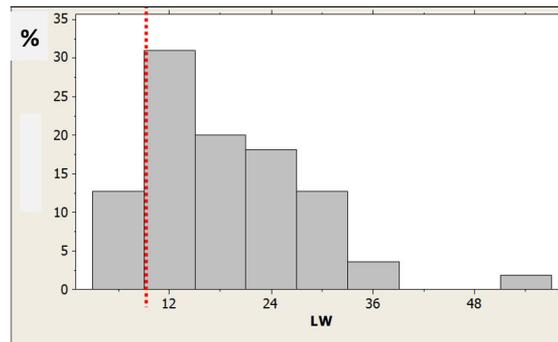


Figura 4. Histograma do comprimento de onda SW. Fonte: Minitab (2015).

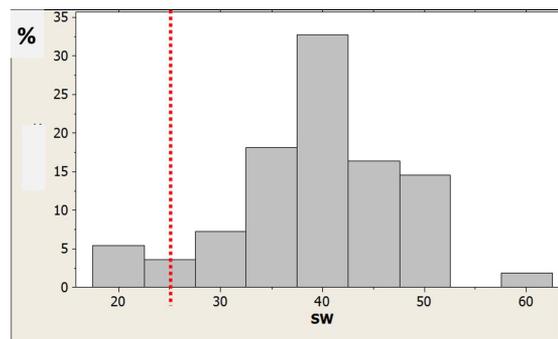


Figura 5. Histograma do comprimento de onda LW. Fonte: Minitab (2015).

como crítico para a linha de pintura automática da empresa estudada, pois além de comprometer a qualidade do aspecto dos para-choques pintados essa falha afeta a agilidade da linha de produção e compromete a entrega de peças ao cliente final. A identificação do problema permitiu a definição dos objetivos do experimento.

5.1 Identificação da característica da qualidade

O projeto robusto sustenta-se na otimização da característica de qualidade de um produto por meio de um processo cada vez menos sensível a variações. No entanto, um processo robusto só pode ser conquistado com o entendimento dos fatores causadores dessa variação. O estudo desses fatores

ocorre por meio das ferramentas Razão Sinal-Ruído e Arranjo Ortogonal.

Tendo clara a característica de qualidade selecionada no trabalho, os modos de quantificá-la, através dos tipos de onda SW e LW, podem ser classificados como os fatores ruídos do projeto de experimento. Pode-se concluir que quanto mais baixo os valores de SW e LW melhor para a característica de qualidade, ou seja, é indicado que a razão sinal ruído tipo menor é melhor, também conhecida como *Lower is Best (LB)*.

Para auxiliar a análise do problema do nível de casca de laranja na superfície pintada de para-choques foi empregado o método gráfico chamado de diagrama de causa e efeito. A partir de um *brainstorming* entre técnicos e engenheiros da empresa foram apuradas as possíveis causas de variação da característica de qualidade em questão. A linha de pintura deste estudo consiste em um processo de aplicação totalmente automatizado. Os robôs de pintura possuem vários parâmetros que caracterizam a aplicação da tinta.

Conforme a norma ASTM D5286 (ASTM, 2005) e o conhecimento empírico dos técnicos e engenheiros, os parâmetros relacionados à aplicação de verniz são: distância do aplicador para a peça, aceleração, alta tensão, rpm (rotações por minuto), atomização, vazão e velocidade. Como a interação entre eles podem garantir ou não a qualidade da pintura, todos foram apontados como fatores que podem interferir no nível de casca de laranja da peça. Porém, durante o *brainstorming*, por decisão dos técnicos, dois dos fatores foram considerados como suplementares, ou seja, serviram apenas de registro. Esses foram a distância de aplicação e a aceleração, que tiveram valores fixos durante todos os ensaios, já os demais fatores foram selecionados como controláveis. Objetivou-se entender sua interação e determinar a combinação ideal entre eles.

A Tabela 2 apresenta na primeira coluna os fatores controláveis selecionados. Na coluna seguinte foi adotada uma simbologia para cada um dos fatores, no intuito de facilitar o entendimento do experimento. Na terceira coluna está representada a unidade de medida de cada fator. Nas colunas seguintes, cada fator é mensurado e dividido em três níveis. Os técnicos acharam conveniente estabelecer valores mínimos (nível 1), abaixo dos usados cotidianamente, e valores

máximos (nível 3), acima dos valores usados (nível 2) para aplicação de verniz nas peças. É importante esclarecer que todos os valores de todos os fatores representados na Tabela 2 são resultados de uma multiplicação de um número pelos valores reais de aplicação. Essa medida foi tomada para preservar os dados verdadeiros de aplicação de verniz do setor de pintura da empresa estudada. Assim os fatores controláveis selecionados foram: velocidade, vazão, ar, rpm e tensão.

Durante os estudos dos efeitos dos fatores controláveis no defeito casca de laranja foram utilizadas as bibliografias de Ross (1991, p. 88-89) e Mori (1990, p. 35-36) para delinear um arranjo ortogonal (Tabela 3). O tipo de arranjo escolhido é o L_{27} , portanto a matriz do experimento correspondente é descrita da seguinte forma $L_{27}(3^5)$, em que o número 27 representa as combinações dos níveis de fatores dispostas em linhas, o número 5 mostra o número de fatores do experimento organizados em colunas e o algarismo 3 indica a quantidade de níveis de cada fator.

5.2 Condução do experimento

Antes da condução dos testes, algumas condições da linha de pintura precisaram ser adaptadas para que fosse possível a realização do experimento. Pode-se dividir esse período de preparação em quatro etapas: corpo de prova; gancheira; programa de robô; método de medição. A primeira etapa tratou-se da preparação dos corpos de prova que precisavam estar disponíveis em quantidade suficiente e em condições de qualidade de injeção aceitáveis para a pintura. A matéria-prima do corpo de prova utilizado para os ensaios foi o polipropileno injetado. O corpo de prova tratou-se de uma peça plana, com medidas de aproximadamente 200 mm de largura por 900 mm de comprimento. Essas peças utilizadas no experimento foram cortadas de um único modelo de para-choque por meio de uma guilhotina. No total, foram utilizados 54 corpos de prova para cumprir todos os ensaios. A segunda etapa da preparação envolveu a montagem de uma gancheira de ferro exclusiva para dispor os corpos de prova de forma mais adequada à sua passagem pelo processo de pintura. A gancheira foi projetada de forma a suportar o máximo de peças possíveis sem

Tabela 2. Níveis dos fatores controláveis.

Fatores de controle	Simbologia	Unidade	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Velocidade (<i>Speed</i>)	A	m/s	680	800	920
Vazão (<i>Paint Fluid Pressure</i>)	B	psi (kPa)	160	190	220
Ar (<i>Atomizing air pressure</i>)	C	psi (kPa)	180	210	240
Rpm (<i>Rotating atomizer head speed</i>)	D	Rotação / min	90	110	130
Tensão (<i>Operating voltage</i>)	E	kilovolts	150	180	210

Fonte: Autores (2015).

Tabela 3. Matriz de experimentos do arranjo ortogonal tipo I_{27} .

Nº do teste	Nível dos fatores				
	A	B	C	D	E
1	680	160	180	90	150
2	680	160	180	90	180
3	680	160	180	90	210
4	680	190	210	110	150
5	680	190	210	110	180
6	680	190	210	110	210
7	680	220	240	130	150
8	680	220	240	130	180
9	680	220	240	130	210
10	800	160	210	130	150
11	800	160	210	130	180
12	800	160	210	130	210
13	800	190	240	90	150
14	800	190	240	90	180
15	800	190	240	90	210
16	800	220	180	110	150
17	800	220	180	110	180
18	800	220	180	110	210
19	920	160	240	110	150
20	920	160	240	110	180
21	920	160	240	110	210
22	920	190	180	130	150
23	920	190	180	130	180
24	920	190	180	130	210
25	920	220	210	90	150
26	920	220	210	90	180
27	920	220	210	90	210

Fonte: Autores (2015).

comprometer as limitações da linha de produção. Dessa forma, a estrutura da gancheira comportava três corpos de prova alinhados e com a mesma distância entre eles. Sendo assim, para cada volta na linha de pintura, três peças podiam ser pintadas. No caso deste experimento, no qual foi estabelecido que as peças não sofreriam aplicação de primer nem de base, foi necessário apenas a programação dos robôs responsáveis pela flambagem das peças e aplicação do verniz. Como a reduzida área superficial, a simplicidade geométrica e a posição dos corpos de prova favoreciam o processo de pintura automatizada, apenas um robô do flameado e um robô de verniz foram suficientes para a realização de cada uma das operações. Da mesma forma, foi desenvolvido o programa para um robô de verniz. O programa consistia em três passadas da pistola do robô (Bell), perpendicularmente à superfície da amostra, com uma *overlap* de 120 mm entre elas, para cada peça. Como a gancheira comportava três peças, constatou-se que havia o risco de contaminação durante a aplicação de pintura pela proximidade entre elas, fato que poderia

interferir nos resultados finais do experimento. Devido a essa possibilidade, foi feito um suporte na gancheira para que, com uma fita especial, fosse possível proteger as peças inferiores de receberem o excesso de produto que caia durante a aplicação na peça superior. A última etapa de preparação foi definir o método de medição adequado para garantir a confiabilidade dos resultados. Para isso foi construído um gabarito de ferro de 150 mm de comprimento para delimitar a área de leitura do equipamento Wave Scan nas peças pintadas. O gabarito era encaixado no furo central da peça e delimitava e garantia a medição na mesma região em todas as peças do experimento.

Encerrada todas as etapas de preparação, a fase de execução dos testes foi iniciada. Em cada um dos ensaios, o primeiro passo foi submeter o corpo de prova a uma inspeção visual para evitar que peças com deformações ou imperfeições superficiais fossem utilizadas nos testes. Ainda antes de entrar na linha de pintura, a peça era numerada com o número do ensaio, data e número da volta da linha para posterior identificação. Após a aprovação, o corpo de prova era armazenado em uma gancheira exclusiva para entrar na linha de pintura. A capacidade da gancheira possibilitava a pintura de três peças por vez. A gancheira já carregada era então colocada no transportador da linha. Já na linha de pintura, a primeira operação sofrida pelas peças foi a limpeza com um pano umedecido com álcool e ar comprimido. Logo após as peças foram submetidas à segunda operação, também de limpeza, na qual era passado um pano resinado e ar ionizado em toda a superfície dos corpos de prova. Todos os processos até esse momento foram manuais. Nas etapas seguintes as operações foram totalmente automatizadas. No próximo momento, os corpos de prova receberam um tratamento de flambagem por todas suas superfícies. Logo após a flambagem, os técnicos configuraram os níveis dos parâmetros de aplicação do verniz, estabelecidos na matriz do experimento, para cada corpo de prova. Portanto, a próxima operação sofrida pelos corpos de prova foi a aplicação da camada de verniz. Durante o processo, algumas informações foram coletadas para garantir a repetitividade das condições ambientais e da matéria-prima de cada ensaio. Foram anotados os valores referentes a temperatura e viscosidade do verniz e as condições da cabine de verniz, como pressão de ar, umidade e temperatura. Por último, as peças foram submetidas a um forno aquecido durante aproximadamente 40 minutos, responsável pela cura do verniz. O processo completo de pintura para cada teste durou aproximadamente 2 horas. Após a saída das peças do forno, elas foram retiradas da gancheira e levadas ao laboratório para análise. Nesse estágio do experimento, os técnicos do laboratório realizaram a medição do comprimento das ondas superficiais da camada de verniz através do equipamento Wave

Scan. Os valores fornecidos pelo equipamento de medição foram então anotados. Por último, as peças foram armazenadas em local apropriado para uma eventual necessidade de reavaliação. Após o fim dos procedimentos de execução dos três testes, foi iniciada a preparação para as próximas três peças que entraram na linha de pintura. A escolha do número do teste que entrava no processo de pintura foi feita através de sorteio aleatório.

5.3 Análise dos resultados do experimento

Após a realização de todos os 27 testes do experimento realizou-se a repetição de cada um deles. Os valores dos fatores ruídos foram extraídos através do aparelho Wave Scan e podem ser vistos na Tabela 4. Os valores dos fatores ruídos SW_1 e LW_1 representam a primeira rodada de testes e os números pertencentes ao SW_2 e LW_2 representam a segunda rodada, na qual cada ensaio teve uma repetição. Na tabela, os valores destacados em verde representam

as condições aceitáveis do nível de casca de laranja. Em um primeiro momento, pode-se avaliar pelos dados dos fatores ruídos da Tabela 4 uma dificuldade de alcançar os valores desejados de casca de laranja no fator *Short Wave* e uma facilidade em atender os números aceitáveis para o fator ruído *Long Wave*.

Sendo assim, foram utilizados os valores da Tabela 4 para realizar a análise da variância para a razão sinal-ruído de ambos os fatores. Considerando primeiramente o fator ruído SW, a análise da variância foi expressa a partir da Figura 6.

No intuito de fazer uma rápida explicação da estrutura da Figura 6, é possível perceber que a primeira coluna (*Source*) mostra todos os fatores e interações passíveis de análise. A segunda coluna (*DF*) expõe os valores dos graus de liberdade (gl) de cada fator e interação. A terceira coluna (*Seq SS*) apresenta a soma dos quadrados (SQ) de cada fator e interação. A quarta coluna (*Adj SS*) representa a soma dos quadrados ajustada dos fatores e interação que repete os valores da soma dos quadrados, com

Tabela 4. Sinal ruído da matriz de experimentos tipo I_{27} .

Nº do teste	Nível dos fatores					Fatores de ruído				Razão	Razão
	A	B	C	D	E	SW_1	LW_1	SW_2	LW_2	S/R (dB) SW	S/R (dB) LW
1	680	160	180	90	150	23,7	5,9	23,6	5,1	-27,48	-14,83
2	680	160	180	90	180	25,6	5,9	24,9	4,8	-28,05	-14,61
3	680	160	180	90	210	30,8	6,0	25,7	6,9	-29,06	-16,21
4	680	190	210	110	150	29,6	8,2	32,5	9,5	-29,85	-18,96
5	680	190	210	110	180	39,2	11,4	40,5	7,7	-32,01	-19,76
6	680	190	210	110	210	29,3	5,6	31,0	8,1	-29,59	-16,86
7	680	220	240	130	150	33,8	10,2	38,3	12,9	-31,15	-21,31
8	680	220	240	130	180	36,0	10,1	44,9	18,1	-32,19	-23,32
9	680	220	240	130	210	32,8	8,5	40,4	16,7	-31,32	-22,44
10	800	160	210	130	150	29,3	5,4	35,7	6,3	-30,28	-15,37
11	800	160	210	130	180	27,6	6,9	33,0	9,1	-29,66	-18,14
12	800	160	210	130	210	37,3	6,9	39,3	14,5	-31,67	-21,10
13	800	190	240	90	150	32,9	10,0	35,9	9,4	-30,74	-19,74
14	800	190	240	90	180	36,1	8,4	28,3	6,8	-30,22	-17,66
15	800	190	240	90	210	29,6	7,9	31,0	6,9	-29,63	-17,40
16	800	220	180	110	150	29,2	7,0	32,5	8,4	-29,80	-17,77
17	800	220	180	110	180	24,6	5,3	23,1	7,4	-27,55	-16,17
18	800	220	180	110	210	30,5	7,5	35,5	11,0	-30,40	-19,48
19	920	160	240	110	150	28,5	10,0	32,1	10,1	-29,64	-20,04
20	920	160	240	110	180	15,0	4,7	24,2	4,9	-26,08	-13,63
21	920	160	240	110	210	38,9	15,3	25,1	5,9	-30,30	-21,29
22	920	190	180	130	150	28,3	6,3	27,0	5,8	-28,84	-15,64
23	920	190	180	130	180	30,7	6,3	38,1	7,2	-30,78	-16,61
24	920	190	180	130	210	38,5	10,0	25,5	6,4	-30,28	-18,48
25	920	220	210	90	150	36,3	7,7	35,2	10,2	-31,07	-19,12
26	920	220	210	90	180	21,3	4,2	18,2	5,5	-25,94	-13,79
27	920	220	210	90	210	38,2	9,0	44,1	8,8	-32,31	-18,99

Fonte: Autores (2015).

exceção da soma total dos quadrados. A coluna seguinte (*Adj SM*) mostra a soma dos quadrados médios (SQM). Após a explicação da estrutura da Figura 6 foi necessário fazer uma análise detalhada dos valores nela obtidos. Conforme Figura 6, a interação entre a pressão de ar (C) e tensão (E) mostra-se não significativa, por apresentar valor muito baixo relativo a soma dos quadrados.

Então foi usada a soma dos quadrados dessa interação como resíduo, ou seja, ele foi retirado do ajuste. Assim o resíduo terá quatro graus de liberdade e $SQ_e = SQ_{CxE} = 2,4988$, conforme a Figura 7. É válido destacar que o fator velocidade também apresentou um baixo valor na soma dos quadrados, mas como a interação velocidade*tensão detém um valor expressivo, esse fator principal não foi usado para acrescentar os valores do resíduo. É importante ressaltar que as interações velocidade*vazão, velocidade*ar, velocidade*rpm, vazão*ar, vazão*rpm e ar*rpm não estão presentes na análise, pois somente com os dados coletados não foi possível estimá-las. Os valores de F podem ser obtidos através da razão

entre soma dos quadrados médios de cada fator e o valor da soma dos quadrados médios do resíduo. No exemplo do fator velocidade, tem-se o seguinte cálculo: $0,9733 \div 0,6247 = 1,56$.

Com base na Figura 8 foi possível então realizar a análise dos resultados a partir do valor-p, uma vez que valores acima de 0,05 indicam que o fator não é significativo. No entanto, durante a análise de valores próximos a 0,05 foi acrescentada a experiência dos profissionais da área para determinar a significância ou não do fator ou interação em questão. Assim sendo, a Figura 8 revela os fatores principais velocidade, vazão e ar e a interação rpm*tensão como não significantes. Já o fator principal rpm e a interação vazão*tensão apresentam o valor-p menor que 0,05, ou seja, os efeitos desses fatores são significativos. O caso do fator controlável tensão e a interação velocidade*tensão expõem casos de valor-p maior que 0,05, porém muito próximo. Nesses dois casos foi decidido que os efeitos de ambos são significativos. Outro indicio da importância dos fatores é que as somas dos quadrados dos fatores rpm, tensão e

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Velocidade	2	1.9466	1.9466	0.97329	*	*
Vazão	2	6.8564	6.8564	3.42822	*	*
Ar	2	6.8985	6.8985	3.44923	*	*
Rpm	2	9.5160	9.5160	4.75799	*	*
Tensão	2	8.0907	8.0907	4.04537	*	*
Velocidade*Tensão	4	15.2914	15.2914	3.82285	*	*
Vazão*Tensão	4	16.0658	16.0658	4.01644	*	*
Ar*Tensão	4	2.4988	2.4988	0.62469	*	*
Rpm*Tensão	4	5.8706	5.8706	1.46764	*	*
Residual Error	0	*	*	*		
Total	26	73.0347				

Figura 6. Análise de variância para razão sinal ruído SW n° 1. Fonte: Minitab (2015).

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Velocidade	2	1.947	1.947	0.9733	1.56	0.316
Vazão	2	6.856	6.856	3.4282	5.49	0.071
Ar	2	6.898	6.898	3.4492	5.52	0.071
Rpm	2	9.516	9.516	4.7580	7.62	0.043
Tensão	2	8.091	8.091	4.0454	6.48	0.056
Velocidade*Tensão	4	15.291	15.291	3.8229	6.12	0.054
Vazão*Tensão	4	16.066	16.066	4.0164	6.43	0.049
Rpm*Tensão	4	5.871	5.871	1.4676	2.35	0.214
Residual Error	4	2.499	2.499	0.6247		
Total	26	73.035				

Figura 7. Análise de variância para razão sinal ruído SW n° 2. Fonte: Minitab (2015).

as interações velocidade*tensão e vazão*tensão agregados representam mais de 65% do efeito total sobre o fator ruído SW.

O fator ruído LW foi analisado da mesma maneira que o fator ruído SW. Conforme a Figura 9, o fator controlável velocidade apresentou um baixo valor na soma dos quadrados, mas como a interação velocidade*tensão detém um valor expressivo esse fator principal não foi usado para acrescentar os valores do resíduo. Já a interação ar*tensão possui um valor pequeno de soma dos quadrados, ou seja, será usado para acrescentar a soma dos quadros do resíduo. Assim, o resíduo terá quatro graus de liberdade e $SQ_R = SQ_{AR \times TENSÃO} = 4,128$ (Figura 9). É válido ressaltar que as interações velocidade*vazão, velocidade*ar, velocidade*rpm, vazão*ar, vazão*rpm e ar*rpm não estão presentes na análise pois somente com os dados coletados não foi possível estimá-las. Segundo a Figura 9, é possível identificar que o fator velocidade e as interações vazão*tensão e rpm*tensão possuem o valor-p maior que 0,05, ou seja, sem efeitos significativos. Já os fatores principais vazão, ar, rpm, tensão e as interações velocidade*tensão e

vazão*tensão possuem o valor-p menor que 0,05, o que indica que seus efeitos são significativos.

As informações sobre a análise da variância possibilitaram a avaliação dos principais fatores controláveis que influenciam no fator ruído SW e também os que não são significantes. Além dos fatores, pode-se analisar a importância das interações vazão*tensão e velocidade*tensão na resposta do fator ruído, assim como a insignificância da interação rpm*tensão. Objetivando compreender melhor a relação entre os fatores que compõem cada interação fez-se necessário utilizar uma das ferramentas do projeto robusto, o gráfico de interação. Esse tipo de gráfico serve para revelar uma mudança de comportamento de um dos fatores quando há uma variação nos diferentes níveis do outro fator em relação à característica de interesse. As Figuras 10, 11, 12, 13, 14 e 15 ilustram a interação entre as variáveis analisadas.

Dando continuidade à análise dos fatores ruído e em busca da combinação ótima entre os níveis dos fatores controláveis, o projeto robusto dispõe da análise das médias dos valores da razão sinal ruído.

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Velocidade	2	6.390	6.3901	3.1950	*	*
Vazão	2	16.904	16.9039	8.4520	*	*
Ar	2	40.737	40.7372	20.3686	*	*
Rpm	2	22.525	22.5248	11.2624	*	*
Tensão	2	19.127	19.1269	9.5634	*	*
Velocidade*Tensão	4	27.919	27.9189	6.9797	*	*
Vazão*Tensão	4	17.316	17.3162	4.3290	*	*
Ar*Tensão	4	4.128	4.1284	1.0321	*	*
Rpm*Tensão	4	21.158	21.1583	5.2896	*	*
Residual Error	0	*	*	*		
Total	26	176.205				

Figura 8. Análise de variância para razão sinal ruído LW nº 1. Fonte: Minitab (2015).

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Velocidade	2	6.390	6.390	3.195	3.10	0.154
Vazão	2	16.904	16.904	8.452	8.19	0.039
Ar	2	40.737	40.737	20.369	19.74	0.008
Rpm	2	22.525	22.525	11.262	10.91	0.024
Tensão	2	19.127	19.127	9.563	9.27	0.032
Velocidade*Tensão	4	27.919	27.919	6.980	6.76	0.046
Vazão*Tensão	4	17.316	17.316	4.329	4.19	0.097
Rpm*Tensão	4	21.158	21.158	5.290	5.13	0.071
Residual Error	4	4.128	4.128	1.032		
Total	26	176.205				

Figura 9. Análise de variância para razão sinal ruído LW nº 2. Fonte: Minitab (2015).

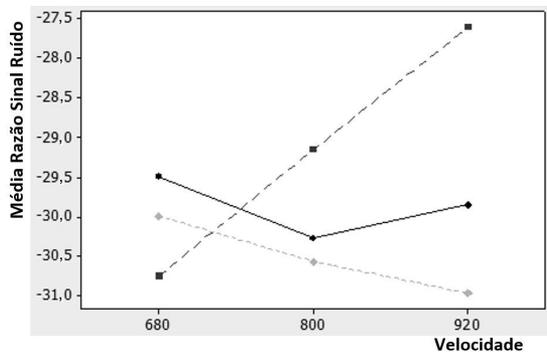


Figura 10. Gráfico de interação velocidade*tensão (SW). Fonte: Minitab (2015).

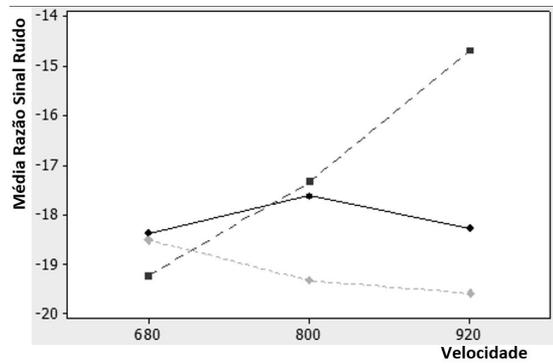


Figura 13. Gráfico de interação velocidade*tensão (LW). Fonte: Minitab (2015).

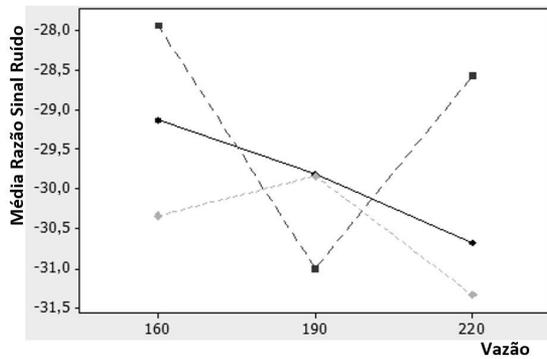


Figura 11. Gráfico de interação vazão*tensão (SW). Fonte: Minitab (2015).

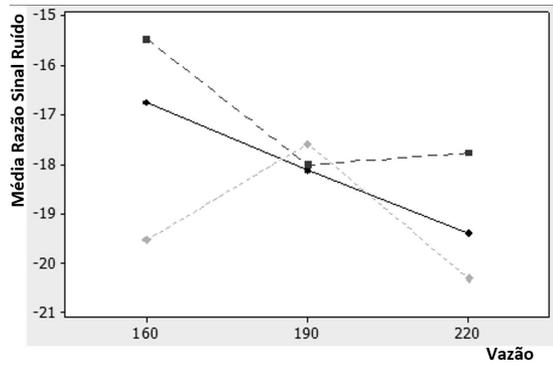


Figura 14. Gráfico de interação vazão*tensão (LW). Fonte: Minitab (2015).

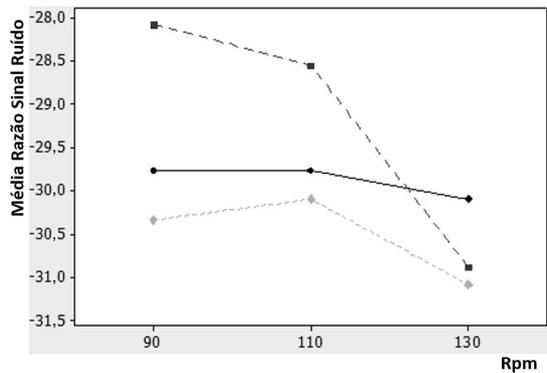


Figura 12. Gráfico de interação rpm*tensão (SW). Fonte: Minitab (2015).

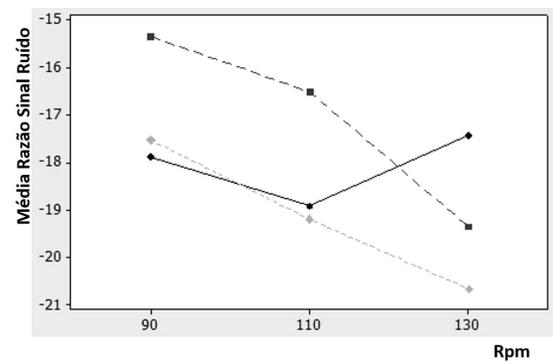


Figura 15. Gráfico de interação rpm*tensão (LW). Fonte: Minitab (2015).

Baseada nos valores obtidos pelos cálculos da razão sinal ruído SW apresentados na Tabela 4, foi criada a Tabela 5 das médias, na qual os cinco fatores controláveis encontram-se dispostos em colunas e seus três níveis estão organizados em linhas, nas quais os níveis mais baixos correspondem ao n° 1, os intermediários, ao n° 2 e os mais altos, ao n° 3.

Por exemplo, o valor da coluna do fator velocidade com a linha do Level n° 1 (-30,08 dB) corresponde a média de todos os valores da razão sinal ruído SW em que os testes possuíam o nível mais baixo do fator velocidade (680 m/s).

Ainda sobre a Tabela 5, na linha de referência “Variação”, pode-se encontrar os valores resultantes

da diferença entre o maior valor e menor valor dos três valores das médias da razão sinal ruídos de cada fator controlável. Na coluna do fator velocidade, por exemplo, subtraído do maior valor (-29,47 dB) entre os três o menor valor (-30,08 dB), obtém-se o valor 0,61 dB. Os valores dessas diferenças servem para classificar na linha “Desempenho” em qual fator ocorre maior variação da razão sinal ruído. No caso, é no fator tensão que ocorre maior variação. Também é possível constatar que os efeitos dos fatores rpm e tensão são aproximadamente duas vezes mais significativos que o efeito do fator velocidade.

Partindo do pressuposto que é desejável a maximização da razão sinal ruído, é possível estabelecer a combinação ótima para o fator ruído SW. Os valores dos níveis que maximizam a razão sinal ruído para cada fator controlável estão destacados pelas linhas pontilhadas na Figura 16. Portanto, a combinação ótima é: velocidade = 920; vazão = 160; ar = 180; rpm = 90; tensão = 180.

Através da Figura 17 é possível perceber quais são os níveis de cada fator que maximizam a razão

sinal ruído: velocidade = 920; vazão = 160; ar = 180; rpm = 90; tensão = 180. Ou também na forma: A_3, B_1, C_1, D_1, E_2 .

Assim é possível perceber que apenas a tensão (E) está sendo utilizada na aplicação atual com o nível apresentado na combinação ótima (E_2). Já os demais fatores não apresentaram níveis da combinação ótima condizentes com os valores configurados para a aplicação atual de verniz. A velocidade, por exemplo, na combinação ótima aparece com o seu nível mais alto. Já os fatores vazão, ar e rpm demonstraram ser melhor aplicados nos níveis mais baixos em relação aos valores utilizados na linha atualmente.

O teste da combinação ótima foi aplicado seguindo o mesmo número de repetições do experimento. Conforme a Tabela 6, os valores dos fatores ruído SW_1 e LW_1 representam a primeira amostra do teste da combinação ótima e os números pertencentes ao SW_2 e LW_2 representam a segunda amostra com os mesmos níveis dos fatores controláveis. Os valores alcançados para o comprimento da onda LW são melhores do que os obtidos durante todos os testes

Tabela 5. Tabela de média para a razão sinal-ruído menor é melhor (SW).

Nível	Velocidade	Vazão	Ar	Rpm	Tensão
1	-30,08	-29,13	-29,14	-29,39	-29,87
2	-29,99	-30,22	-30,26	-29,47	-29,16
3	-29,47	-30,19	-30,14	-30,69	-30,50
Variação	0,61	1,08	1,13	1,30	1,34
Desempenho	5	4	3	2	1

Fonte: Minitab (2015).

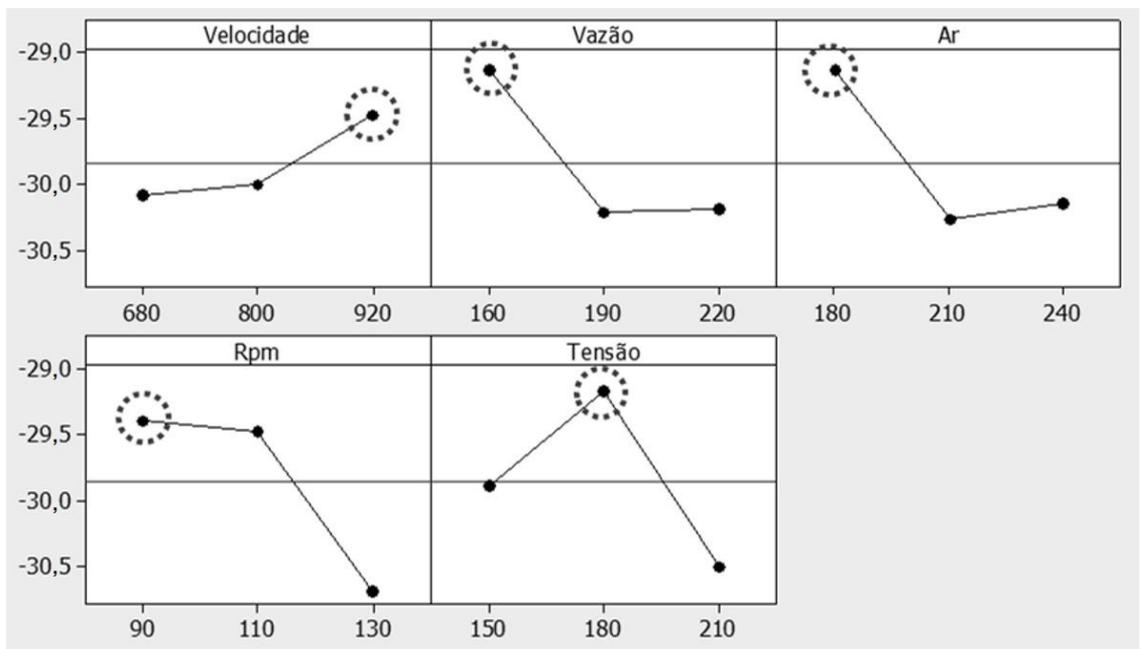


Figura 16. Efeitos principais para razão sinal-ruído menor é melhor (SW). Fonte: Minitab (2015).

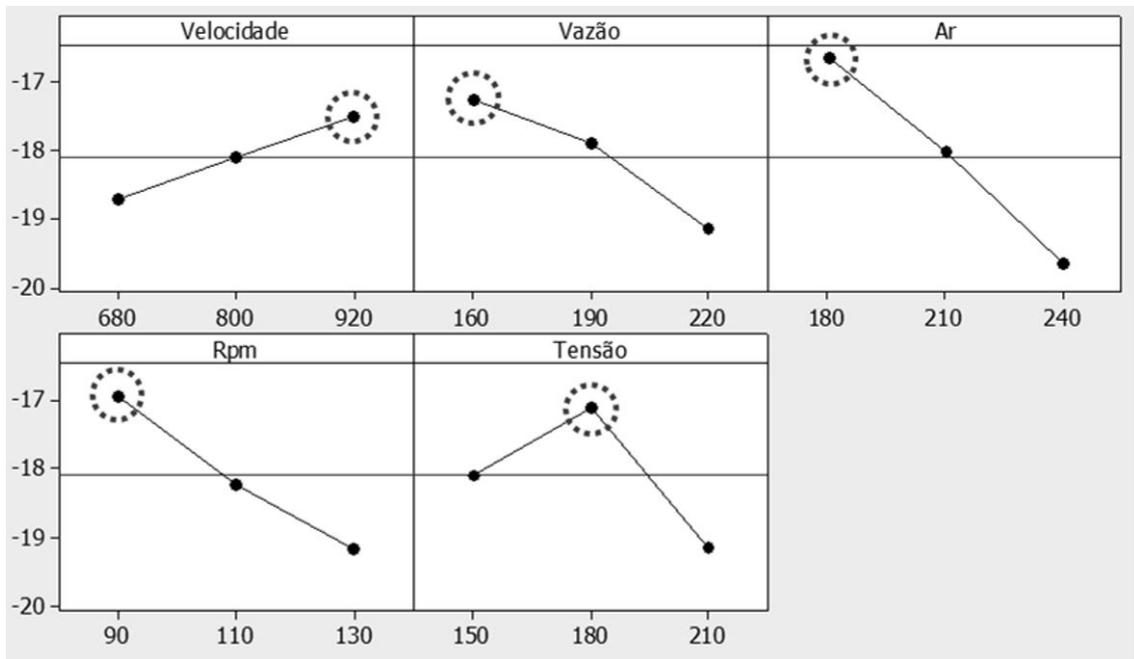


Figura 17. Efeitos principais para razão sinal-ruído menor é melhor (LW). Fonte: Minitab (2015).

Tabela 6. Combinação ótima.

Nº do teste	Nível dos fatores					Fatores de ruído			
	A	B	C	D	E	SW ₁	LW ₁	SW ₂	LW ₂
Combinação ótima	920	160	180	90	180	15,2	4,1	14,8	4,1

Fonte: Autores (2015).

do experimento. Já para o fator ruído SW, o primeiro valor, de 15,2 mm, na coluna do SW₁, mesmo sendo aceitável, é superior ao menor valor do experimento obtido no ensaio nº 20, conforme Tabela 4. No entanto, o segundo valor de SW, 14,8 mm, é o melhor valor se comparado com todos os valores dos testes do experimento. Assim, a média dos valores obtidos da combinação ótima é menor que qualquer uma das médias dos testes do experimento.

6 Considerações finais

A realização da pesquisa na empresa parceira dependeu de um aprofundado entendimento sobre o processo de produção dos para-choques. A análise das normas que normatizam a pintura automotiva foi pré-requisito do trabalho, para possibilitar a realização do experimento. A pesquisa sobre o projeto robusto revelou uma metodologia adequada que facilitaria a obtenção de resultados, em tempo e custo reduzidos. O fluxograma das etapas do projeto robusto aqui apresentado foi seguido rigorosamente e os resultados da sua aplicação foram alcançados com sucesso. Portanto, sob o ponto de vista do método escolhido, é possível afirmar que o objetivo do projeto robusto

de identificar e reduzir as formas de variabilidade do processo de produção sem eliminá-las, no intuito de melhorar a qualidade do produto, foi alcançado.

O trabalho também se preocupou em identificar as causas de variabilidade do processo de pintura de para-choques que podem resultar na intensificação do aspecto de casca de laranja. Para tanto, o diagrama de causa e efeito aqui elaborado explicitou as causas de variabilidade da linha de pintura que podem vir a causar o efeito de casca de laranja na superfície da peça pintada. A revisão da literatura e o histórico técnico dos profissionais que atuam no processo de pintura de peças plásticas possibilitaram a seleção dos fatores controláveis mais adequados à aplicação do experimento: velocidade, vazão, ar, rpm e tensão.

O estudo das interações existentes entre os fatores controláveis envolvidos no experimento deu-se através das mudanças significativas nos valores das médias da razão sinal ruído em determinados níveis de um fator quando outro fator variava. Para o fator ruído SW, somente o nível 180 kV do fator controlável tensão apresentou interação com os fatores: velocidade, vazão e rpm. Para o fator ruído LW, a interação entre os fatores velocidade e tensão

foi percebida apenas pelas mudanças significativas das médias da razão sinal ruído do nível 180 kV do fator controlável tensão. Já a interação com o fator vazão foi percebida em todos os níveis do fator tensão: 150 kV, 180 kV e 210 kV. E a interação com o fator rpm pode ser analisada em dois níveis do fator tensão: 180 kV e 210 kV.

A proposta de melhoria da qualidade do produto, como almejava o Método do Projeto Robusto, veio através da proposta de uma combinação ótima dos níveis dos parâmetros de aplicação de verniz.

Após a aplicação dos cálculos da razão sinal ruído para todos os testes do experimento constatou-se que condições aceitáveis de casca de laranja são mais facilmente alcançadas para o fator ruído LW do que para o fator SW.

Para o fator ruído SW, os fatores controláveis que possuem maior influência no valor da variável resposta são: rpm e tensão. Além desses dois, as interações que também se revelaram influentes nos valores de SW foram: vazão*tensão e velocidade*tensão. Já o fator velocidade, não se mostrou significativo como fator único na determinação da intensidade do aspecto de casca de laranja em para-choques pintados, entretanto apresentou relevância quando associado a certos níveis do fator tensão. Portanto, para o fator SW, os fatores e interações não significativos são: velocidade, vazão, ar, ar*tensão e rpm*tensão.

Através do estudo do p-valor, revelou-se que os fatores controláveis que mais afetam os valores do fator ruído LW são vazão, ar, rpm e tensão. Nas interações, somente a velocidade*tensão apresentou efeitos significativos no valor resposta de LW. No entanto, é importante salientar que para o fator ruído LW, mesmo apresentando vários fatores controláveis relevantes, o fator ar se destacou como o mais importante dentre eles. Nesse caso, os fatores e interações não significativos foram: velocidade, ar*tensão, vazão*tensão e rpm*tensão.

Salienta-se que esta pesquisa, além de contribuir diretamente com a indústria, também contribui para a academia, pois pode-se concluir que o sucesso da aplicação do projeto robusto no presente estudo só reforça a eficácia do método. Além disso, comprova a importância da interação entre a aplicação das técnicas estatísticas na realidade produtiva da indústria para a melhoria de processos.

Não se pode esquecer dos desafios encontrados ao longo desta pesquisa, pois apesar de um dos pesquisadores pertencer ao quadro de funcionários da referida organização, a pesquisa sofreu alguns atrasos devido a restrições de tempo para organizar os experimentos dentro da rotina industrial estudada.

Trabalhos futuros podem explorar a interferência das camadas precedentes do verniz na ocorrência de casca de laranja nas superfícies de para-choques pintados. Ou seja, é possível seguir a mesma metodologia

do presente trabalho para investigar os fatores de aplicação do primer e da base? Outra abertura para novas pesquisas seria identificar os impactos de diferentes tipos de causas de variabilidade no nível de casca de laranja de para-choques pintados, não selecionadas, neste trabalho, para o desenvolvimento do experimento. Por exemplo, os fatores relacionados à matéria-prima utilizada na pintura: parâmetros da preparação do primer, da base ou do verniz.

Referências

- Adamsons, K. (2000). Chemical surface characterization and depth profiling of automotive coating systems. *Progress in Polymer Science*, 25(9), 1363-1409. [http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6700\(00\)00031-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6700(00)00031-9).
- Adamsons, K. (2012). A modern analytical toolbox: defect. (W&D) studies of automotive coating systems, including depth profiling studies. *Journal of Coatings Technology and Research*, 9(6), 745-756. <http://dx.doi.org/10.1007/s11998-012-9412-z>.
- American Society for Testing and Materials – ASTM. (2005). *ASTM 2586: determination of transfer efficiency under general production conditions for spray application of paints. Section 9.16: adjust the following equipment operating parameters, as appropriate, to the values desired for testing*. West Conshohocken: ASTM.
- Arvidsson, M., & Gremyr, I. (2008). Principles of Robust design methodology. *Quality and Reliability Engineering International*, 24(1), 23-35. <http://dx.doi.org/10.1002/qre.864>.
- Barros, B., No., Scarminio, I. S., & Bruns, R. E. (2010). *Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria* (4. ed.). Campinas: Editora da Unicamp.
- Bernardin, A. M. (1994). *Delineamento de experimentos utilizando as técnicas de Taguchi para formulação de massa cerâmica* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Carvalho, P. R. W. (1993). *Controle de qualidade na pintura industrial* (Monografia). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Chen, C. C., & Chuang, M. C. (2008). Integrating the Kano model into a robust design approach to enhance customer satisfaction with product design. *International Journal of Production Economics*, 114(2), 667-681. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.02.015>.
- Chiavenato, I. (2004). *Introdução a teoria geral da administração*. Rio de Janeiro: McGraw Hill.
- Costa, A. F. B., Epprecht, E. K., & Carpinetti, L. C. R. (2005). *Controle estatístico de qualidade* (Vol. 2). São Paulo: Atlas.
- Costa, I., & Queiroz, S. R. R. (2000). *Autopeças no Brasil: mudanças e competitividade na década de noventa*.

- Revista de Administração da Universidade de São Paulo*, 35(3), 27-37.
- Domenico, J. D., & Henshaw, P. (2012). The effects of basecoat bell application parameters on elements of appearance for an automotive coatings process. *Journal of Coatings Technology*, 9(6), 675-686. <http://dx.doi.org/10.1007/s11998-012-9414-x>.
- Fazenda, J. M. R. (2005). *Tintas e vernizes: ciência e tecnologia* (3. ed.). São Paulo: Edgard Blucher.
- Jurgetz, A. (1995). *Automotive paint performance. metal finishing* (pp. 53-55). Alemanha: Dingolfing.
- Kim, K. D., Han, D. N., & Kim, H. T. (2004). Optimization of experimental conditions based on the Taguchi robust design for the formation of nano-sized silver particles by chemical reduction method. *Chemical Engineering Journal*, 104(1-3), 55-61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2004.08.003>.
- Kumar, A., Motwani, J., & Otero, L. (1996). An application of Taguchi's robust experimental design technique to improve service performance. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 13(4), 85-98. <http://dx.doi.org/10.1108/02656719610114425>.
- Lai, H. H., Chang, Y. M., & Chang, H. C. (2005). A robust design approach for enhancing the feeling quality of a product: a car profile case study. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(5), 445-460. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ergon.2004.10.008>.
- Miguel, P. A. C., Fleury, A., Mello, C. H. P., Nakano, D. N., Turrini, J. B., Ho, L. L., Morabito, R., Martins, R. A., & Pureza, V. (2010). *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão das operações*. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Minitab. (2015). *Minitab Version 16*. Recuperado em 28 de agosto de 2015, de <http://www.minitab.com/en-US/products/minitab/default.aspx>
- Mirrha, M. (2013). Linha Branca. *Revista Tratamento de Superfície*, (181), 44-49.
- Monks, J. G. (1987). *Administração da produção*. São Paulo: McGraw-Hill.
- Montgomery, D. C. (2005). *Introduction to statistical quality control*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2012). *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. Rio de Janeiro: LTC.
- Mori, T. (1990). *The new experimental design: Taguchi's approach to quality engineering*. Michigan: ASI Press.
- Muhammad, N., Manurung, Y. H. P., Jaafar, R., Abas, S. K., Tham, G., & Haruman, E. (2013). Model development for quality features of resistance spot welding using multi-objective Taguchi method and response surface methodology. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 24(6), 1175-1183. <http://dx.doi.org/10.1007/s10845-012-0648-3>.
- Najjar, D., Bigerelle, M., Hennebel, F., & Iost, A. (2005). Contribution of statistical methods to the study of worn paint coatings surface topography. *Surface and Coatings Technology*, 200(20-21), 6088-6100. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.09.025>.
- Pierozan, L. (2001). *Estabilização de processos: um estudo de caso no setor de pintura automotiva* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Ross, J. P. (1991). *Aplicações das técnicas taguchi na engenharia da qualidade*. São Paulo: McGraw-Hill.
- Samohyl, R. W. (2009). *Controle estatístico da qualidade*. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Vanalle, R. M., & Salles, J. A. A. (2011). Relação entre montadoras e fornecedores: modelos teóricos e estudos de caso da indústria automobilística brasileira. *Gestão & Produção*, 18(2), 237-250. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2011000200002>.
- Weiss, K. (1997). D. Paint and coatings: a mature industry in transition. *Progress in Polymer Science*, 22(2), 203-245. [http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6700\(96\)00019-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6700(96)00019-6).
- Wu, D. H., & Chen, H. H. (2005). Application of Taguchi robust design method to SAW mass sensing device. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 52(12), 2403-2410. <http://dx.doi.org/10.1109/TUFFC.2005.1563284>. PMID:16463507.