

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRUNO DE SOUZA

USO DO PROJETO ROBUSTO PARA IDENTIFICAÇÃO DE FATORES QUE  
CONTRIBUEM NA INTENSIDADE DO ASPECTO DE “CASCA DE LARANJA” EM  
SUPERFÍCIE DE PARA-CHOQUES PINTADOS

CURITIBA

2015

BRUNO DE SOUZA

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 apresentada como requisito do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná à obtenção do grau de Mestre.

Orientador(a): Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Adriana de Paula Lacerda Santos

Co-orientador: Prof. Dr. Fabiano Oscar Drozda

CURITIBA

2015

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 / Bruno de Souza. – Curitiba, 2015.

120 f. : il.; graf., tab.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Orientadora: Adriana de Paula Lacerda Santos

Coorientador: Fabiano Drozda

1. Automóveis - Pintura. 2. Tinta. 3. Casca de laranja. I. Santos, Adriana de Paula Lacerda. II. Drozda, Fabiano. III. Título.

CDD 629.26

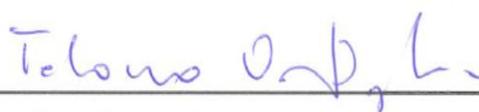
## TERMO DE APROVAÇÃO

BRUNO DE SOUZA

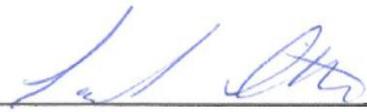
USO DO PROJETO ROBUSTO PARA IDENTIFICAÇÃO DE FATORES QUE  
CONTRIBUEM NA INTENSIDADE DO ASPECTO DE "CASCA DE LARANJA" EM  
SUPERFÍCIE DE PARA-CHOQUES PINTADOS

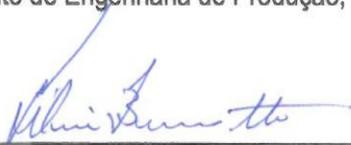
Dissertação apresentada como requisito do programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Produção do setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná  
à obtenção do grau de Mestre, pela banca examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof.ª Dr.ª Adriana de Paula Lacerda Santos  
Orientadora – Departamento de Engenharia de Produção, UFPR

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Fabiano Oscar Drozda  
Co-orientador – Departamento de Engenharia de Produção, UFPR

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin  
Departamento de Engenharia de Produção, UFPR

  
\_\_\_\_\_  
Prof.ª Dr.ª Izabel Cristina Zattar  
Departamento de Engenharia de Produção, UFPR

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Silvio Francisco Brunatto  
Departamento de Engenharia Mecânica, UFPR

Curitiba, 15 de abril de 2015.

À Letícia, minha esposa.

Aos meus pais Dorian e Eliane.

À tia Elo, minha madrinha (*in memoriam*).

Por todo amor e compreensão nos momentos em que precisei estar ausente.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela vida, saúde e proteção.

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Izabel Cristina Zattar, por me estimular a ingressar no programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Adriana de Paula Lacerda Santos, pela orientação, apoio e paciência.

Ao Prof. Fabiano Drozda, pelas dicas em momentos cruciais do trabalho.

Aos funcionários da empresa parceira que contribuíram para o desenvolvimento do trabalho.

## RESUMO

O cenário competitivo do setor automotivo brasileiro possibilitou nas últimas décadas a implantação de indústrias de autopeças no país. O serviço de fornecer autopeças requer atender as cobranças das montadoras de veículos por produtos diferenciados e que satisfaçam ao alto nível de exigência do cliente final. Em busca da preferência das grandes marcas automotivas, empresas de autopeças vislumbram na melhoria da qualidade de seus produtos um diferencial competitivo. 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 trabalho visou 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 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 mililitro/minuto; ar modelador = 180 bar; rotação por minuto = 90 rotações/minuto; alta tensão = 180 kilovolts.

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

## ABSTRACT

The competitive marketplace of the Brazilian automotive sector in recent decades has enabled the implementation of auto parts industries in the country. The auto parts suppliers must meet the automotive industry requirements for outstanding products to satisfy the end customer. In search of the preference of the great automotive brands, auto parts companies aim improving the quality of their products as competitive advantage. 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 your painted surface. This study aimed to identify the clear coat application factors which effect on the intensity of orange peel appearance on painted bumpers 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, which 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 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.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– PRODUÇÃO DE AUTOVEÍCULOS NO BRASIL.....	16
FIGURA 2	– EMPREGO NO SETOR DE AUTOVEÍCULOS.....	17
FIGURA 3	– ANÁLISE DE INVENTÁRIO DE UMA UNIDADE DE PRODUÇÃO.....	22
FIGURA 4	– DESTINAÇÃO UNITÁRIA DO CICLO DE VIDA DE UM PÁRA-CHOQUES.....	23
FIGURA 5	– DIVISÃO DOS PLÁSTICOS.....	24
FIGURA 6	– PROCESSO DE INJEÇÃO (ESQUEMA).....	26
FIGURA 7	– COMPOSIÇÃO DAS TINTAS.....	28
FIGURA 8	– SISTEMA DE PINTURA DE CAMADAS MÚLTIPLAS.....	30
FIGURA 9	– ESQUEMA DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE FLAMBAGEM.....	33
FIGURA 10	– SINO ROTATIVO DE ALTA VELOCIDADE.....	37
FIGURA 11	– EQUIPAMENTO ELETROSTÁTICO PARA APLICAÇÃO AUTOMÁTICA.....	38
FIGURA 12	– FUNÇÃO PERDA.....	42
FIGURA 13	– CAUSAS CASUAIS DE VARIAÇÃO.....	42
FIGURA 14	– CAUSAS ESPECIAIS DE VARIAÇÃO.....	43
FIGURA 15	– ESCORRIMENTO.....	44
FIGURA 16	– CASCA DE LARANJA.....	45
FIGURA 17	– FERVURA.....	46
FIGURA 18	– DESPLACAMENTO.....	47
FIGURA 19	– CRATERAS.....	47
FIGURA 20	– IMPUREZAS.....	48
FIGURA 21	– <i>MICRO WAVE SCAN</i> .....	49
FIGURA 22	– DIFERENÇAS NA SUPERFÍCIE DA CAMADA DE VERNIZ AUTOMOTIVO.....	50
FIGURA 23	– CARACTERÍSTICAS DOS ASPECTOS USADOS PARA MONITORAR ALTERAÇÕES DOS SISTEMAS AUTOMOTIVOS .....	51
FIGURA 24	– FUNÇÃO PERDA DE QUALIDADE TIPO DEGRAU.....	55
FIGURA 25	– FUNÇÃO PERDA DE QUALIDADE TIPO QUADRÁTICA.....	56
FIGURA 26	– ARRANJO ORTOGONAL $L_8$ .....	59
FIGURA 27	– FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DO PROJETO ROBUSTO REALIZADAS NA PESQUISA.....	67
FIGURA 28	– FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE PINTURA AUTOMÁTICA DA EMPRESA PARCEIRA.....	72
FIGURA 29	– DESEMPENHO DA LINHA DE PINTURA DA EMPRESA PARCEIRA .....	73
FIGURA 30	– PRINCIPAIS DEFEITOS DE PINTURA DO POLIMENTO .....	74
FIGURA 31	– HISTOGRAMA DO COMPRIMENTO DE ONDA SW.....	76
FIGURA 32	– HISTOGRAMA DO COMPRIMENTO DE ONDA LW.....	77
FIGURA 33	– DIAGRAMA DE CAUSA E EFEITO.....	79

FIGURA 34	– CORPO DE PROVA DO EXPERIMENTO.....	85
FIGURA 35	– GANCHEIRA DO EXPERIMENTO.....	86
FIGURA 36	– PEÇAS CARREGADAS NA GANCHEIRA COM ISOLAMENTO PLÁSTICO.....	86
FIGURA 37	– TRAJETÓRIA DO PROGRAMA DO ROBÔ DE VERNIZ.....	87
FIGURA 38	– GABARITO PARA A MEDIÇÃO COM WAVE SCAN.....	88
FIGURA 39	– MÉTODO DE MEDIÇÃO DO EXPERIMENTO.....	88
FIGURA 40	– LIMPEZA COM PANO UMIDECIDO COM ÁLCOOL E AR COMPRIMIDO.....	89
FIGURA 41	– LIMPEZA COM PANO RESINADO E AR IONIZADO.....	89
FIGURA 42	– OPERAÇÃO DE FLAMBAGEM.....	90
FIGURA 43	– OPERAÇÃO DE APLICAÇÃO DO VERNIZ.....	90
FIGURA 44	– GRÁFICO DE INTERAÇÃO VELOCIDADE*TENSÃO (SW).....	100
FIGURA 45	– GRÁFICO DE INTERAÇÃO VAZÃO*TENSÃO (SW).....	101
FIGURA 46	– GRÁFICO DE INTERAÇÃO RPM*TENSÃO (SW).....	102
FIGURA 47	– GRÁFICO DE INTERAÇÃO VELOCIDADE*TENSÃO (LW).....	103
FIGURA 48	– GRÁFICO DE INTERAÇÃO VAZÃO*TENSÃO (LW).....	104
FIGURA 49	– GRÁFICO DE INTERAÇÃO RPM*TENSÃO (LW) .....	104
FIGURA 50	– EFEITOS PRINCIPAIS PARA RAZÃO SINAL-RUÍDO MENOR É MELHOR (SW) .....	106
FIGURA 51	– EFEITOS PRINCIPAIS PARA RAZÃO SINAL-RUÍDO MENOR É MELHOR (LW) .....	108

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

QUADRO 1	– TRABALHOS ACADÊMICOS RELACIONADOS A PINTURA AUTOMOTIVA.....	19
QUADRO 2	– GRUPOS DE MATÉRIAS-PRIMAS.....	28
QUADRO 3	– CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	65
QUADRO 4	– NORMA DE QUALIDADE PARA O WAVE SCAN.....	74
QUADRO 5	– NÍVEIS DOS FATORES CONTROLÁVEIS.....	83
QUADRO 6	– COMBINAÇÃO ÓTIMA DOS NÍVEIS DOS FATORES CONTROLÁVEIS.....	108
TABELA 1	– UM EXPERIMENTO INTEIRAMENTE AO ACASO.....	61
TABELA 2	– FÓRMULAS PARA A ANÁLISE DA VARIÂNCIA.....	62
TABELA 3	– ANÁLISE DE VARIÂNCIA DE UM EXPERIMENTO INTEIRAMENTE AO ACASO.....	63
TABELA 4	– MATRIZ DE EXPERIMENTOS DO ARRANJO ORTOGONAL TIPO $L_{27}$ .....	84
TABELA 5	– SINAL RUÍDO DA MATRIZ DE EXPERIMENTOS TIPO $L_{27}$ .....	91
TABELA 6	– DADOS ESTATÍSTICOS SW.....	92
TABELA 7	– DADOS ESTATÍSTICOS LW.....	92
TABELA 8	– ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA RAZÃO SINAL RUÍDO SW N°1.....	93
TABELA 9	– ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA RAZÃO SINAL RUÍDO SW N°2.....	96
TABELA 10	– ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA RAZÃO SINAL RUÍDO LW N°1.....	98
TABELA 11	– ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA RAZÃO SINAL RUÍDO LW N°2.....	98
TABELA 12	– TABELA DE MÉDIA PARA A RAZÃO SINAL-RUÍDO MENOR É MELHOR (SW).....	105
TABELA 13	– TABELA DE MÉDIA PARA A RAZÃO SINAL-RUÍDO MENOR É MELHOR (LW).....	107
TABELA 14	– CONFIRMAÇÃO DA COMBINAÇÃO ÓTIMA.....	109

## LISTA DE SIGLAS

ANOVA	- ANalysis Of VAriance
AO	- Arranjos Ortogonais
ASTM	- American Society for Testing and Materials
CQ	- Controle de Qualidade
Db	- Decibel
DDP	- Diferença de Potencial
DOI	- Distinctness of Image
E-coat	- Eletrodeposição
EPDM	- Ethylene-Propylene-Diene Terpolymers
GL	- Grau de Liberdade
MSD	- Mean Square Deviation
POE	- Polyethylen Elastomer
PP	- Polipropileno
$SQ_e$	- Soma dos Quadrados do Erro residual
$SQ_i$	- Soma dos Quadrados de cada fator
$SQ_T$	- Soma dos Quadrados total
TQM	- Total Quality Management
UV	- Ultravioleta

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.3	JUSTIFICATIVA.....	16
1.4	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO.....	19
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>21</b>
2.1	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO PARA-CHOQUE.....	21
2.1.1	O plástico.....	23
2.1.2	Polipropileno.....	24
2.1.3	Processo de transformação por injeção.....	25
2.2	PINTURA AUTOMOTIVA.....	27
2.2.1	Tinta.....	27
2.2.1.1	Revestimento da pintura.....	29
2.2.2	Preparação de superfície.....	31
2.2.3	Aplicação da Tinta.....	33
2.2.3.1	Aplicação eletrostática.....	35
2.2.3.2	Sino rotativo de alta velocidade.....	37
2.3	QUALIDADE.....	38
2.3.1	Controle de qualidade.....	39
2.3.2	Causas da variabilidade.....	41
2.3.3	Tipos de defeitos de qualidade na pintura automotiva.....	43
2.3.4	Controle da qualidade na pintura automotiva.....	48
2.4	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS.....	51
2.5	PROJETO ROBUSTO.....	52
2.5.1	Conceito de Ruído.....	52
2.5.2	Função Perda de Qualidade.....	54
2.5.3	Razão Sinal Ruído.....	57
2.5.4	ARRANJOS ORTOGONAIS.....	58
2.6	ANÁLISE DE VARIÂNCIA.....	60
2.6.1	Cálculo de análise de variância.....	61

<b>3</b>	<b>MÉTODO DE PESQUISA.....</b>	<b>64</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA.....	64
3.2	APRESENTAÇÃO DA EMPRESA PARCEIRA.....	65
3.3	ETAPAS DO PROJETO ROBUSTO.....	66
3.3.1	Planejamento.....	67
3.3.2	Execução.....	68
3.3.3	Análise.....	68
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>70</b>
4.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVO.....	70
4.2	IDENTIFICAÇÃO DA CARACTERÍSTICA DA QUALIDADE.....	77
4.3	CONDUÇÃO DO <i>BRAINSTORMING</i> .....	78
4.3.1	Medição.....	79
4.3.2	Matéria-Prima.....	80
4.3.3	Mão-de-Obra.....	81
4.3.4	Meio Ambiente.....	81
4.3.5	Método de Trabalho.....	81
4.3.6	Máquina.....	82
4.4	SELEÇÃO DO ARRANJO ORTOGONAL.....	83
4.5	CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO.....	84
4.5.1	Preparação .....	85
4.5.2	Execução .....	88
4.6	ANÁLISE DOS RESULTADOS DO EXPERIMENTO.....	91
4.6.1	Análise das interações entre os fatores do experimento .....	99
4.7	DETERMINAÇÃO DA COMBINAÇÃO ÓTIMA.....	105
4.8	CONFIRMAÇÃO DA COMBINAÇÃO ÓTIMA.....	108
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>110</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	110
5.2	CONTRIBUIÇÃO À EMPRESA PARACEIRA.....	112
5.3	CONTRIBUIÇÃO PARA A ACADEMIA.....	113
5.4	TRABALHOS FUTUROS.....	113
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>114</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A competitividade dentro do setor automotivo tem transformado a economia mundial desde a década de 70, 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, o que consistiu na perda da responsabilidade e controle de todos os processos produtivos de um produto, ou seja, passaram a ter empresas terceirizadas envolvidas. O resultado disso foi o aumento da complexidade e importância do relacionamento para 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 de enorme valor para as montadoras que os carros produzidos possuíssem tintas diferenciadas, as quais suprissem as exigências quanto ao 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 das empresas em melhorar 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 a 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 das montadoras em obter fornecedores de alto nível no mercado. A linha de pintura das empresas fabricantes de para-choques é um exemplo. Entre as

exigências das quais 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 em 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 a 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 à habilidade de controlar a qualidade dos produtos e garantir um processo estável. Sendo assim, a qualidade de um produto só pode ser assegurada através da minimização da variabilidade de parâmetros do processo em uma linha de produção (SAMOHYL, 2012).

Nas indústrias automotivas métodos estatísticos são amplamente usados pela engenharia para o controle e melhoria da qualidade. Segundo Samohyl (2012), 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, segundo Chiavenato (2004), 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. O controle estatístico de processo é uma ferramenta bastante 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 que todos os processos são constituídos por variáveis controláveis, através de um planejamento, experimentos podem ser aplicados para determinar quais variáveis tem 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).

Neste contexto, esta pesquisa visou responder o seguinte problema de pesquisa: Quais são os fatores de aplicação de verniz que interferem na intensidade do aspecto de casca de laranja em superfícies de para-choques pintados?

### 1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho objetivou identificar os fatores de aplicação do verniz que interferem na intensidade da casca de laranja em superfícies de para-choques pintados e propor uma combinação ótima dos fatores através da metodologia do projeto robusto.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A fim de cumprir o objetivo geral proposto, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- Levantar na bibliografia fatores que interferem na intensificação da casca de laranja no processo de pintura de para-choques;
- Aplicar a técnica do projeto robusto no setor industrial;
- Discriminar e usar as normas específicas para o processo de pintura automotiva;
- Explicar as interações entre os fatores controláveis referentes à aplicação de verniz em para-choques, em termos estatísticos;
- Construir uma combinação ótima dos fatores controláveis para a aplicação de verniz em para-choques.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Os últimos anos revelam um crescimento no setor automobilístico brasileiro. A Figura 1 ilustra o aumento de aproximadamente 57% na produção de automóveis, comerciais leves, caminhões e ônibus no Brasil desde 2005 até o ano de 2013. Mesmo com uma ligeira queda nos números de 2011 para 2012, ainda assim, o ano seguinte mostrou-se otimista para o mercado de automóveis. Já o último ano, 2014, revelou a primeira queda significativa na produção do país desde 2005, algo em torno de 566 mil autoveículos comparado com 2013.

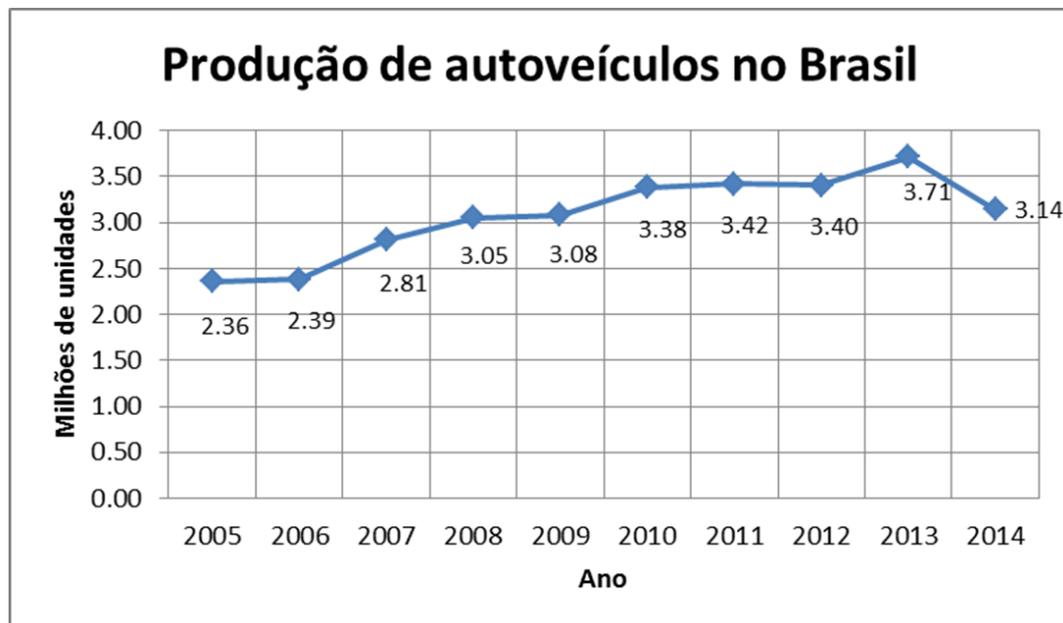


FIGURA 1 – PRODUÇÃO DE AUTOVEÍCULOS NO BRASIL  
 FONTE: Adaptado de ANFAVEA (2014)

A prova da importância econômica e social do aumento da produção de veículos é retratada através do número de empregos ofertados por toda a extensão do setor automobilístico no Brasil nos últimos anos. A Figura 2 apresenta o número de empregos que o setor de fabricação de automóveis, comerciais leves, caminhões e ônibus ofereceram no decorrer dos anos de 2012, 2013 e 2014. É possível perceber que houve um aumento no número de empregos no setor, ao comparar os meses de 2012 com os de 2013. Já no ano de 2014, a geração de emprego acompanhou a produção de autoveículos no país, ou seja, apresentou queda que pode ser visualizada no decorrer dos meses.

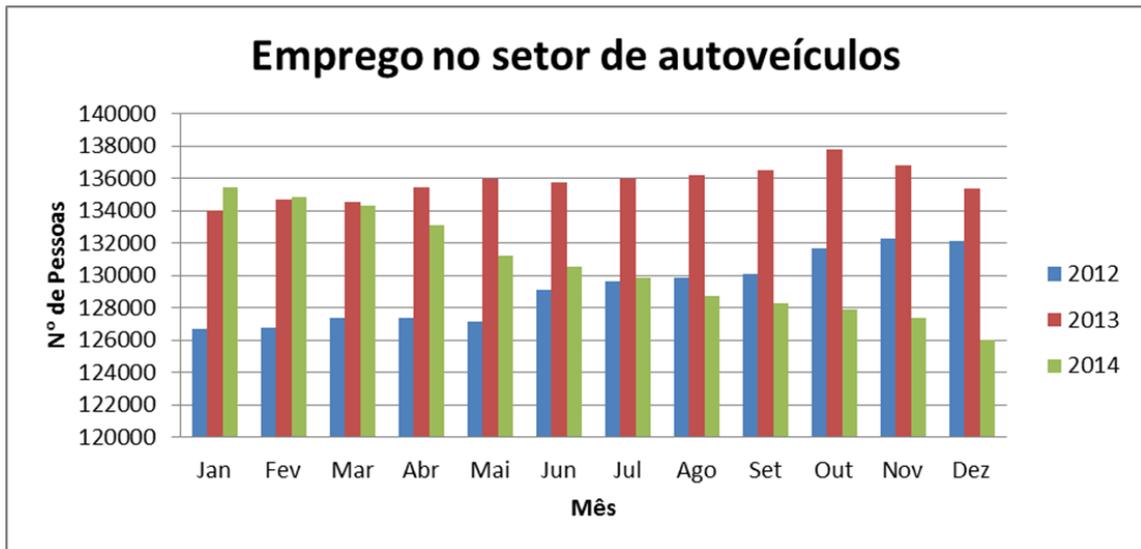


FIGURA 2 – EMPREGO NO SETOR DE AUTOVEÍCULOS  
 FONTE: Adaptado de ANFAVEA (2014)

A queda de produção de autoveículos e na geração de emprego no setor automotivo brasileiro em 2014 não impede os investimentos dos fabricantes no setor. Isso porque os planos de investimentos para o setor foram traçados há alguns anos. Além disso, existe um otimismo entre os investidores em relação ao potencial de recuperação do setor em longo prazo. É previsto que até 2024, algo em torno de 45 bilhões de reais sejam investidos pelas montadoras para o aumento da capacidade de produção, modernização e desenvolvimento de produtos, no mercado nacional (CAULY, 2015).

A perspectiva da recuperação da produção de automóveis estimula também toda uma cadeia de fornecedores de autopeças, os quais vêm a demanda por produto acompanhar um cenário próspero no Brasil. Todavia, para atender aos pedidos das montadoras, as indústrias de autopeças precisam atender os requisitos associados à qualidade do produto.

As cores dos automóveis são requisitos da qualidade que exigem grande atenção pela sua importância no mercado. Cores como o preto e o prata estão lentamente perdendo o posto de preferidas pelos motoristas. Cores fortes, que antes eram exclusividade dos modelos esportivos, hoje vêm ganhando espaço principalmente nos novos modelos de carros populares. Além disso, novas combinações entre cores e pigmentos estão sendo feitas para inovar os efeitos de brilho (MOURA, 2011). Isso revela a tendência do mercado à valorização da cor e aspecto do veículo no momento da aquisição.

Especificamente no processo de pintura de autopeças, a qualidade está associada à eliminação dos defeitos que afetam o aspecto da superfície pintada do produto. Quatro características são apontadas como primordiais no processo de pintura, são elas: revestimento, cor, forma e tamanho. Contudo, a melhoria da qualidade da pintura esbarra na variedade de combinações entre cores, formatos e tamanhos dos modelos das peças, tornando a pintura um processo complexo. Ao mesmo tempo, o grau de exigência da qualidade da pintura de autopeças é altíssimo, o que só faz aumentar os números de reparos, retrabalhos e perdas no processo (PEACOCK; JURAS, 2006, p. 50). Portanto, a diminuição das falhas do produto pintado é de grande importância para a melhoria da qualidade da pintura.

Um dos defeitos encontrados nas linhas de pinturas é chamado de “casca de laranja”. Esse defeito caracteriza-se irregularidades na camada de verniz, camada superficial da peça pintada, que se assemelha a casca de uma laranja, conforme a norma ASTM D3451 (*AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM)*, 2001). Em particular, na pintura de para-choques, esse defeito é um dos que mais demanda tempo de reparo, e com isso, impede a agilidade da linha. Além disso, essa falha do processo é responsável por parte dos para-choques que são retrabalhados.

Sendo assim, este trabalho é relevante para a indústria de para-choques, pois visa identificar os fatores de aplicação do verniz que interferem na intensidade da casca de laranja em superfícies de para-choques pintados e propor uma combinação ótima dos fatores através da metodologia do projeto robusto. Além disso, os resultados alcançados nessa pesquisa são válidos para serem aplicados na indústria da pintura automotiva em geral.

A importância do trabalho para o ambiente acadêmico é justificada pela comprovação da aplicabilidade das técnicas provenientes da estatística no processo fabril. Como consequência, o trabalho pretende integrar os assuntos acadêmicos à realidade das indústrias, através do planejamento e análise de experimento na busca de melhorias no processo de pintura.

O Quadro 1 ratifica o papel da pintura automotiva no ambiente acadêmico, pois apresenta os principais trabalhos que abordam o tema:

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Título</b>	<b>Tema</b>
BABEL	1992	<i>On-line coating of plastic parts in the automotive industry</i>	Desenvolvimento tecnológico de pintura
JURGETZ	1995	<i>Automotive Paint Performance</i>	Qualidade da pintura automotiva
GROHMANN	1996	<i>Paint robots in the automotive industry – process and cost optimization</i>	Desenvolvimento tecnológico de pintura
PIEROZAN	2001	Estabilização de processos: um estudo de caso no setor de pintura automotiva	Qualidade da pintura automotiva
ENDREGAARD	2002	<i>Paint Robotics – Improving Automotive Painting Performance</i>	Desenvolvimento tecnológico de pintura
BARLETTA; GISARIO; TAGLIAFERRI	2006	<i>Electrostatic spray deposition (ESD) of polymeric powders on thermoplastic (PA66) substrate</i>	Desenvolvimento tecnológico de pintura
JUNG <i>et. al.</i>	2006	<i>Development of painting technology using plasma surface technology for automobile parts</i>	Desenvolvimento tecnológico de pintura
PEACOCK; JURAS	2007	<i>Alternative Costing Methods: Precision Paint Shop's Dilemma</i>	Financeiro
BRINCKMANN; STEPHAN	2010	<i>Experimental investigation of the drying process of water-based paints used in automotive industry</i>	Experimento em processo químico
ARINEZ <i>et. al.</i>	2010	<i>Quality/Quantity Improvement in an Automotive Paint Shop: A Case Study</i>	Qualidade da pintura automotiva
MORAES	2010	Melhoria no fluxo de informações de um processo de pintura da indústria automobilística.	Qualidade da pintura automotiva
ADAMSONS	2012	<i>A modern analytical toolbox: defect (W&amp;D) studies of automotive coating systems, including depth profiling studies</i>	Desenvolvimento tecnológico de pintura
DOMENICO; HENSHAW	2012	<i>The effects of basecoat bell application parameters on elements of appearance for an automotive coatings process</i>	Desenvolvimento tecnológico de pintura

QUADRO 1 – TRABALHOS ACADÊMICOS RELACIONADOS A PINTURA AUTOMOTIVA  
 FONTE: O autor (2014)

#### 1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

A viabilidade do trabalho requereu algumas restrições que podem ser listadas da seguinte forma:

- O trabalho abrangeu apenas o setor de pintura automática;
- A linha de pintura envolveu apenas a aplicação de tinta em peças plásticas de polipropileno;

- O estudo restringiu-se ao entendimento da ação dos fatores de aplicação do verniz;
- O método de aplicação da linha de pintura tratou-se apenas do tipo eletrostático;
- Dentre os variados problemas de pintura, apenas o defeito casca de laranja foi investigado;
- O trabalho não apresentou a análise dos ganhos da empresa a partir dos resultados obtidos pelo experimento.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

No intuito de satisfazer os objetivos geral e específico, este trabalho está dividido da seguinte forma:

**CAPÍTULO 1:** Contextualização do tema do trabalho, elaboração das propostas de objetivos, apresentação da justificativa do assunto escolhido e a delimitação de atuação da pesquisa.

**CAPÍTULO 2:** Apresentação da revisão de literatura de todos os assuntos pertinentes ao tema do trabalho que serviu para embasar o restante da pesquisa.

**CAPÍTULO 3:** Caracterização da pesquisa, apresentação da empresa estudada e a descrição das etapas da metodologia a ser aplicada.

**CAPÍTULO 4:** Descrição da metodologia, apresentação dos resultados obtidos no decorrer do trabalho e discussão dos mesmos.

**CAPÍTULO 5:** Conclusões adquiridas através dos resultados observados durante o trabalho e sugestões para futuros trabalhos.

**CAPÍTULO 6:** Apresentação das referências bibliográficas aqui disponibilizadas para consulta.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

O presente capítulo apresenta uma revisão literária dos principais temas pertinentes ao trabalho: Processo de fabricação do para-choque; Pintura automotiva; Qualidade; Planejamento de experimentos; Projeto robusto; e Análise de variância.

O tópico sobre o processo de fabricação do para-choque apresenta as características do plástico polipropileno, matéria-prima do para-choque, e por último, o processo de transformação plástica por injeção.

No segundo tópico, sobre pintura automotiva, são apresentadas as definições e discussões sobre a tinta, preparação de superfície e modos de aplicação da tinta.

No terceiro tópico o problema da qualidade é abordado sobre os seguintes pontos de vista: controle de qualidade; causas da variabilidade; tipos de defeitos de qualidade na pintura automotiva; e controle da qualidade na pintura automotiva.

O quarto tópico apresenta o planejamento de experimentos.

O quinto tópico traz a revisão de literatura sobre o projeto robusto, que é dividido entre os assuntos: conceito de ruído; função perda de qualidade; razão sinal ruído; e arranjos ortogonais.

No último tópico a análise da variância, assim como, o seu cálculo são apresentados.

### 2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO PARA-CHOQUE

Autopeças, como o para-choque, acompanham o aumento produtivo de veículos leves no mercado nacional. Para melhor entender o processo de fabricação desse componente do automóvel, a seguir são apresentados às etapas de produção do para-choque.

A matéria-prima usada na produção estrutural do para-choque é o plástico Polipropileno (PP). No início do processo de fabricação dessa autopeça é usado o polipropileno na sua forma granular. Nessa forma, o plástico pode ser injetado em um molde que possui as características da peça desejada. Na etapa posterior é feita a pintura do para-choque. Após a pintura da peça, a fase final de fabricação é a

montagem de todos os componentes (HONGSHEN; MING, 2013, p. 29). A Figura 3 apresenta as etapas de produção do para-choque.

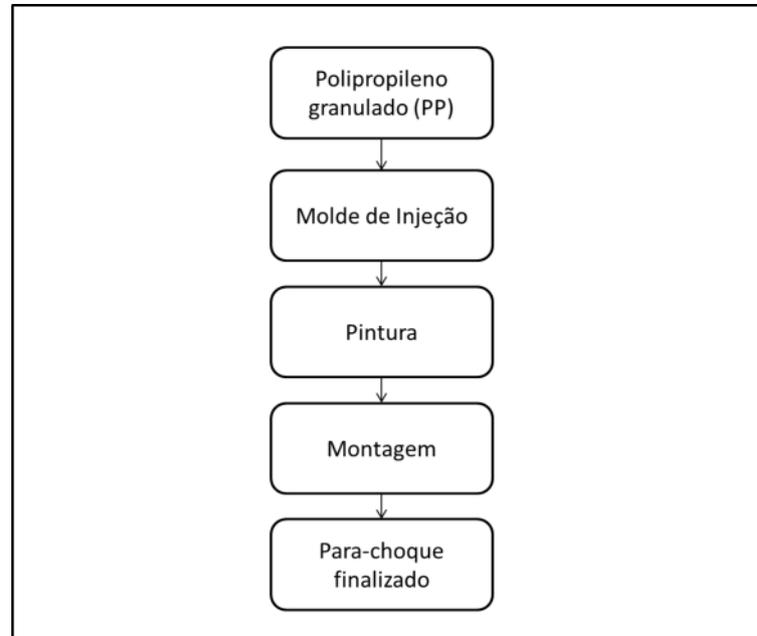


FIGURA 3 – ANÁLISE DE INVENTÁRIO DE UMA UNIDADE DE PRODUÇÃO  
FONTE: Adaptado de HONGSHEN e MING (2013, p. 29)

Após o processo de fabricação, o para-choque está pronto para ser levado à montadora de automóveis e anexado ao veículo. O ciclo de vida do para-choque estende-se durante todo o seu uso. Existem três possibilidades de destinos da peça após o uso: reciclagem, incluindo a trituração, lavagem e reprocessamento; aterro sanitário; incineração com recuperação ou não de energia (BORGNE & FEILLARD, 2001, p. 168).

A reciclagem do para-choque é uma alternativa de agregar a sustentabilidade ambiental ao processo de fabricação dessa autopeça. Uma das peculiaridades do processo de reciclagem do para-choque é que após o fim da sua vida útil, não é possível fazer a reutilização direta da peça. Isso porque, a superfície pintada do para-choque interfere em algumas propriedades mecânicas e térmicas do polímero. Sendo assim, o processo de reciclagem da peça envolve a remoção do revestimento de tinta da superfície da peça. A partir daí o material é triturado e lavado para que possa ser reinserido na produção (HONGSHEN; MING, 2013, p. 29). A Figura 4 ilustra o processo de fabricação e reciclagem de para-choques.

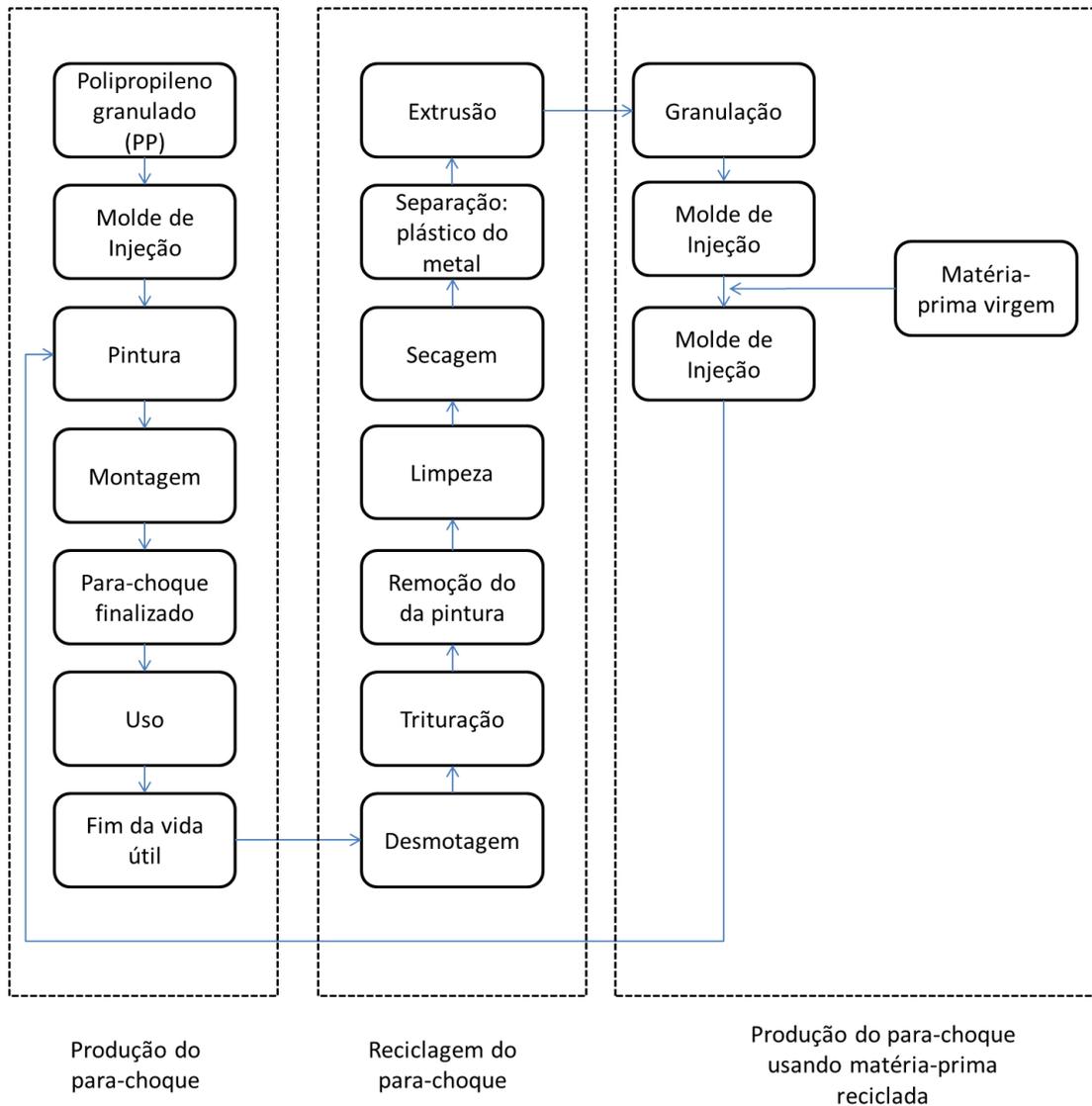


FIGURA 4 –DESTINAÇÃO UNITÁRIA DO CICLO DE VIDA DE UM PÁRA-CHOQUES  
 FONTE: Adaptado de HONGSHEN & MING (2013, p. 28)

### 2.1.1 O plástico

O plástico é elemento primário para diversos objetos e dentro da variedade de opções desse material, o que determina qual tipo será usado na manufatura varia conforme a necessidade do produto, como, por exemplo, a propriedade mecânica, química e física.

Segundo Michaeli *et. al.* (1995, p. 6), o plástico é formado por moléculas orgânicas ligadas entre si, ou seja, macromoléculas. As macromoléculas, por sua vez, são formadas por componentes individuais entendidos por polímeros. Padilha (2000, p 18) descreve que os polímeros, em geral, possuem características como:

isolamento térmico e elétrico, leveza, flexibilidade, boa resistência à corrosão e baixa resistência ao calor.

Na Figura 5, o plástico é dividido em três grupos principais: Termoplásticos, Duroplásticos e Elastômeros.

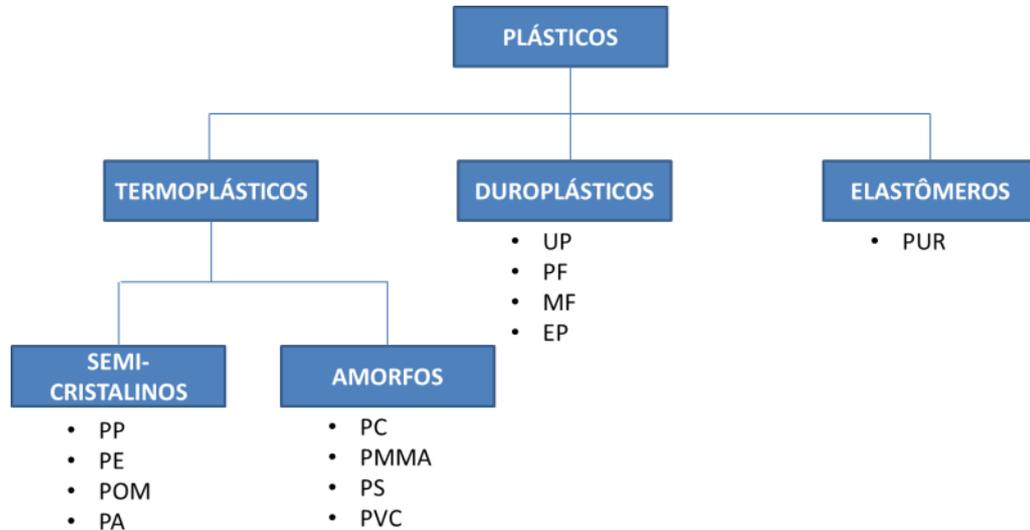


FIGURA 5 – DIVISÃO DOS PLÁSTICOS  
 FONTE: Adaptado de MICHAELI *et. al.* (1995, p. 7)

A tendência da indústria automobilística por procurar reduzir a massa e o custo dos veículos impulsiona setores como a engenharia em apostar nas pesquisas para a substituição do metal pelo plástico, em específico os termoplásticos pelas suas propriedades. Essa substituição é vislumbrada principalmente na parte estrutural dos automóveis (BRADY, 2008, p. 38). Uma das características que justifica a preferência das indústrias pelos termoplásticos é a sua capacidade de serem conformados mecanicamente várias vezes, desde que reaquecidos. Sendo assim, esse plástico possibilita a reutilização dos restos gerados durante o processo de fabricação de peças (PADILHA, 2000, p. 20).

### 2.1.2 Polipropileno

Hoje em dia é cada vez mais comum componentes de automóveis como para-choques, paralamas, capô dianteiro, cabeçotes de distribuidor, porta-luvas e pás de ventiladores serem constituídos por diversos tipos de plásticos, como por exemplo: polipropileno, polietileno, poliuretano, nylon, ABS, EPDM, e etc

(FAZENDA, 2005, p. 706). Características como boa resistência química, à umidade e ao calor, baixa densidade, boa dureza superficial e estabilidade dimensional, fazem do polipropileno um plástico com um conjunto de propriedades atrativas para a produção de muitos produtos manufaturados (CRIPPA, 2006, p. 42).

Pertencentes a família dos termoplásticos, o polipropileno possui uma estrutura que o coloca no grupo dos semi-cristalinos, ou seja, parte cristalina e parte amorfo, o que garante a esse tipo de plástico propriedades mecânicas com alta linearidade (FUJII; KAWANO; FUJINO, 2000, p. 23).

As propriedades mecânicas e físicas existentes em um para-choque fazem parte das exigências impostas pelas montadoras. Dentre essas propriedades duas mostram-se conflitantes: ductilidade e a rigidez. No intuito de estudar a relação entre espessura, temperatura e velocidade de impacto de amostras de polipropileno, Daiyan *et. al.*(2010, p. 648) explica que partes de automóveis compostas por polipropileno são moldadas para que sejam dúcteis diante de baixas temperaturas, sem perder o alto nível de rigidez, baixa deformação térmica e alta resistência a riscos.

Na sua natureza, o polipropileno deixa a desejar quando o assunto é a propriedade de impacto sob baixas temperaturas. Para isso, algumas misturas entre os plásticos são realizadas. Um exemplo comum é a utilização do *EPDM (ethylene-propylene-diene terpolymers)* que adicionado ao polipropileno torna o produto mais resistente a impactos. Estudos mostram a opção da mistura do polipropileno com o plástico *POE (polyethylen elastomer)*. Esse conjunto entre PP e *POE* contribui para a produção de para-choques mais resistentes às colisões sob uma proporção de, respectivamente, 80% e 20% (LIU; QIU, 2012). Segundo Kmetty, Bárány e Kocsis (2012, p. 72), a mistura entre termoplásticos e elastômeros tem criado um novo horizonte de opções para a indústria de polímeros.

### 2.1.3 Processo de transformação por injeção

O processo de moldagem por injeção consiste na fusão do material e injeção do mesmo sob pressão em um molde metálico. Os componentes plásticos de automóveis são normalmente fabricados através da moldagem por injeção. Os para-choques e alguns componentes interiores são exemplos de peças que foram transformadas através da injeção. A escolha de polímeros como o polipropileno

combinado a esse método de transformação de plásticos garante peças leves, de baixo custo, capazes de serem recicladas, com formas complexas, entre outras propriedades (DENG, 2009, p. 5084).

O processo de moldagem por injeção é determinante para a definição das propriedades mecânicas de para-choques. Fatores como linhas de solda, heterogeneidade do plástico, anisotropia e tensões residuais são decisórios na característica de rigidez dessas peças (DAIYAN *et. al.*, 2010, p. 649). A dificuldade em manter a uniformidade da temperatura e pressão por toda a extensão da peça, durante o processo de moldagem por injeção, pode explicar variações das propriedades mecânicas das peças de polipropileno em uma amostra, mesmo que pequena (FUJII; KAWANO e FUJINO, 2000, p. 23).

Michaeli *et. al.* (1995, p. 106) resume as operações do processo de injeção:

- Dosagem do material plástico granulado no cilindro de injeção através de um funil.
- Fusão do material a consistência de injeção, em decorrência da ação do sistema de aquecimento existente no cilindro.
- Injeção do material plástico fundido no molde bipartido fechado, por meio de um parafuso rotatório que seve como êmbolo de injeção.
- Resfriamento do material plástico até a solidificação.
- Extração do produto com o molde aberto.

Michaeli *et. al.* (1995, p. 104) exemplifica o processo de injeção dos elementos plásticos separando-o em três etapas (Figura 6).

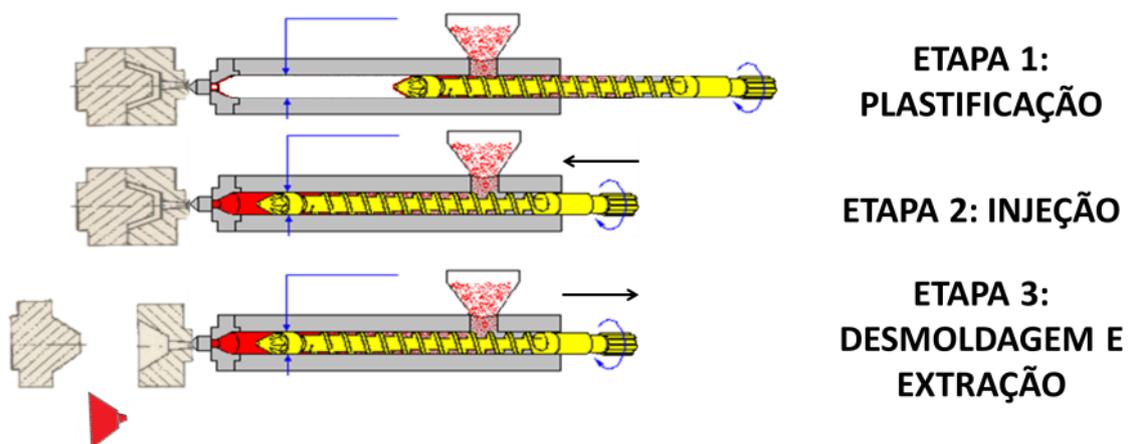


FIGURA 6 – PROCESSO DE INJEÇÃO (ESQUEMA)  
 FONTE: MICHAELI *et.al.* (1995, p. 104)

## 2.2 PINTURA AUTOMOTIVA

O setor automotivo vem se desenvolvendo nas últimas décadas devido à demanda por um alto nível de qualidade dos produtos envolvidos na produção dos veículos. Para Endregaard (2002, p. 8), a evolução do setor justifica os notáveis investimentos que foram feitos nos últimos tempos em processos de pintura e em equipamentos de aplicação. Jurgetz (1995, p. 53) lembra que o avanço da pintura automotiva deve-se não só à demanda do consumidor por qualidade, mas também pelas exigências legais referentes à diminuição de produtos e processos prejudiciais ao meio ambiente.

Dentre as partes plásticas do automóvel, o para-choque é a peça que possui maior quantidade de plástico que passará pelo processo de pintura. O revestimento superficial de para-choques e outras peças plásticas é realizado através da pintura industrial, que pode ser dividida em 3 itens de igual importância: tinta, preparação de superfície e aplicação da tinta (FAZENDA, 2005, p. 706).

### 2.2.1 Tinta

Conforme Fazenda (2005, p. 738) “tinta é uma composição líquida que, depois de aplicada sobre uma superfície, passa por um processo de secagem ou cura e se transforma em um filme sólido, fino, aderente, impermeável e flexível.” O filme resultante do processo de secagem da tinta pode ser classificado de duas formas: camada termoplástica ou camada termofixa. A tinta com camada termoplástica sob altas temperaturas mantém sua integridade química. Já a camada termofixa sofre alteração da sua composição química após a cura (WEISS, 1997, p. 223). Um exemplo de camada termoplástica trata-se da tinta que sofre a secagem através da evaporação do solvente, ou seja, não ocorre reação química entre seus componentes. Já a camada termofixa representa, por exemplo, os esmaltes de secagem a estufa, ou seja, existe reação química através de catalisadores (FAZANO, 2002, p. 48). A Figura 7 ilustra a composição genérica da tinta.

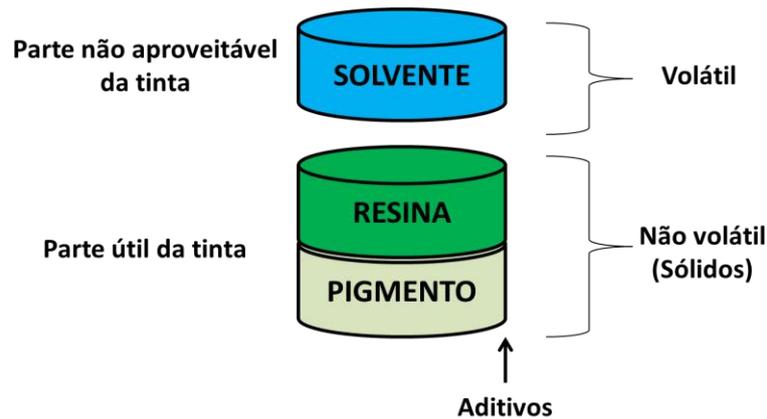


FIGURA 7 – COMPOSIÇÃO DAS TINTAS  
 FONTE: Adaptado de FAZENDA (2005, p. 744)

Observando a Figura 7 é possível perceber que a tinta é composta pelas matérias-primas solventes, resinas, pigmentos e aditivos. No Quadro 2 são mostradas as definições e as utilidades dessas matérias-primas.

Solvente	É um elemento líquido volátil. Tem a função de melhorar a aderência, diminuir a viscosidade para facilitar a aplicação, dissolver a resina e atuar sobre a secagem da tinta.
Resina	É um componente que pode ser líquido ou sólido. Tem a função de ligação dos pigmentos. Entre seus benefícios à tinta, inclui-se a aderência, impermeabilidade e flexibilidade.
Pigmento	Responsável pela coloração das tintas e pelas propriedades anticorrosivas nas tintas de fundo ( <i>primers</i> )
Aditivos	São as substâncias que adicionadas as fórmulas das tintas desempenham um papel complementar nas propriedades de qualquer um dos componentes da tinta.

QUADRO 2 – GRUPOS DE MATÉRIAS-PRIMAS  
 FONTE: adaptado de FAZENDA (2005, p. 744)

Dois tipos de diluição de tintas podem ser destacados como as mais utilizadas no processo de pintura industrial: tinta à base de solvente (*solventborne coating*) e tinta à base de água (*waterborne coating*). Na tinta à base de solvente é normalmente acrescentada uma quantidade de sólidos (pigmentos e resinas) para que se tenha maior facilidade em atingir a camada exigida com a utilização de pouco material. Pelo fato do solvente ser um líquido altamente volátil, a tinta à base de solvente não exige altas temperaturas para a cura. A tinta à base de água possui a vantagem de uma formulação de baixa viscosidade, não é inflamável e nem possui um odor forte como as tintas à base de solvente. No entanto, essa tinta significa maior custo, pois exige um sistema de equipamentos de aço inoxidável, risco de degradação microbológica, alta condutividade e necessidade de altas temperaturas

para sua cura (WEISS, 1997, p. 214). Barletta, Gisario e Tagliaferri (2006, p. 296) afirmam que, mesmo existindo alternativas, a pintura com tinta à base de solvente garante melhor desempenho estético e funcional.

O presente trabalho só aborda o tipo de diluição de tinta que envolve solvente, ou seja, o filme aplicado na superfície pintada tem característica termoplástica.

#### 2.2.1.1 Revestimento da pintura

O *primer* é uma tinta essencial para garantir propriedades importantes no aspecto final da peça pintada. É usado principalmente em superfícies plásticas como camada primária do processo de pintura. Por ser condutivo, o *primer* faz com que a aplicação da pintura eletrostática seja possível (BARLETTA; GISARIO e TAGLIAFERRI, 2006, p. 296). A camada de *primer* serve para nivelar e preparar a superfície para as camadas que ainda serão depositadas (FAZENDA, 2005, p. 660). Além disso, o *primer* protege o substrato contra a corrosão, contra lascamentos, garantindo durabilidade à peça (PIEROZAN, 2001, p. 76).

A tinta *basecoat* (base) precede a camada de *primer*, e é responsável por dar a coloração da pintura. Conforme Pierozan (2001, p. 77) o *basecoat* promove a aparência atrativa e protege a camada de *primer*. Segundo Fazenda (2005, p. 669), foi na década de 70, na antiga Alemanha Ocidental, que se estabeleceu um sistema de pintura de *basecoat* que é usado até hoje na indústria automotiva. O sistema é chamado de *wet-on-wet*

O sistema consiste na aplicação de um *basecoat* pigmentado (metálico, perolizado, ou liso) sobre a superfície anteriormente revestida com *primer surfacer*. Seguido a um período de 2 a 3 minutos de *flash off* (evaporação) dos solventes, aplica-se um acabamento na forma de um *clearcoat* transparente (FAZENDA, 2005, p. 669).

Segundo Pierozan (2001, p. 77), na pintura com equipamento eletrostático automático para aplicação de *basecoat*, são utilizados robôs de braços mecânicos. O robô acompanha a superfície da peça, liberando as partículas de tinta que foram ionizadas e vaporizadas por um “sino” em alta rotação, que está localizado na extremidade do braço do robô.

O *clearcoat* (verniz) precede a camada de *basecoat*, e é o último revestimento do processo de pintura. Responsável pela atratividade e brilho da cor

da peça, o *clearcoat* possui várias outras propriedades importantes. A camada de verniz proporciona a peça resistência a inúmeros agentes agressivos, como, por exemplo: umidade; chuva ácida; sal nas estradas, pedras, altas e baixas temperaturas, e luz ultravioleta (UV). Depois da aplicação de *basecoat* e o período de *flash off* uma aplicação eletrostática automática, igual a realizada na *basecoat*, é repetida no *clearcoat*. A peça, com todas as camadas, é então aquecida em uma estufa para que haja a cura do verniz (FAZENDA, 2005, p. 669).

Jurgetz (1995, p. 53) cita alguns dos requisitos demandados pela qualidade para o *clearcoat*: resistência à chuva-ácida, resistência a arranhões, aparência, capacidade de polimento.

Na Figura 8, a peça (substrato) aparece com as camadas após o processo de pintura, indicando também a espessura de cada uma.

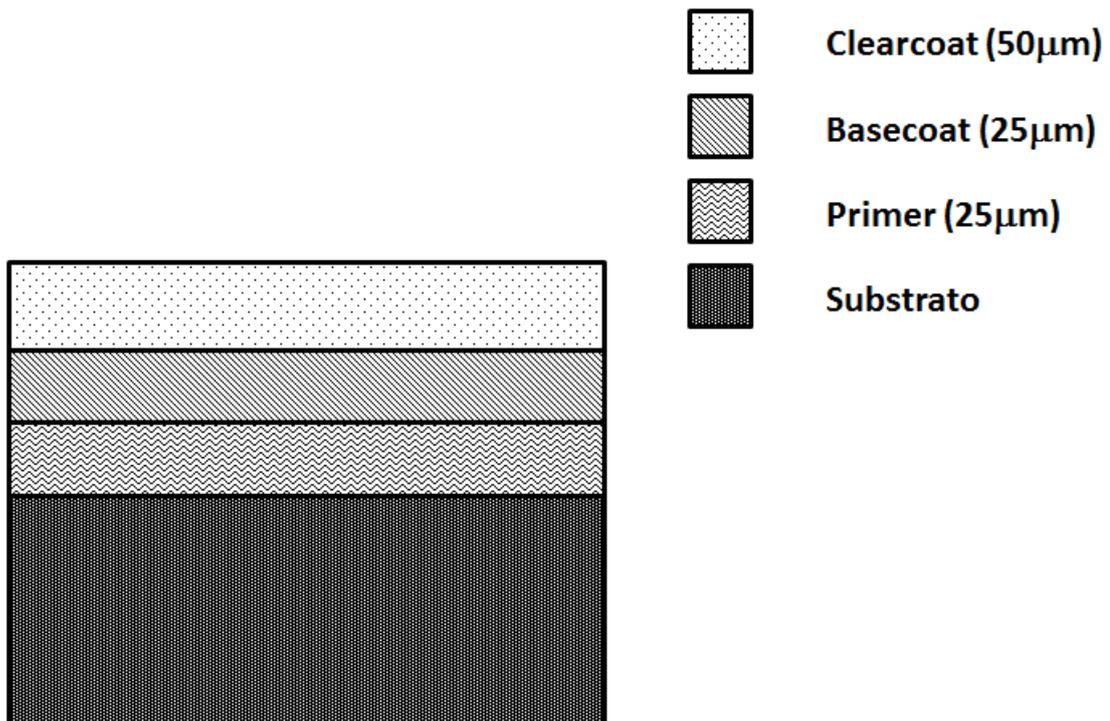


FIGURA 8 – SISTEMA DE PINTURA DE CAMADAS MÚLTIPLAS  
FONTE: Adaptado de RUMZAN & WILLIAMS (2000, p. 4292)

### 2.2.2 Preparação de superfície

A pintura exige condições adequadas do material e da superfície na qual serão depositadas as tintas e demais componentes químicos para seu revestimento. O polipropileno, por exemplo, possui algumas características que tornam complexa sua adequação ao processo de pintura. A baixa tensão superficial do polímero é uma delas, a qual torna o material impróprio para adesão aos revestimentos. Por esse motivo, o polipropileno depende de técnicas de pré-tratamento da superfície para facilitar a aderência do revestimento ao material (PIJPERS; MEIER, 2001, p. 299).

É possível associar diretamente o desempenho técnico do revestimento à qualidade e tratamento de preparação da superfície a ser pintada. O tratamento superficial depende das exigências de aspecto do revestimento e do tipo de matéria-prima da peça na qual se aplicará a pintura. A preparação da superfície envolve primeiramente métodos de limpeza da região a ser pintada, o qual é importante para a eliminação de irregularidades como: poeira, oleosidade, trincas, e outros contaminantes. A limpeza de superfícies pode ser dividida em seis categorias (FAZANO, 2002, p. 40).

- Jateamento: É um processo de limpeza de superfície que pode ser feito através de meios abrasivos com a areia, granalha de aço que são lançados em direção ao material por meio de ar comprimido ou água.
- Desengraxamento: É um processo de limpeza de superfície onde aplicam-se solventes orgânicos de baixa toxicidade e inflamabilidade para retirada de oleosidade, graxas e poeiras.
- Limpeza mecânica manual: É um processo de limpeza de superfície de baixo nível de eficiência, pois operadores utilizam ferramentas como lixas, raspadeiras, escovas, espátulas para realizar a remoção de impurezas ou trincas na superfície. O processo pode ser empregado em superfícies metálicas ou não-metálicas.
- Limpeza mecânica motorizada: É um processo de limpeza de superfície realizada por operadores que fazem o uso de ferramentas como

lixadeiras, politrizes motorizadas, martelletes pneumáticos, etc. processo pode ser empregado em superfícies metálicas ou não-metálicas.

- Lixamento: É um processo de limpeza e acabamento de superfície através do desbaste por meio da utilização de lixas.
- Limpeza por processos químicos: É um processo de limpeza de superfície que faz o uso de soluções químicas. Este processo pode ser efetuado por soluções ácidas ou alcalinas. As soluções ácidas tem a função de decapagem química do material através de ácidos inorgânicos como: ácido sulfúrico, ácido clorídrico e ácido nítrico. As soluções alcalinas tem a função de neutralizar a ação da decapagem através da lavagem da superfície. Os compostos alcalinos empregados para a limpeza são: hidróxido de sódio e silicato de sódio.

As superfícies de materiais plásticos apresentam maior complexidade para alcançar uma adesão satisfatória dos revestimentos. Conseqüentemente, a adequada preparação da superfície a ser pintada é primordial para a maximização do desempenho dos revestimentos. Portanto, a limpeza com solvente orgânico é a mais indicada para superfícies plásticas compostas por polipropileno (FAZENDA, 2005, p. 729).

A inércia química do polipropileno, sob condições normais, exige tratamentos específicos para torná-lo receptivo a revestimentos de pintura (ROSATO *et. al.*, 2000, p. 284). Há vários anos, a flambagem (*Flame Treatment*) tem sido usada na indústria como tratamento de materiais compostos por polipropileno (PIJPERS; MEIER, 2001, p. 299). A flambagem consiste em rápida aplicação de uma chama que ao colidir com o plástico provoca uma oxidação da superfície, tornando-a receptiva a adesão de tintas. (GARBASSI; MORRA; OCCHIELLO, 1998, p. 235). Silva (2011, p 31) afirma que a esse tratamento é indispensável para a aderência da tinta, pois a chama em contato com a superfície aumenta a tensão superficial da peça. A eficiência do processo de flambagem está diretamente relacionada com alguns fatores como composição do gás, distância da chama para a peça, e tempo de aplicação da chama na superfície (ERNST, 2005, p. 798). Geralmente a aplicação da flambagem em peças com formas complexas é realizada por um sistema robotizado (GARBASSI; MORRA; OCCHIELLO, 1998, p. 236). A

Figura 9 ilustra o processo de flambagem. Conforme a Figura 9, um sistema de transportador de peças plásticas posiciona o substrato (3) para ser aplicada a chama (2) através de um sistema automatizado (1).

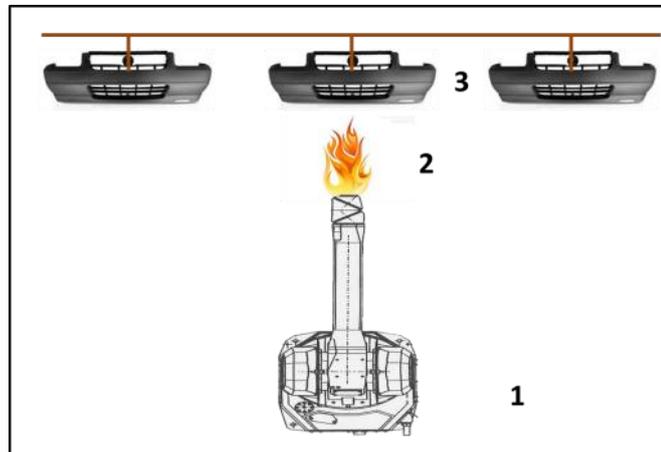


FIGURA 9 – ESQUEMA DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE FLAMBAGEM  
 FONTE: GARBASSI, MORRA e OCCHIELLO (1998, p. 236)

### 2.2.3 Aplicação da Tinta

A tinta e componentes de revestimento de superfície podem ser aplicados de diversas maneiras nos processos de pintura do setor industrial e são as formas com que se aplica a tinta que caracterizam o tipo de pintura. Fazenda (2005, p. 788) lista alguns dos métodos utilizados: pintura à pincel, pintura a rolo, pintura por pistola convencional, *airless*. Wiemes (2003, p 55) complementa a relação de métodos de aplicação de tintas ao citar o processo de eletrodeposição (E-coat). A seguir segue um breve comentário sobre cada método.

- Pintura à pincel: Os pincéis podem ser feitos com pelos de animais ou pelos sintéticos e são utilizados, respectivamente, para a aplicação de tintas corrosivas ou à base de água. A pintura à pincel é um processo que não gera muito desperdício e é ideal para penetrar em frestas e saliências (FAZENDA, 2005, p. 788). No entanto, o pincel é o método que tem a menor área de recobrimento de superfície se comparado com os demais processos (FAZANO, 2002, p. 70).
- Pintura a rolo: Os rolos de pintura são compostos por pele de carneiro ou lã sintética. Essa ferramenta é ideal para superfícies grandes lisas, ou

irregulares. A tinta utilizada pode ser tanto à base de água quanto à base de solvente (FAZENDA, 2005, p. 788). Para Fazano (2002, p. 70) a vantagem da pintura por rolo é a velocidade de aplicação e a desvantagem está nas camadas irregulares que o processo gera.

- Pistola convencional: A pistola convencional trata-se de uma pistola própria para aplicação de tinta a ar comprimido. Existem dois modos de alimentação da pistola convencional: por sucção ou pressão. A sucção é frequentemente utilizada em oficinas de repintura de automóveis. Já o outro modo trata-se da utilização de um tanque de compressão e é o mais utilizado pelas indústrias, pois a capacidade de armazenamento de tinta é maior, o que significa produtividade. Neste caso a pistola pode ser acionada por um gatilho e assim a tinta é expelida de um recipiente (tanque de compressão) pelos jatos de ar em forma de *spray*. Algumas das partes da pistola possibilitam o ajuste da forma do *spray* para que a pulverização seja depositada de uma forma uniforme pela superfície do substrato (FAZENDA, 2005, p. 790). A pistola convencional apresenta vantagens aos métodos de pintura apresentados anteriormente, pois sua área média de recobrimento de superfície é maior. No entanto, a atomização da tinta provocada pelo ar comprimido leva a uma perda considerável de matéria-prima (FAZANO, 2002, p 70).
- *Airlless*: No método de aplicação de tinta *Airlless* a tinta é atomizada sem o auxílio do ar comprimido. “A alimentação da pistola é feita com bombas hidráulicas e a atomização é produzida pela passagem da tinta sob alta pressão através de um orifício de diâmetro muito pequeno (FAZENDA, 2005, p 794) .” A aplicação do *Airlless* é mais indicada em superfícies planas de grandes áreas. Nas indústrias, por exemplo, esse método de aplicação de tinta é bastante usado para a pintura de navios, grandes painéis, costado de tanques, etc (FAZANO, 2002, p. 70).
- Eletrodeposição (*E-coat*): O processo de eletrodeposição é bastante usado na indústria automobilística, de autopeças e de eletrodomésticos, com a função anticorrosiva. Esse método de aplicação consiste na imersão da peça que será pintada no *E-coat* (tinta diluída em água), líquido o qual está sob a ação de uma corrente elétrica contínua. A

diferença de potencial (ddp) aplicado nesse banho de E-coat permite a deposição do revestimento na superfície da peça, criando assim uma camada uniforme e coesa (WIEMES, 2003, p. 5).

#### 2.2.3.1 Aplicação eletrostática

A aplicação eletrostática fundamenta-se na diferença de potencial criada entre a tinta e a superfície a ser pintada. Esse fenômeno gera uma atração eletrostática entre os dois elementos que possuem uma diferença de potencial (ddp) de aproximadamente 100 kVolt (FAZANO, 2002, p. 319).

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 de tinta depositada não conduz a eletricidade; portanto a camada formada nos pontos privilegiados isola a eletricidade e a tinta migra para outros pontos, cobrindo toda a superfície do substrato. 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. (PIEROZAN, 2001, p. 75).

Fazano (2002, p. 319) ao comparar a aplicação eletrostática com outros métodos aponta algumas vantagens:

- Diminuição das perdas da tinta;
- Revestimento aplicado de forma uniforme em superfícies simples ou complexas;
- Boa performance do revestimento dada a sua durabilidade, adesão e solidez a luz.

Fazenda (2005, p. 912) apresenta os fatores que interferem na eficiência da deposição da tinta no processo de pintura eletrostática:

- Carga eletrostática adquirida pela partícula;
- Velocidade da corrente de ar usada na pulverização;
- Distância da pistola até a peça;
- Tamanho e forma do objeto a ser pintado;

- Espessura e resistividade da superfície da peça;
- Velocidade do ar de exaustão da cabine.

Existem dois tipos de eletrodeposição. O primeiro trata-se da eletrodeposição anódica onde a superfície da peça está carregada positivamente enquanto a tinta depositada durante o processo está carregada com cargas negativas. O segundo tipo é a eletrodeposição catódica, em que a peça está carregada com cargas negativas (aterrado) enquanto as partículas de tinta estão carregadas positivamente. A eletrodeposição catódica é mais comuns entre os processos de pintura industriais (PIEROZAN, 2001, p. 75).

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, p. 819).

Na indústria automotiva predomina a utilização de robôs para a pintura das partes interiores do carro. Foi na Alemanha, na década de 80, o início da utilização de robôs na pintura industrial automotiva pela Mercedes-Benz e Volkswagen. No entanto, a tecnologia teve que passar por algumas mudanças ao longo dos anos para ser aceita por todas as montadoras e fornecedores de autopeças. Apenas depois da redução dos custos de manutenção, aumento da velocidade de aplicação, e precisão da trajetória das coordenadas do programa, a linha de pintura automatizada começou a apresentar vantagens na produtividade e qualidade. O desenvolvimento tecnológico da pintura também se deve a integração do sistema de exaustão de ar das cabines, do eixo de deslocamento do transportador e equipamentos de fornecimento de energia localizados na parte externa das cabines (GROHMANN, 1996, p. 11). Não só a superfície da peça e a tinta precisam estar em perfeito estado para uma boa aplicação. A cabine onde o processo de pintura ocorre também precisa ser composta por material não condutivo, para que não atrair as partículas de tinta. Além de possuir um sistema de exaustão próprio (FAZANO, 2002, p. 320).

No presente trabalho, a técnica de aplicação de tinta abordada é do tipo eletrodeposição anódica automatizada, através de robôs de pintura.

### 2.2.3.2 Sino rotativo de alta velocidade

O robô de pintura utilizado no presente trabalho possui um equipamento de aplicação chamado sino rotativo de alta velocidade (*high-speed rotary bell*). O sino rotativo de alta velocidade é um aplicador que utiliza a técnica de atomização da tinta e é amplamente utilizado em linhas de pinturas automotivas, principalmente na aplicação de *basecoat* e *clearcoat* (DOMNICK; THIEME, 2006, p. 857).

O processo de aplicação do sino rotativo inicia-se com a inserção da tinta pelo centro do aplicador *bell*, onde ocorre a sua atomização. As partículas de tinta são então conduzidas para fora do aplicador em direção à peça com auxílio do ar modelador, localizado ao redor do sino rotativo, ilustrado na Figura 10. O ar modelador também tem a função ajustar a largura do formato de cone produzido pelas partículas de tinta (DOMNICK; THIEME, 2006, p. 859). Além do ar modelador, outro fator que contribui para transferência das partículas é a diferença de potencial existente entre as partículas e a peça. Essa diferença de potencial ocorre, pois as partículas de tinta recebem cargas negativas, através de uma fonte de alta tensão, e a peça possui uma superfície carregada positivamente, devido a um sistema de aterramento. Isso gera um campo elétrico que auxilia na atração das partículas em direção à superfície da peça (MARK *et. al.*, 2013, p. 26).

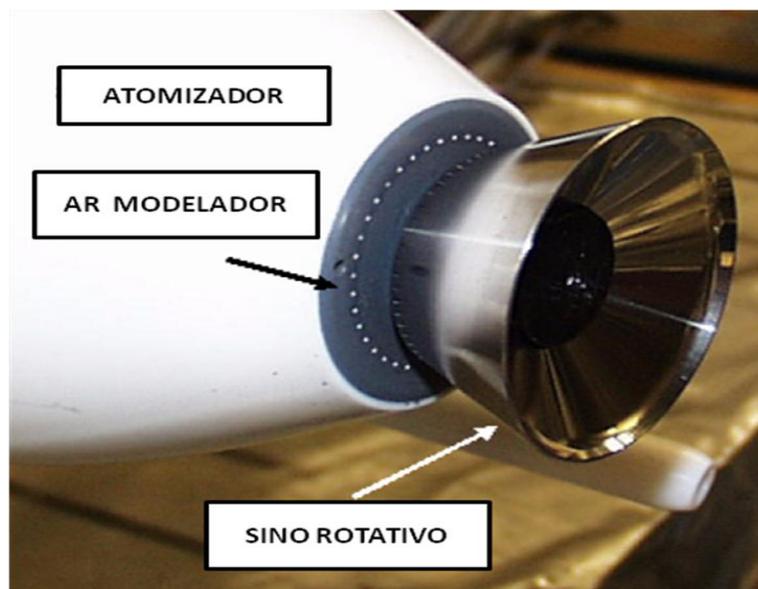


FIGURA 10 – SINO ROTATIVO DE ALTA VELOCIDADE  
FONTE: DOMNICK e THIEME (2006, p. 857).

A eficiência da transferência dos fragmentos de tinta está associada à relação entre os parâmetros pressão do ar modelador e a alta tensão (RUPP; GUFFEY; JACOBSEN, 2010, p. 150). A Figura 11 ilustra os equipamentos da aplicação com o sino rotativo de alta velocidade.

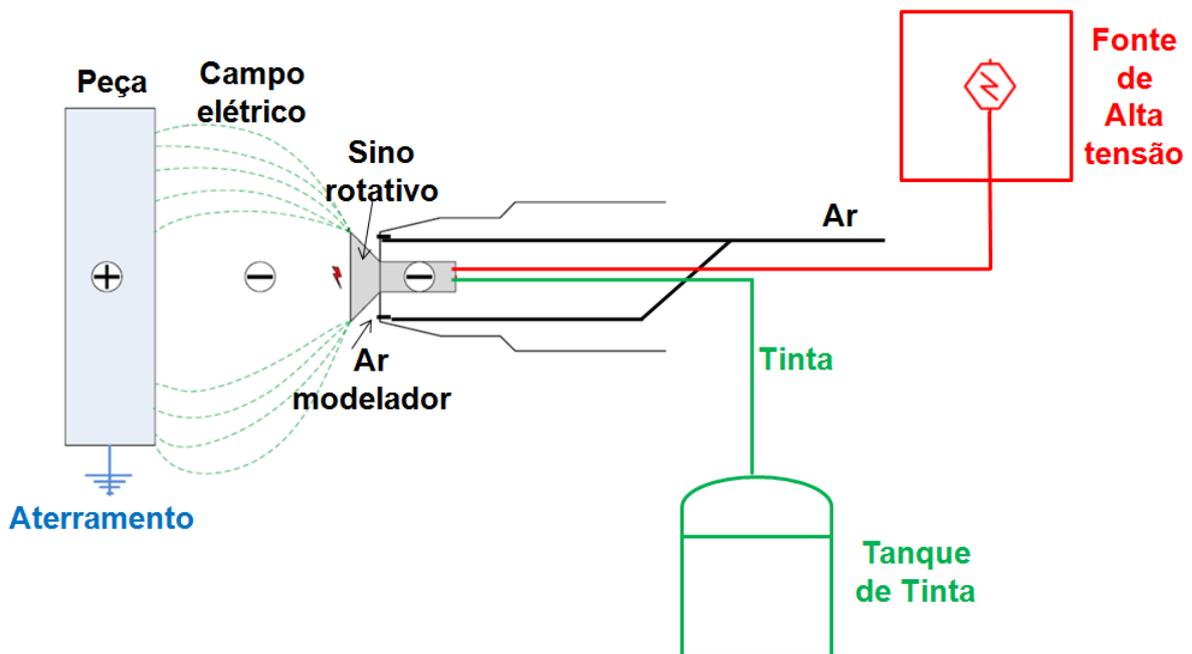


FIGURA 11 – EQUIPAMENTO ELETROSTÁTICO PARA APLICAÇÃO AUTOMÁTICA  
 FONTE: Adaptado de FAZENDA (2005, p. 819) e RUPP; GUFFEY; JACOBSEN (2010, p. 150).

Além dos parâmetros citados anteriormente, Ellwood e Braslaw (1998, p. 14) ressaltam a importância de dois fatores para a aplicação das partículas de tinta na superfície da peça, esses são: velocidade de rotação do sino, medido pelo número de rotações por minuto (rpm); e vazão de tinta, medido em mililitro por minuto (ml/min).

### 2.3 QUALIDADE

A qualidade observada sobre uma visão mais abrangente pode ser definida como a adequação de um produto ao uso (MONTGOMERY; RUNGER, 2012, p. 422). Ao analisar que a qualidade está inserida tanto no produto como no serviço, pode-se classificar a qualidade pela maneira com que o bem ou serviço se adéqua às especificações exigidas pelo cliente (MONKS, 1987, p. 435).

Em relação ao projeto de desenvolvimento de um produto ou serviço, a qualidade também pode ser dita como a adequação as especificações, mas dessa vez as exigências são provenientes do próprio projeto. A interação entre a qualidade de projeto e qualidade de conformidade, de um produto ou serviço, tem a origem justamente na fase de desenvolvimento do projeto (COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2005, p. 16).

Perante outra perspectiva, a qualidade pode ser avaliada com base na função perda, ou seja, com base na perda que um produto pode causar para a sociedade a partir da etapa de liberação de venda do bem de consumo. As perdas referem-se ao mau funcionamento, efeitos prejudiciais, poluição, custos operacionais e custos de manutenção. As perdas devem ser avaliadas levando em consideração a relação tanto da qualidade quanto do preço do produto. É importante haver uma igualdade entre esses dois fatores, pois o consumidor sofre perda no momento da compra do produto e também durante o uso de um produto que apresenta um baixo nível de qualidade (TAGUCHI *et. al.*, 1990, p. 2). Sendo assim o cliente mostra-se como elemento essencial na definição da qualidade de um bem. Para Ross (1991, p. 2), o consumidor é o único avaliador da qualidade.

### 2.3.1 Controle de qualidade

Atualmente tanto a qualidade de produtos como a de serviços são vistas como fatores primordiais para a tomada de decisões, em todos os ramos do mercado. A consequência disso é uma busca incessante das empresas pela melhoria da qualidade.

Não é apenas no processo de produção que um produto pode ser considerado defeituoso. Durante o seu ciclo de vida, o produto pode sofrer avarias, seja na etapa de produção, transporte ou manuseio. Devido a esse fato, a inspeção é um método inserido na qualidade que ganha mais atenção nos dias de hoje. No entanto, é habitual que empresas produzam em grandes quantidades, o que torna a inspeção de todas as unidades uma atividade demorada e muito cara. Assim surgiu a inspeção por amostragem, que determina a aceitação ou rejeição do lote, seja ele de recebimento ou expedição. No entanto, mesmo sendo um método eficiente de identificação de produtos defeituosos, a inspeção por amostragem não identifica a fonte do problema. Por essa razão, torna-se primordial o controle permanente dos

processos. Essa é a forma para detectar a origem dos problemas, ou causas especiais de dispersão, que tiram a média do valor-alvo (COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2005, p. 236).

Nas indústrias, o controle da qualidade se mostra presente no dia-a-dia da linha de produção. O controle de qualidade pode ser evidenciado pelas tarefas diárias que monitoram as condições do processo, sejam eles parâmetros ou especificações do produto (TAGUCHI *et. al.*, 1990, p. 11).

A estatística está presente no controle de qualidade das empresas. As diversas ferramentas encontradas na estatística garantem o gerenciamento do processo, de modo que esse funcione de forma previsível e rentável. As vantagens do controle estatístico de processo (*Statistic Process Control*) podem ser listadas como: menos desperdícios, baixa utilização de matéria-prima, baixo tempo de paradas por problemas no maquinário, produtos fabricados perto do valor-alvo e facilidade na detecção de alterações (DRAIN, 1995, p. 282).

Para a engenharia de qualidade, a qualidade é dividida em duas áreas fundamentais. A primeira área se refere ao controle da qualidade (CQ) fora da linha de produção, ou seja, é a melhoria da qualidade nas etapas de elaboração do produto e processo. A segunda área é o controle da qualidade dentro da linha de produção, que diz respeito ao monitoramento dos processos da produção através de gráficos com o intuito de acompanhar as variações inerentes ao sistema e conferir os níveis de qualidade dos bens produzidos (ROSS, 1991, p. 1). O controle de qualidade dentro da linha de produção, chamado também de controle de qualidade de processo, é tratado como uma das principais abordagens do monitoramento estatístico da qualidade:

As duas maiores abordagens ao controle de qualidade são a aceitação por amostragem dos produtos recebidos ou expedidos e o controle de processo das atividades de transformação. Ambos os métodos envolvem técnicas de amostragem estatísticas. Contudo, os métodos de aceitação por amostragem dependem da avaliação dos níveis dos itens defeituosos antes ou depois de um processo ser completado. O controle de processo é mais útil durante um processo para assegurar que a produção não está fora dos limites aceitáveis. O principal meio para se controlar um processo é o uso de gráficos de controle (MONKS, 1987, p. 438).

As principais ferramentas usadas pelo controle estatístico de processo são: Histograma; Gráfico de Pareto; Diagrama de causa e efeito; Diagrama de

concentração de defeitos; Gráfico de controle; Diagrama de dispersão; Folha de verificação (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

Neste trabalho as ferramentas provenientes do controle estatístico de processo utilizadas na apresentação dos resultados foram: Histograma; Gráfico de Pareto; e Diagrama de causa e efeito.

### 2.3.2 Causas da variabilidade

Em teoria, uma linha de produção deveria ser capaz de gerar, dentro de um lote de matéria-prima e sob parâmetros fixos do processo, unidades idênticas umas das outras. Na prática, isso não ocorre devido à variabilidade do processo. A variabilidade do processo é inerente a qualquer tipo de processo produtivo, pois representa a consequência de um conjunto de causas essencialmente inevitáveis (MONTGOMERY; RUNGER, 2012, p. 421).

Em uma linha de produção vários parâmetros são determinados para que os produtos sejam produzidos com um nível de aceitação. “Um alvo de um parâmetro é o valor ideal para esse parâmetro - material fabricado no alvo apresenta um valor ideal para o cliente e lucro para o produtor.” (DRAIN, tradução nossa, 1995, p. 283). O valor ideal é conhecido também como valor-alvo (COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2005, p. 22). A variação do valor-alvo é sempre prejudicial à qualidade dos bens produzidos, pois essa alternância do valor é danosa mesmo se a média do produto estiver dentro dos limites de especificação (DRAIN, 1995, p. 285). A Figura 12 aborda a relação entre a variação do valor-alvo e a qualidade do produto. Pode-se notar na Figura 12 que há aumento da perda à medida que o valor dos parâmetros se afasta do valor-alvo, mesmo se o valor estiver entre os limites inferior (LIE) e superior de especificação (LSE). Também é válido ressaltar que, mesmo quando os parâmetros estão no valor-alvo a perda não é nula.

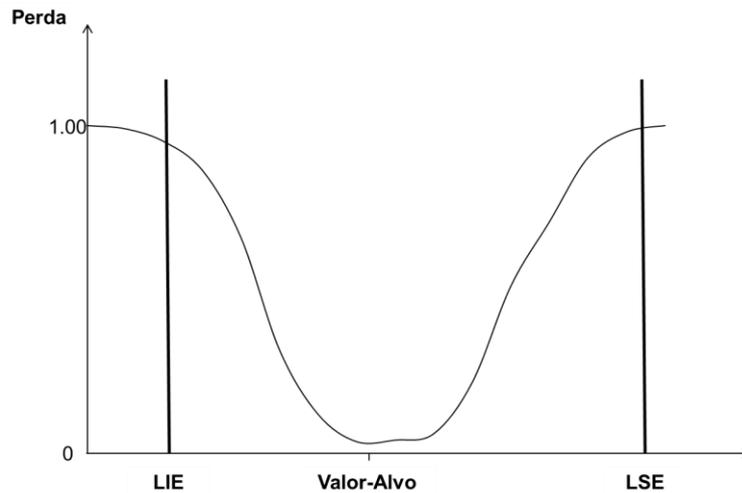


FIGURA 12 – FUNÇÃO PERDA  
 FONTE: Adaptado de DRAIN (1995, p. 285)

Existem dois modelos de causas de variação. Primeiramente a variação provocada por causas casuais. Esse tipo de causa é intrínseco à variação do processo e independe do desempenho da linha de produção (DRAIN,1995, p. 286). O processo produtivo com variação do valor-alvo do tipo casual é classificado como controle estatístico (MONTGOMERY; RUNGER, 2012, p. 423). Na Figura 13 está ilustrado um controle estatístico de processo onde os valores de parâmetro são informados periodicamente. O gráfico de controle da Figura 13 revela um comportamento da variação do processo tipo casual. Nele a variação do em torno do valor-alvo não indica nenhuma ocorrência incomum no processo, pois não há uma larga diferença entre os valores.

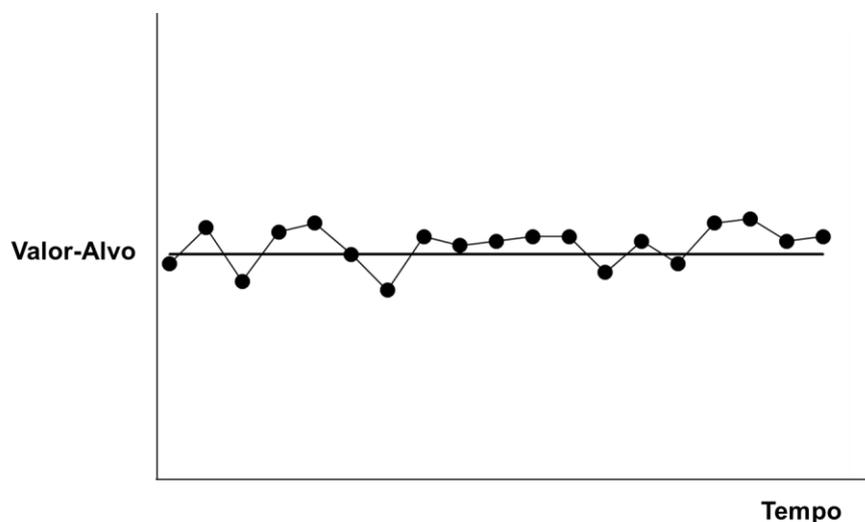


FIGURA 13 – CAUSAS CASUAIS DE VARIAÇÃO  
 FONTE: Adaptado de DRAIN (1995, p. 287)

O segundo modo de causa de variação trata de uma ocorrência incomum dentro do processo que resulta em uma larga e momentânea diferença no valor-alvo. Esse tipo de variação é dito como uma causa especial de variação (DRAIN, 1995, p. 286). Segundo Montgomery e Runger (2012, p. 423) existem três fontes do tipo especial de variação: máquinas não propriamente ajustadas, erros dos operadores e matéria-prima defeituosa. No entanto, no conceito, as causas especiais, mesmo sendo perturbações grandes capazes de deslocar a média do valor-alvo, podem ser eliminadas. Diferente das causas casuais de variação, processos que detêm causas especiais são considerados como fora de controle (COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2005, p. 25).

As formas de detecção das causas especiais de variação podem se percebidas pelos limites de controle apresentados nos gráficos do controle estatístico de produção. A partir da Figura 14, é possível identificar o comportamento de um processo que revela uma causa especial de variação. Nela, os valores de um parâmetro, controlados periodicamente, apresentam algumas ocorrências incomuns que demonstram larga diferença do valor-alvo.

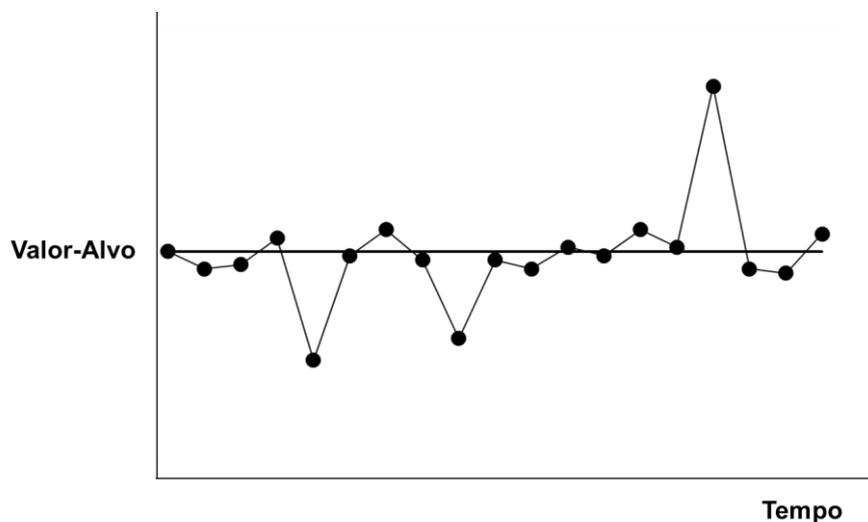


FIGURA 14 – CAUSAS ESPECIAIS DE VARIAÇÃO  
 FONTE: Adaptado de DRAIN (1995, p. 287)

### 2.3.3 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 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 tintas, outros somente são detectados após a cura das camadas de tinta. Conforme Carvalho (1993, p. 47), as falhas referentes à 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. (ADAMSON, 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 serão descritos a seguir:

### **Escorrimento**

O escorrimento trata-se de um acúmulo de tinta em superfícies verticais. O escorrimento pode ocorrer com qualquer tipo de substância, primer, base ou verniz. A Figura 15 ilustra um escorrimento da camada de verniz.

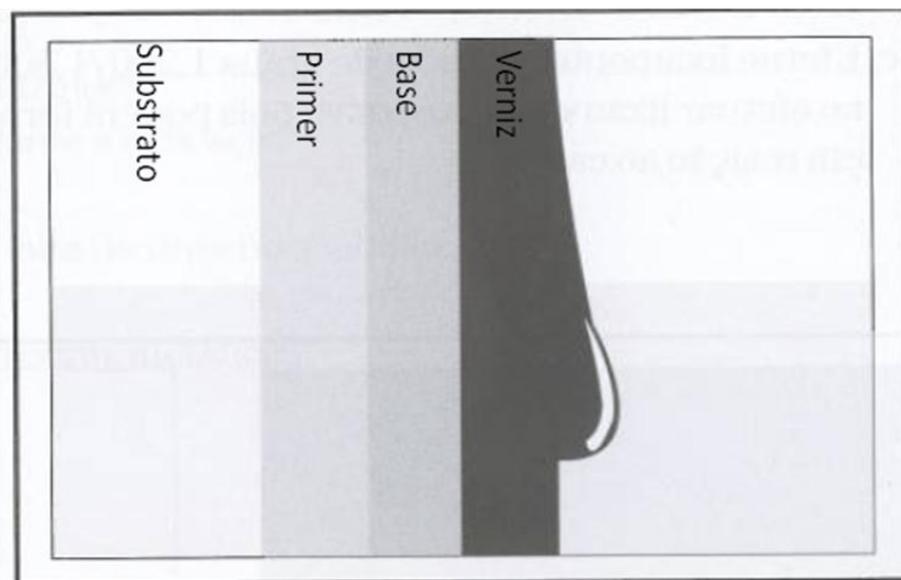


FIGURA 15– ESCORRIMENTO  
FONTE: FAZENDA (2005, p. 714)

Causas:

- Pressão de ar muito baixa
- Aplicação de camadas muito espessas
- Baixa viscosidade da tinta
- Superfícies muito lisas
- Pequeno intervalo entre demãos
- Temperatura e umidade das cabines

### 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. Neste caso ocorre o desnivelamento da película da tinta. A Figura 16 ilustra o aspecto de casca de laranja na pintura.

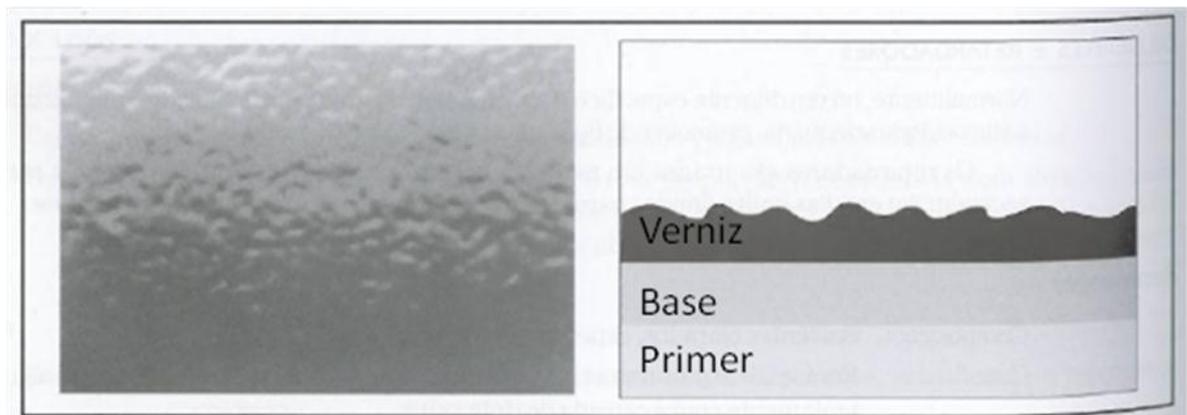


FIGURA 16 – CASCA DE LARANJA  
 FONTE: FAZENDA (2005, p. 712)

Causas:

- Tinta com alta viscosidade;
- Solvente com evaporação muito rápida;
- Temperatura muito elevada;
- Pressão de ar inadequada;
- Camada de tinta excessiva;
- Pigmentação ou refluxo de aditivo na tinta;

## Fervura

A fervura é um problema de aplicação semelhante a pequenas bolhas que surgem na superfície da peça após a aplicação da tinta e secagem da mesma. As pequenas bolhas são causadas pela evaporação desordenada de solventes na tinta através do revestimento da tinta. A Figura 17 ilustra o problema da fervura.

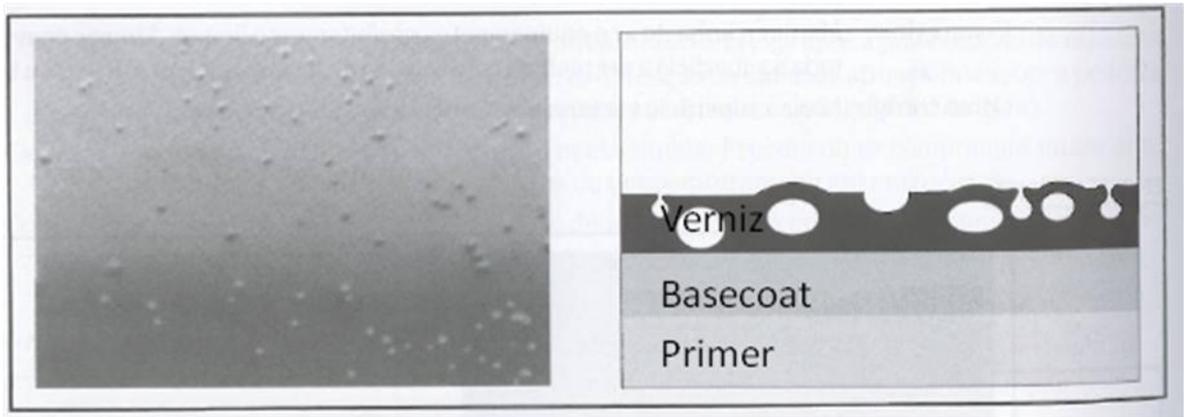


FIGURA 17 – FERVURA  
 FONTE: FAZENDA (2005, p. 714)

### Causas:

- Uso de diluentes com evaporação muito precoce;
- Uso de técnicas de aceleração da secagem;
- Temperatura ambiente elevada;

## Desplacamento

O deslocamento trata-se da perda de aderência de uma camada com a outra ou de uma camada com a superfície do substrato. A Figura 18 ilustra o deslocamento da camada de verniz.

### Causas:

- Excesso de camada de tinta;
- Produtos de limpeza inadequados;
- Limpeza inadequada;
- Falta de promotores de aderência;
- Falha no processo de flambagem;

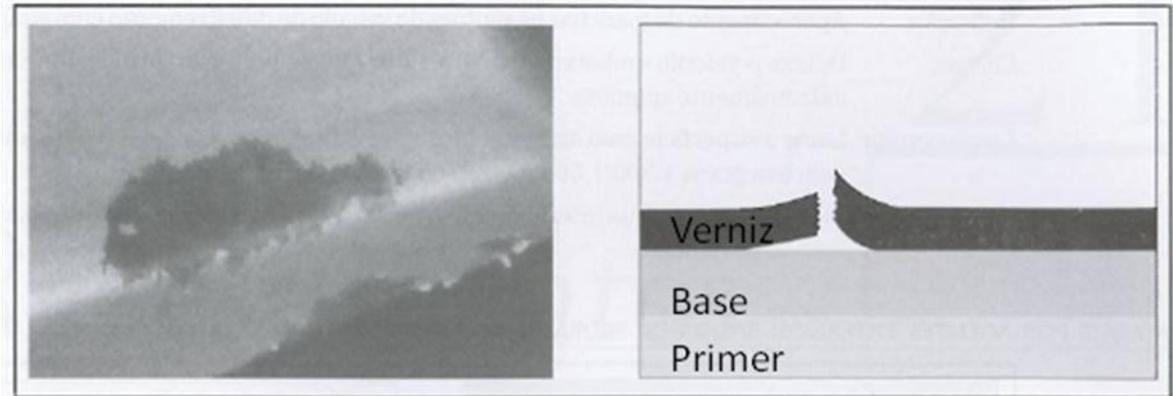


FIGURA 18 – DESPLACAMENTO  
 FONTE: FAZENDA (2005, p. 716)

### Mancha

A mancha refere-se a não uniformidade da cor na superfície da peça pintada. É mais facilmente percebida em peças de cor metálicas do que em peças de cor sólida, pelo aspecto de “sombra” que apresenta nas regiões da superfície.

Causas:

- Falha no método de aplicação do *basecoat*,

### Crateras

É um problema de aplicação que apresenta depressões na superfície da peça que pode expor as camadas inferiores. As crateras que se revelam no filme da tinta são formadas por bolhas as quais após se romperem não mais se nivelam. A Figura 19 ilustra o problema das crateras na superfície.

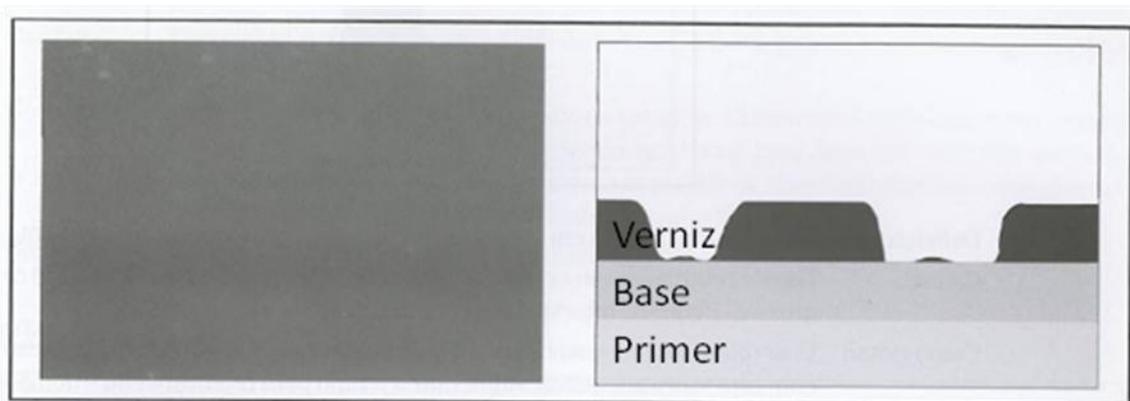


FIGURA 19 – CRATERAS  
 FONTE: FAZENDA (2005, p. 713)

Causas:

- Contaminação proveniente da própria peça;
- Contaminação proveniente do sistema de ar;

### Impurezas

As 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. A Figura 20 ilustra o problema das impurezas na pintura.

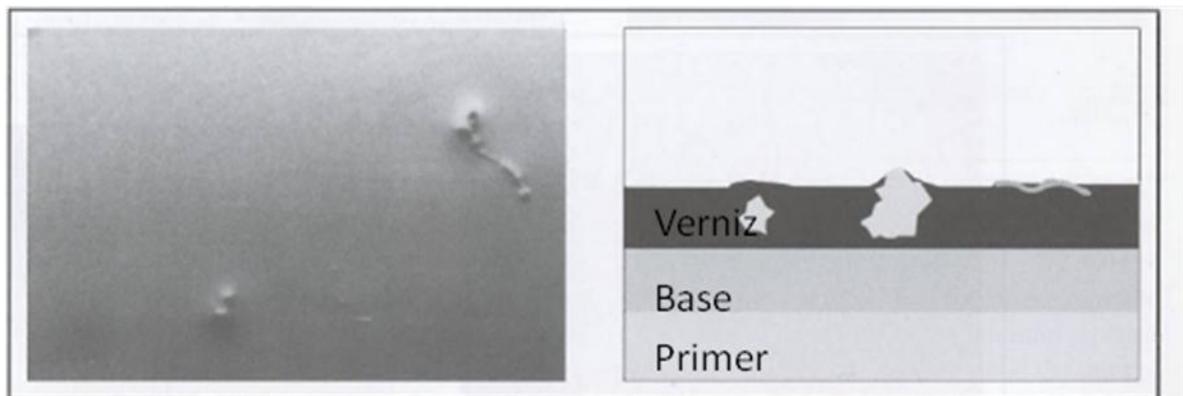


FIGURA 20 – IMPUREZAS  
 FONTE: FAZENDA (2005, p. 715)

Causas:

- Limpeza inadequada do substrato;
- Limpeza inadequada da cabine de pintura;
- Filtro do ar saturado;
- Filtro das tintas saturado;
- Cabines mal enclausuradas;

#### 2.3.4 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 a 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 o brilho, cor, durabilidade, resistência à quebra, a 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 mínimo (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 é possível 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). A Figura 21 ilustra o equipamento Wave Scan sobre a superfície pintada.



FIGURA 21 – MICRO WAVE SCAN  
FONTE: BYK (2015)

Segundo Adamsons (2012, p. 751) é possível identificar a relação entre a diminuição do brilho e a perda da distinção da imagem. Conforme a Figura 22, os valores mais altos medidos pelo Wave Scan indicam uma baixa definição da imagem de objetos refletidos pela camada de verniz da peça, quer dizer, o revestimento apresenta uma superfície irregular com alta intensidade da casca de laranja. As superfícies que são lisas criam um reflexo espelhado de um objeto qualquer, ou seja, baixa intensidade da casca de laranja.

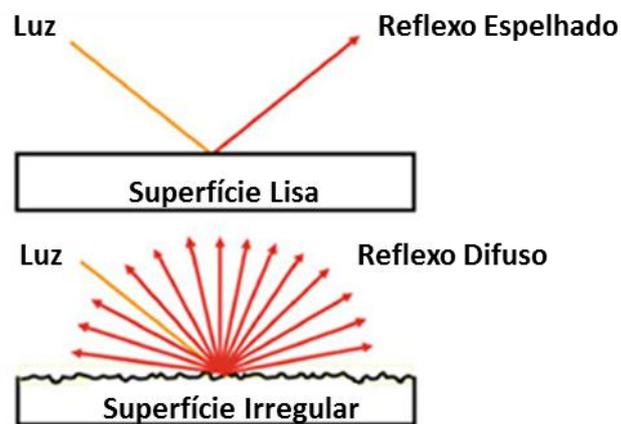


FIGURA 22 – DIFERENÇAS NA SUPERFÍCIE DA CAMADA DE VERNIZ AUTOMOTIVO  
 FONTE: Adaptado de ADAMSONS (2012, p. 752)

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 23 ilustra os conceitos de brilho, casca de laranja e *DOI* (*Distinctness of Image*).

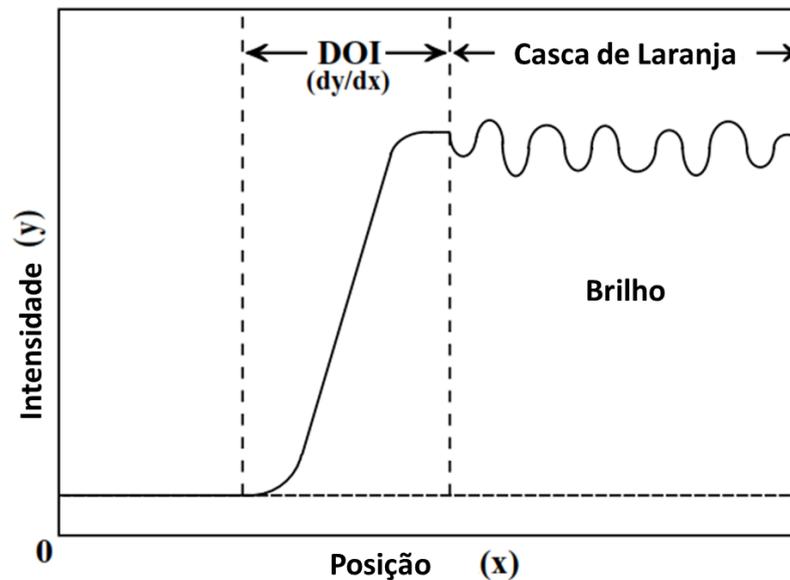


FIGURA 23 – CARACTERÍSTICAS DOS ASPECTOS USADOS PARA MONITORAR ALTERAÇÕES DOS SISTEMAS AUTOMOTIVOS  
 FONTE: Adaptado de ADAMSONS (2000, p. 1365)

Identificar os fatores responsáveis pela alta intensidade da casca de laranja na camada de verniz, aplicada na superfície de para-choques, no processo de pintura foi o que motivou o presente trabalho. O aparelho Wave Scan foi utilizado como equipamento de medição da intensidade da casca de laranja durante o estudo.

## 2.4 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

A estatística é requisitada em situações às quais existe uma grande quantidade de dados para ser analisada. No entanto, é no momento do planejamento de um experimento em 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 (NETO, 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 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; EPPRECHT; CARPINETTI, 2005, p. 16).

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

## 2.5 PROJETO ROBUSTO

A metodologia do Projeto Robusto foi desenvolvida pelo engenheiro japonês Genichi Taguchi e introduzida em grandes empresas norte-americanas na década de 80 (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, analisar as interações existentes entre os fatores controláveis (LAI; CHANG; CHANG, 2005, p. 446).

### 2.5.1 Conceito de Ruído

Conforme a metodologia de Taguchi, as variáveis não controláveis são chamadas de fatores ruídos (KIM; HAN; KIM, 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 e 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 em 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 e Gremyr, 2008, p. 27) (ROSS, 1991, p. 201):

- Ruídos Externos
- Ruídos internos
- Ruídos de Unidade para Unidade

Os ruídos externos são os fatores que causam variação e tem origem ambiental, que vem 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. A 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 os 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 os quais se pode atribuir níveis, mas que não existe nenhuma comprovação técnica para que sejam aplicados os níveis mais altos. Esses fatores são classificados para evitar que os

efeitos dele 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 os quais os valores não podem ser determinados nem mantidos. Eles influenciam nos resultados do experimento.

### 2.5.2 Função Perda de Qualidade

O controle de qualidade utiliza das especificações das funcionalidades do produto para monitorar a qualidade e aprovar ou reprovar peças. A perda resultante dos produtos defeituosos é facilmente percebida através dos retrabalhos e sucatas que eles geram. A perda da qualidade de um produto pode ser vista sob duas perspectivas, segundo a visão tradicional ou de acordo com a interpretação de Taguchi (KUMAR, MOTWANI e OTERO, 1996, p. 86).

Na visão tradicional da perda da qualidade, todo o produto que está dentro do intervalo de tolerância da especificação de uma funcionalidade tem igual nível de qualidade para o consumidor. Ou seja, o consumidor final não sente o impacto direto com esse tipo de perda, assim não há perda para a sociedade. E o produto que está fora das especificações resulta em uma perda de qualidade que somente o fabricante dos produtos sente o custo (KUMAR, MOTWANI e OTERO, 1996, p. 86).

A visão tradicional pode ser percebida através da Figura 24. Tendo  $y$  como a característica de qualidade de um produto qualquer e  $P$  como o custo de reparo ou troca da peça. É possível ver na Figura 24 o gráfico da função  $L(y)$ , perda de qualidade tipo degrau. Nela as especificações de um parâmetro são descritas como  $\mu \pm d$ , onde  $\mu$  simboliza o valor nominal da especificação e  $d$  o desvio aceitável, ou seja, a tolerância da característica do produto. Dentro do intervalo  $\mu - d$  até  $\mu + d$  o parâmetro do produto é considerado admissível e a perda é nula ( $L(y) = 0$ ). No entanto, valores fora do intervalo  $\mu \pm d$  tornam o produto inaceitável aos padrões de conformidade. Somente nesse caso existe a perda ( $L(y) = P$ ).

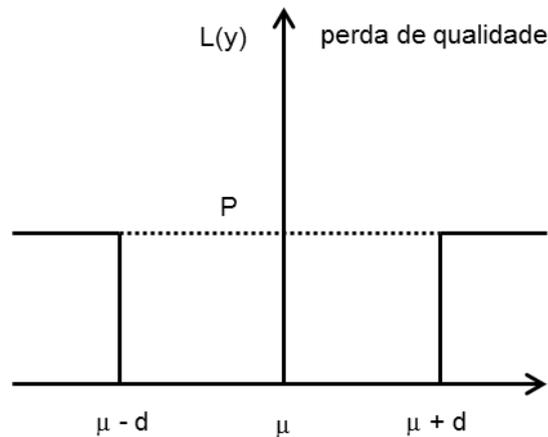


FIGURA 24 – FUNÇÃO PERDA DE QUALIDADE TIPO DEGRAU  
 FONTE: Adaptado de BERNARDIN (1994, p. 21)

Na visão do Taguchi, nem todos os produtos que atendem as especificações podem ser classificados no mesmo nível de qualidade. Mesmo quando os valores de uma característica funcional de qualidade de um produto estão dentro da tolerância, pode haver uma perda de qualidade caso esse valor afaste-se do valor nominal (VACARESCU, 2010, p. 9). Esse tipo de perda da qualidade impacta em custos tanto para a empresa quanto para o consumidor final. Os custos do fabricante são em forma de desconfiança do público na marca do produto e a redução da fatia do mercado. Os custos relacionados ao cliente podem ser definidos como problemas que geram reparos e perda de negócios durante a vida útil do produto (ROSS, 1991, p. 4).

A interpretação de Taguchi sobre a perda de qualidade está ilustrada na Figura 25. Nela, o gráfico mostra a função perda de qualidade quadrática que apresenta o custo da perda, resultado da variação no desempenho do produto, proporcional ao quadrado do desvio  $d$ . Na Figura 25 pode-se observar que quando  $y = \mu$  obtém-se a melhor condição, uma vez que, a perda de qualidade do produto é nula. Porém, quando a perda não é nula, o comportamento de  $L(y)$  é expresso por um leve aumento na perda em valores próximos de  $\mu$ . Já valores mais afastados de  $\mu$  fazem com que a perda aumente mais bruscamente. Portanto, mesmo os valores dentro do intervalo  $\mu \pm d$  resultam em uma perda sentida pela sociedade. Já a perda para os valores fora do intervalo  $\mu \pm d$  é sentida apenas pelo fabricante.

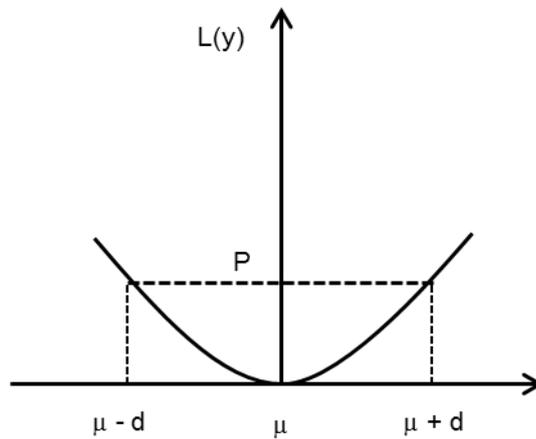


FIGURA 25 – FUNÇÃO PERDA DE QUALIDADE TIPO QUADRÁTICA  
 FONTE: Adaptado de BERNARDIN (1994, p. 22)

Tendo  $y$  como a característica de qualidade de um produto,  $\mu$  o valor nominal e  $k$  a constante coeficiente de perda de qualidade, a perda quadrática pode ser descrita através da função quadrática:

$$L(y) = k (y - \mu)^2 \quad (1)$$

Onde:

$L(y)$  = função perda quadrática

$k$  = constante coeficiente de perda de qualidade

$y$  = característica de qualidade de um produto

$\mu$  = valor nominal

Como o coeficiente de perda da qualidade  $k$  pode ser avaliado assumindo-se o máximo valor para a função perda  $L(y) = P$ , assim:

$$\begin{aligned} P &= k (y - \mu)^2 = k (\mu + d - \mu)^2 = k (\mu - d - \mu)^2 = kd^2 \\ k &= P/d^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Onde:

$L(y)$  = função perda quadrática

$k$  = constante coeficiente de perda de qualidade

$y$  = característica de qualidade de um produto

$\mu$  = valor nominal

$P$  = custo de reparo

$d$  = tolerância da característica do produto

As variações da função perda quadrática e o desvio quadrático médio (*MSD*) da função perda para *n* unidades são:

- Função perda nominal é melhor

$$L(y) = P/d^2 (y - \mu)^2 \quad (3)$$

$$MSD = s^2 + (\bar{y} - \mu)^2 \quad (4)$$

- Função perda menor é melhor

$$L(y) = P/d^2 y^2 \quad (5)$$

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (6)$$

- Função perda maior é melhor

$$L(y) = Pd^2 (1/y)^2 \quad (7)$$

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (8)$$

Onde:

$L(y)$  = função perda quadrática

$k$  = constante coeficiente de perda de qualidade

$y$  = característica de qualidade de um produto

$\mu$  = valor nominal

$P$  = custo de reparo

$d$  = tolerância da característica do produto

$n$  = número de unidades

$\bar{y}$  = média amostral

$s^2$  = variância amostral

$MSD$  = desvio quadrático médio

### 2.5.3 Razão Sinal Ruído

A configuração ótima de parâmetros de uma característica funcional de um produto torna-o menos sensível a influência dos fatores ruídos, diminui a variação do processo e maximiza a qualidade. Uma das ferramentas principais do projeto

robusto é a razão sinal ruído (S/R), a qual mede a robustez do processo e a qualidade do produto (LAI; CHANG; CHANG, 2005, p. 446).

A razão sinal ruído serve para medir a variabilidade de um valor reposta de uma propriedade do produto, ocasionada pela ação dos fatores ruídos. As melhores condições de um experimento são percebidas pela maximização da razão sinal-ruído. Sendo assim, a variabilidade é inversamente proporcional ao S/R (KIM; HAN; KIM, 2004, p. 56).

A partir da função perda de qualidade obtém-se o desvio quadrático médio (*MSD*), base do cálculo da razão sinal-ruído. A razão sinal-ruído é medida em unidade decibel [dB]. Essa razão envolve diferentes relações conforme a característica do fator ruído do experimento. As equações dessas várias relações sinais-ruído,  $\eta$ , para  $n$  unidades são (ROSS, 1991, p. 201) (MUHAMMAD *et. al.*, 2013, p. 1177):

- Nominal é melhor (*Nominal is Best*)

$$\eta = -10 \log (y_i^2) \text{ [dB]} \quad (9)$$

- Menor é melhor (*Lower is Best*)

$$\eta = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \text{ [dB]} \quad (10)$$

- Maior é melhor (*Higher is Best*)

$$\eta = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \text{ [dB]} \quad (11)$$

Onde:

$\eta$  = razão sinal ruído

$y$  = característica de qualidade de um produto

$n$  = número de unidades

#### 2.5.4 ARRANJOS ORTOGONAIS

Os processos de produção são influenciados por diversos fatores e suas interações. O projeto robusto objetiva entender os efeitos de um desses fatores sobre a performance de uma característica do produto. No entanto, estudar o impacto de tantos parâmetros no desempenho de um processo pode exigir altos

investimentos, caso todas as combinações possíveis entre os fatores seja testada. Justamente para minimizar os custos de experimentos e produzir resultados em curto espaço de tempo, o método do projeto robusto utiliza os arranjos ortogonais (AO) (KUMAR, MOTWANI e OTERO, 1996, p. 89).

O arranjo ortogonal trata-se de uma ferramenta primordial para o projeto robusto. Ele adota apenas as combinações entre fatores mais significativas, assim reduz o número de experimentos (LAI; CHANG; CHANG, 2005, p. 447).

A ortogonalidade significa que todos os fatores podem ser avaliados independentemente um do outro; o efeito de um fator não influencia na estimativa do efeito de outro fator. Uma exigência da ortogonalidade consiste no experimento equilibrado; número igual de amostras de acordo com as diversas condições de tratamento. (ROSS, 1991, p. 78).

Mori (1990, p. 31) apresenta na Figura 26 um exemplo de matriz de experimento do tipo arranjo ortogonal  $L_8$ . Nela, são dispostas em linha oito combinações dos níveis dos fatores. As colunas acomodam os sete fatores do experimento, com dois níveis cada. A matriz pode ser representada da seguinte forma  $L_8 (2^7)$ , onde o número 8 representa as combinações dos níveis de fatores dispostas em linhas, o número 7 mostra o número de fatores do experimento organizados em colunas, e o algarismo 2 indica a quantidade de níveis de cada fator.

<b>Fator</b> <b>Nº</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	1	1	1	1	1	1	1
<b>2</b>	1	1	1	2	2	2	2
<b>3</b>	1	2	2	1	1	2	2
<b>4</b>	1	2	2	2	2	1	1
<b>5</b>	2	1	2	1	2	1	2
<b>6</b>	2	1	2	2	1	2	1
<b>7</b>	2	2	1	1	2	2	1
<b>8</b>	2	2	1	2	1	1	2

FIGURA 26 – ARRANJO ORTOGONAL  $L_8$   
 FONTE: Adaptado de MORI (1990, p. 31)

Conforme Bernardin (1994, p. 26), para a construção de um arranjo ortogonal é necessário contar os graus de liberdade totais, pois eles vão determinar o número mínimo de experimentos a ser executados para a análise dos impactos de

todos os fatores de controle. Para a escolha de um arranjo ortogonal deve ter as seguintes informações:

- Número de fatores a serem estudados;
- Número de níveis para cada fator;
- Dificuldades específicas que serão encontradas no decorrer dos experimentos.

Portanto, a aplicação do projeto robusto está relacionado com a escolha do arranjo ortogonal, pois esse deve satisfazer as características projeto de experimento.

## 2.6 ANÁLISE DE VARIÂNCIA

A qualidade está atrelada com as técnicas estatísticas e a análise da variância é uma destas ferramentas que auxiliam os processos de produção.

A sigla ANOVA (*ANalysis Of VAriance*) refere-se a análise da variância (VIEIRA, 2006, p. 39). Essa ferramenta estatística serve para confrontar tratamentos por meio da comparação de duas ou mais médias que é feita através do teste *F*. O principal objetivo da análise da variância é classificar resultados estatísticos e testar se as médias de uma classificação específica diferem significativamente (DUNCAN, 1974, p. 609).

A ANOVA pode ser aplicada também para estimar quantitativamente os fatores significantes na característica de qualidade de um produto (MUHAMMAD *et. al.*, 2013, p. 1177). Para Mori (1991, p. 183), a análise de variância serve como apoio para o planejamento de experimentos e é um método matemático essencial quando é aplicada a razão sinal-ruído em um experimento.

Para realizar a análise de variância é fundamental entender os conceitos básicos que perpassam durante esta análise estatística. A unidade experimental, por exemplo, é a unidade que guiará o experimento (VIEIRA, 2006, p.1). Em complemento, Drumond, Werkema e Aguiar (1996, p. 90) definem a unidade experimental como uma unidade elementar que servirá de medida da variável resposta.

Outro conceito importante diz respeito a variável em análise. Vieira (2006, p. 2) define a variável em análise como “a condição ou característica medida ou observada no experimento.” Fazendo o uso de outra terminologia, os autores Drumond, Werkema e Aguiar (1996, p. 90) chamam a variável em análise de variável resposta.

Já o fator é a variável que pode estar influenciando a característica da qualidade de interesse (DRUMOND; WERKEMA; AGUIAR, 1996, p. 90). Montgomery e Runger (2012, p. 338) explica que as variáveis que compõem um processo podem ser controláveis ou não.

Cada um dos diferentes modos de presença de um fator é denominado nível do fator (DRUMOND; WERKEMA; AGUIAR, 1996, p. 90). Segundo Montgomery e Runger (2012, p. 340) o nível do fator pode ser também chamado de tratamento.

### 2.6.1 Cálculo de análise de variância

O cálculo de análise de variância nesta pesquisa foi baseado nas bibliografias dos autores Montgomery e Runger (2012), Vieira (2006) e Drumond, Werkema e Aguiar (1996). Observando a Tabela 1 pode-se verificar o cálculo do método de soma dos números de repetições ( $r$ ), números de tratamentos ( $k$ ) e o número de unidades ( $n$ ).

	Tratamento					Total
	1	2	3	...	k	
<b>Total</b>	$T_1$	$T_2$	$T_3$	...	$T_k$	$\Sigma y$
<b>Número de repetições</b>	$r$	$r$	$r$	...	$R$	$n = kr$

TABELA 1 – UM EXPERIMENTO INTEIRAMENTE AO ACASO  
 FONTE: Adaptado de VIEIRA (2006, p. 41)

A Tabela 2 apresenta as fórmulas que foram utilizadas para calcular o Grau de Liberdade, Valor de Correção, Soma dos Quadrados e Valor  $F_0$  Calculado.

GRAU DE LIBERDADE (gl)	VALOR DE CORREÇÃO (C)	SOMA DOS QUADRADOS	VALOR $F_0$ CALCULADO
<b>Tratamento:</b> gl Tratamento = (k-1)	$C = \frac{(\sum y^2)}{n}$	<b>Soma dos quadrados total (SQT):</b>  SQT = $\sum y^2 - C$	$F_0 = \frac{SQMTr}{SQMe}$
<b>Total:</b> A partir da fórmula n=kr :  gl Total = (n-1)		<b>Soma dos quadrados de tratamentos (SQTr):</b>  $SQTr = \frac{\sum T^2}{r} - C$	
<b>Resíduo:</b> gl Resíduo = (n - k)		<b>Soma de quadrados de resíduo (SQe):</b>  SQe = SQT - SQTr	
		<b>Quadrado médio de tratamentos (QMTr):</b>  $QMTr = \frac{SQTr}{k-1}$	

TABELA 2 – FÓRMULAS PARA A ANÁLISE DA VARIÂNCIA  
 FONTE: Adaptado de VIEIRA (2006, p. 41)

Drumond, Werkema e Aguiar (1996, p. 139) finalizam o teste explicando que “a regra de decisão consiste em rejeitar a hipótese  $H_0$  de igualdade das médias dos tratamentos se  $F_0 > F_{\alpha(k-1, n-k)}$ ”. Caso contrário, a hipótese  $H_0$  deve ser aceita e conclui-se que existe igualdade entre as médias. Da mesma forma, Vieira (2006, p. 42) informa que se deve comparar os valores  $F_0$  e o valor crítico de  $F$ , de acordo com o nível de significância ( $\alpha$ ) pré-determinado e o grau de liberdade.

Se o valor de probabilidade ( $p$ -valor) é menor do que o nível de significância ( $\alpha$ ), o fator  $a$  é considerado como sendo estatisticamente significativo. Assim se a taxa de  $p$ -valor for inferior a 0,05, mais significativo será o fator. A importância relativa dos fatores é frequentemente representada em termos da razão  $F$ . Quanto maior for a proporção de  $F$  indica que a variação do parâmetro do processo resulta em uma grande mudança no desempenho do produto (MUHAMMAD *et. al.*, 2013, p.

1177). A tabela da análise da variância (ANOVA) que será utilizada nesta pesquisa é exibida na Tabela 3.

<b>Causa de variação (Source)</b>	<b>gl (Degree of Freedom)</b>	<b>SQ (Seq SS)</b>	<b>QM (Adj SS)</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>Tratamentos (Factors)</b>	$(k - 1)$	SQTr	QMTr	$F_0$	
<b>Resíduo (Residual Error)</b>	$(n - k)$	SQR	QMR		
<b>Total</b>	$(n - 1)$	SQT			

TABELA 3 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DE UM EXPERIMENTO INTEIRAMENTE AO ACASO  
 FONTE: Adaptado de VIEIRA (2006, p. 42)

Em síntese, o capítulo da revisão de literatura abordou todos os assuntos relativos ao processo de produção e pintura de para-choques, sobre controle de qualidade, características do projeto robusto e a análise de variância. O conhecimento adquirido nesse capítulo serviu de fundamento para o desenvolvimento do capítulo seguinte referente à metodologia do trabalho.

### 3 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo tem por finalidade apresentar as técnicas e método de pesquisa que foram utilizados para o desenvolvimento do presente trabalho. Para execução dessa pesquisa e a delimitação do campo a ser estudado, pretendeu-se cumprir as seguintes etapas: Caracterização da pesquisa; Apresentação da empresa parceira; Etapas do Projeto Robusto.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Para Thiollent (2005), a metodologia de uma pesquisa é o instrumento e habilidade pelo qual a investigação e a apuração do problema proposto são viabilizadas, a fim de que os objetivos traçados, conceitos, hipóteses e tomada de decisão sejam cumpridos.

Um dos critérios para a classificação da pesquisa é a identificação da sua natureza. Partindo do princípio que o trabalho busca conhecimentos para serem aplicados e identificar possibilidades de melhoria no processo de pintura, pode-se classificar a natureza do estudo como sendo aplicada. Gil (2002, p. 42) associa a natureza aplicada à vontade de melhorar a eficácia ou a eficiência de algo.

A abordagem utilizada no trabalho foi a quantitativa. O que distingue uma abordagem quantitativa da qualitativa é a ação de mensurar variáveis. Geralmente, é através das ferramentas estatísticas que os estudos quantitativos avaliam os dados coletados (MIGUEL *et. al.*, 2010).

Diante da intenção deste trabalho em explicar a razão de um defeito da pintura de para-choques, foi possível classificar o estudo como sendo do tipo explicativo. Um estudo com propósito explicativo pretende identificar as variáveis que interferem na ocorrência de um fenômeno (GIL, 2002, p. 42).

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).

No Quadro 3 está destacada a classificação resumida do método da pesquisa.

<b>NATUREZA</b>	<b>FORMA DE ABORDAGEM</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>PROCEDIMENTO TÉCNICO</b>	<b>TÉCNICA DE COLETA DE DADOS</b>
Básica	Qualitativa	Exploratório	Pesquisa Documental	Questionário
Aplicada	Quantitativa	Descritiva	Pesquisa Bibliográfica	Entrevista
		Explicativa	Levantamento	Coleta de Documentos da empresa
			Experimento	Observação
			Pesquisa-Ação	Levantamento bibliográfico
			Observação	Monitoramento do processo
			Estudo de caso	

QUADRO 3 – CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA  
 FONTE: O autor (2015)

### 3.2 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA PARCEIRA

Uma empresa de componentes plásticos foi escolhida para o estudo devido à acessibilidade por parte do pesquisador às informações da linha produtiva. As

etapas do experimento requereram a análise de repetitividade e reprodutibilidade que precisaram ser acompanhados pelo pesquisador. Por isso, foi essencial o fácil acesso ao processo e aos dados técnicos.

A empresa escolhida para o desenvolvimento deste trabalho 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. Instalada no Brasil desde 1998, sua sede em São José dos Pinhais-PR emprega em torno de 800 funcionários.

O principal componente produzido é o para-choque, a produção média é de 2500 para-choques/dia. Os processos que envolvem a produção dos para-choques são: injeção, pintura e montagem. A linha de pintura desta indústria de componentes plásticos tem uma variedade de 20 modelos de para-choques, que podem ser pintados em 10 cores diferentes cada.

### 3.3 ETAPAS DO PROJETO ROBUSTO

A aplicação do método do projeto robusto envolveu oito etapas que são classificadas nas seguintes fases: planejamento, execução e análise (BERNARDIN, 1994, p. 38) (KUMAR, MOTWANI e OTERO, 1996, p. 89) (LAI; CHANG; CHANG, 2005, p. 449) (WU e CHEN, 2005, p. 2407). As etapas realizadas nesta pesquisa estão ilustradas na Figura 27.

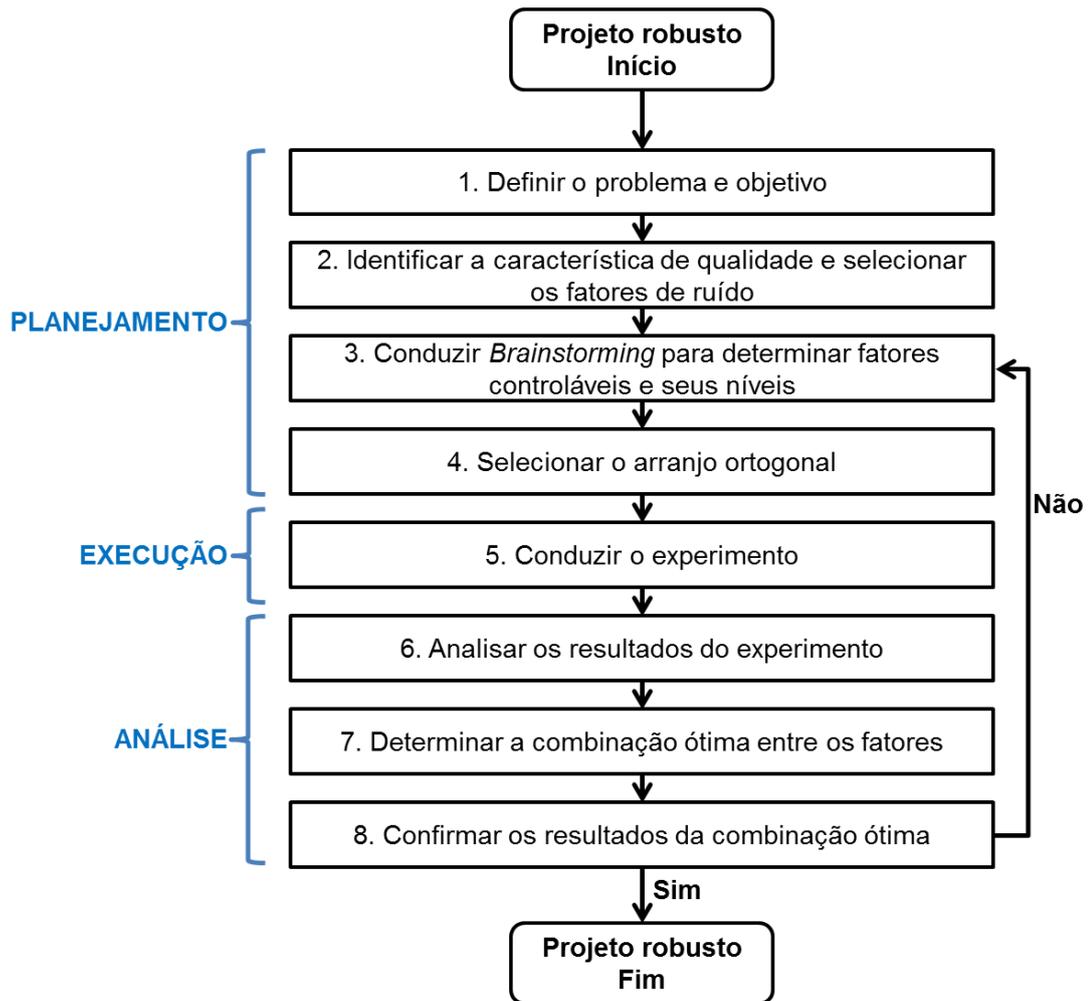


FIGURA 27 – FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DO PROJETO ROBUSTO REALIZADAS NA PESQUISA  
 FONTE: O autor (2015)

### 3.3.1 Planejamento

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 casca de laranja na linha de pintura de para-choques e definido 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 (*American Society for Testing and Materials (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 onde foram determinados os números de fatores controláveis e o número de níveis de cada um deles. Esses valores possibilitaram a escolha do arranjo ortogonal mais pertinente ao experimento.

### 3.3.2 Execução

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.

### 3.3.3 Análise

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 a determinada da 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 verificado os valores dos fatores ruidos.

Durante o capítulo da metodologia foi caracterizada a presente pesquisa, apresentada a empresa onde o trabalho foi desenvolvido, e apresentada todas as etapas necessárias para a realização do projeto robusto. No capítulo seguinte as etapas foram detalhadas, assim como, todos os resultados obtidos na pesquisa.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo é feito um relato da aplicação de cada etapa do projeto robusto na linha de pintura automática da empresa escolhida. Cada etapa dessa metodologia gerou dados e resultados que serão discutidos para o melhor entendimento do experimento.

Portanto, são apresentadas as etapas de definição do problema e objetivo, identificação da característica de qualidade, condução do *brainstorming*, seleção do arranjo ortogonal, condução do experimento, análise dos resultados do experimento e determinação da combinação ótima.

### 4.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVO

A primeira etapa do projeto robusto refere-se à definição do problema e objetivo, elementos que nortearam os experimentos. Para definir o problema primeiramente foi necessário compreender todas as operações que envolvem a fabricação do para-choque dentro da empresa parceira.

O processo completo de fabricação do para-choque inicia-se na injeção dos grânulos de polipropileno, passa pela pintura do para-choque injetado e termina na montagem dos componentes dos para-choques já pintados. A Figura 28 mostra o fluxograma de produção de para-choques, da empresa estudada, com ênfase no processo de pintura. Como se pode perceber na Figura 28 o para-choque após injetado fica armazenado em um estoque. Conforme a programação da linha há o transporte da peça até a linha de pintura. Logo, operadores carregam a peça em um suporte (gancheira) que está fixado ao transportador da linha. O transportador conduz a peça para as limpezas manuais (n°1 e n°2). A primeira, trata-se de 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. Após o período dentro do forno, a peça é

retirada da linha e levada aos postos de trabalho onde 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 desse ponto: montagem, polimento, lixamento e *scrap*.

As peças em conformidade chegaram ao fim do processo de pintura e vão diretamente para a montagem, onde são colocados todos os seus componentes, e então são enviadas para o cliente.

As peças que apresentam problemas que são considerados complexos vão para o lixamento. Essa fase corresponde ao lixamento, com uma lixa grossa, das regiões defeituosas no intuito de nivelar a superfície da peça, ou até mesmo a retirada das camadas de tinta depositadas durante a pintura. A partir daí as peças poderão ser retrabalhadas, ou seja, irão para o estoque de onde 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*”, operação em que as peças são preparadas para serem 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 onde os operadores utilizam de uma 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, ele é enviado para o processo de montagem. Do contrário, a peça recebe o lixamento e retorna à linha de pintura para ser retrabalhada.

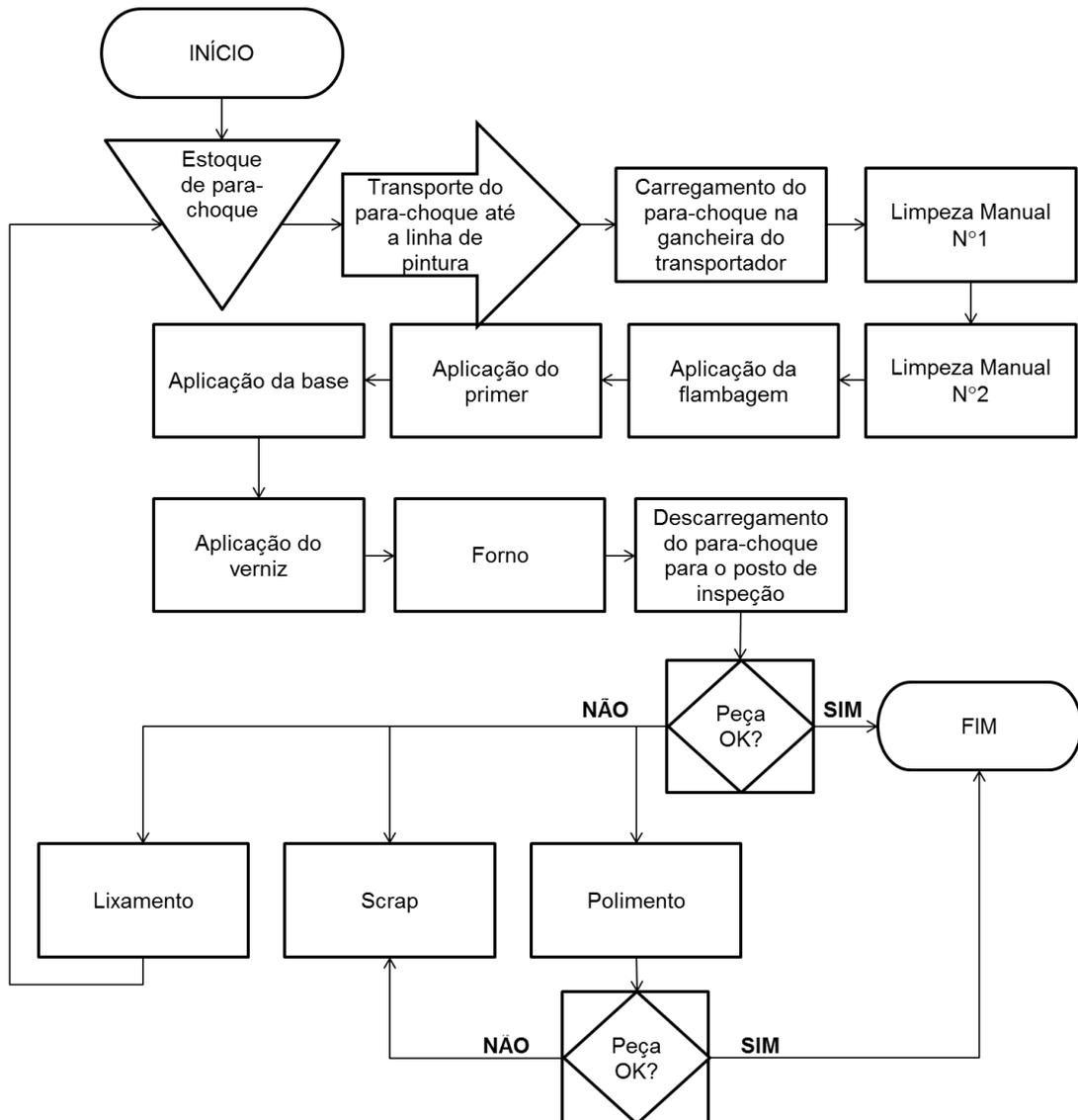


FIGURA 28 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE PINTURA AUTOMÁTICA DA EMPRESA PARCEIRA  
 FONTE: O autor (2015)

Após a compreensão do fluxo do processo de pintura, julgou-se necessário a visualização do desempenho da linha de pintura e identificação dos problemas existentes no processo.

A Figura 29 ilustra o desempenho da linha de pintura de para-choques da empresa parceira em relação ao destino das peças, durante o primeiro trimestre de 2014. O gráfico mostra que 48,15% das peças que passaram pelo processo de pintura foram consideradas pelos operadores da inspeção visual como peças em conformidade, ou seja, foram enviadas diretamente para o processo montagem. O restante das peças, 51,86%, foi considerado não conforme. Das peças não conformes, 31,02% das peças foram encaminhadas para a operação de polimento.

As peças que vão para o processo de polimento ainda podem ser recuperadas e enviadas para a montagem. No entanto, peças que precisam ser polidas além de retardarem o fluxo produtivo da linha, representam custo de mão-de-obra, visto que oito operadores por turno são necessários para atender a demanda dessa operação de reparação de peças defeituosas.

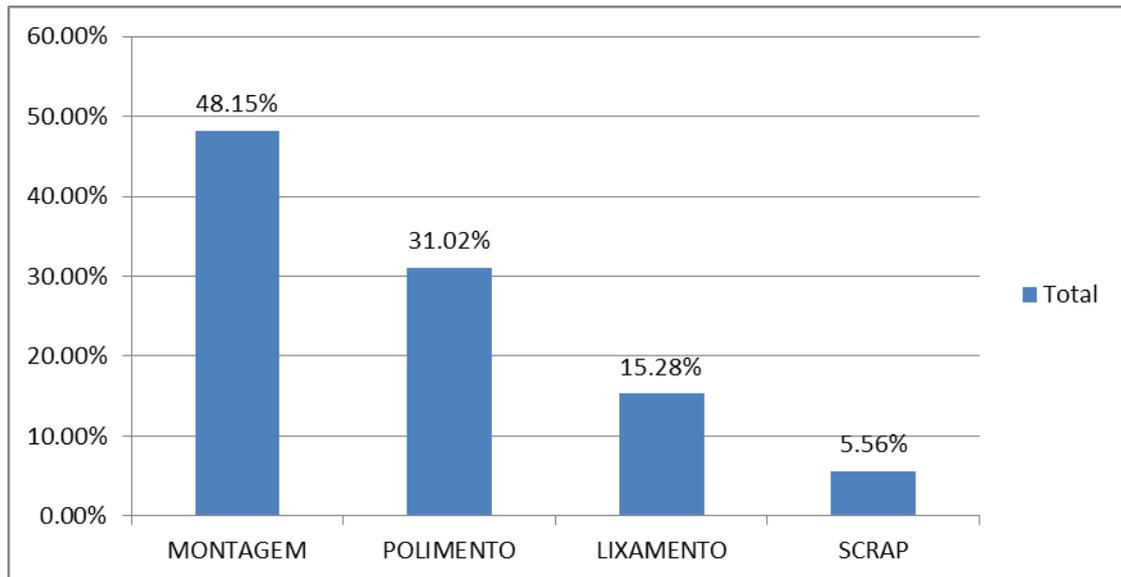


FIGURA 29 – DESEMPENHO DA LINHA DE PINTURA DA EMPRESA PARCEIRA  
 FONTE: O autor (2015)

A Figura 30 ilustra os dez principais defeitos, apontados pelos operadores que realizam a inspeção visual na linha de pintura, de peças enviadas para o polimento, durante o primeiro trimestre de 2014. Conforme a Figura 30 foi possível observar que o defeito da casca de laranja predominou como principal defeito. Pelo gráfico, se percebeu que a casca de laranja quase representou 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.

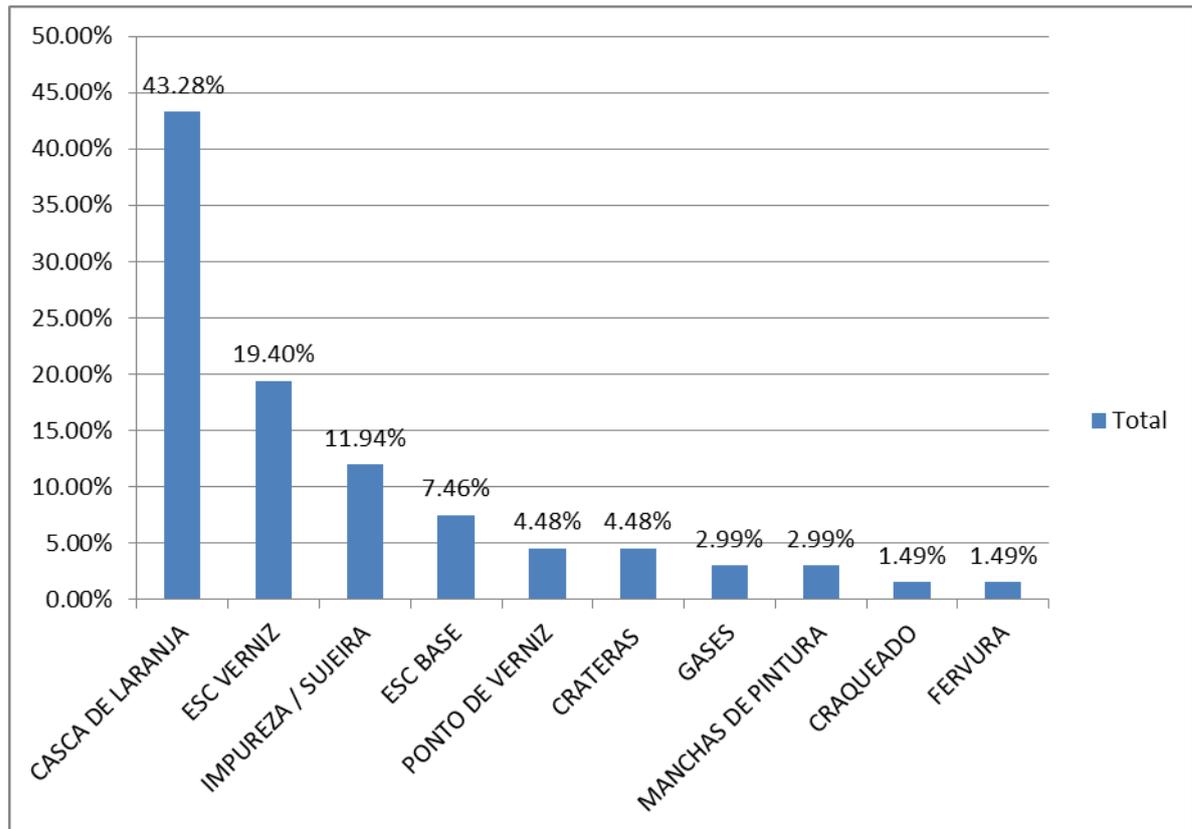


FIGURA 30 – PRINCIPAIS DEFEITOS DE PINTURA DO POLIMENTO

FONTE: O autor (2015)

A intensidade da casca de laranja nas peças pode ser medida pelo equipamento Wave Scan através de dois valores que representam o comprimento de onda, SW (*Short Wave*) e o 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, conforme Quadro 4.

TIPO DE COMPRIMENTO DE ONDA	CONDIÇÃO ACEITÁVEL	CONDIÇÃO NÃO ACEITÁVEL
<b>Short Wave (SW)</b>	$0 \leq SW \leq 25$	$SW > 25$
<b>Long Wave (LW)</b>	$0 \leq LW \leq 8$	$LW > 8$

QUADRO 4 – NORMA DE QUALIDADE PARA O WAVE SCAN

FONTE: O autor (2015)

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 realizada pelos operadores nos para-choques de pós-pintura não garante a isenção de falhas na identificação de peças com intensidade de casca de laranja não aceitável.

O método de medição por amostragem da casca de laranja dos para-choques segue uma frequência de acordo com a programação da linha de pintura, onde são medidos diariamente, de maneira aleatória, dois para-choques de cada modelo, de cada cor. As medições da intensidade da casca de laranja dos para-choques são realizadas pelos técnicos do setor da qualidade da pintura. A instrução de trabalho dos técnicos do setor da qualidade da pintura também determina as regiões do para-choque que a intensidade da casca de laranja deve ser medida. São três regiões medidas, as duas laterais do para-choque e a região frontal.

Para entender melhor a dimensão do problema da casca de laranja na empresa estudada, o modelo de para-choque de maior volume na linha de pintura, 15% da produção, foi selecionado como exemplo. Foi fornecido pelo setor da qualidade o histórico das medições com Wave Scan da região frontal desse modelo durante um período de dois meses de produção, totalizando 264 para-choques pintados. As medições foram realizadas em peças que tinham como destino a operação de polimento, independentemente dos defeitos apontados pelos operadores responsáveis pela inspeção visual. A Figura 31 apresenta um histograma que demonstra a dispersão dos valores medidos referente ao comprimento de onda tipo *Short Wave* para esse modelo de para-choque. Assim na Figura 31 foi possível analisar que a maior concentração dos valores de SW (56,44%) estava entre  $30 \pm 5\text{mm}$ . No histograma a linha vermelha pontilhada ilustra o ponto de corte no valor de 25mm. À esquerda dessa linha estão os valores aceitáveis de comprimento de onda SW e à direita da linha estão os valores não aceitáveis, conforme as condições do Quadro 4. Portanto, foi possível constatar na Figura 31 que 78,03% dos para-choques medidos possuem intensidade alta da casca de laranja para o fator SW.

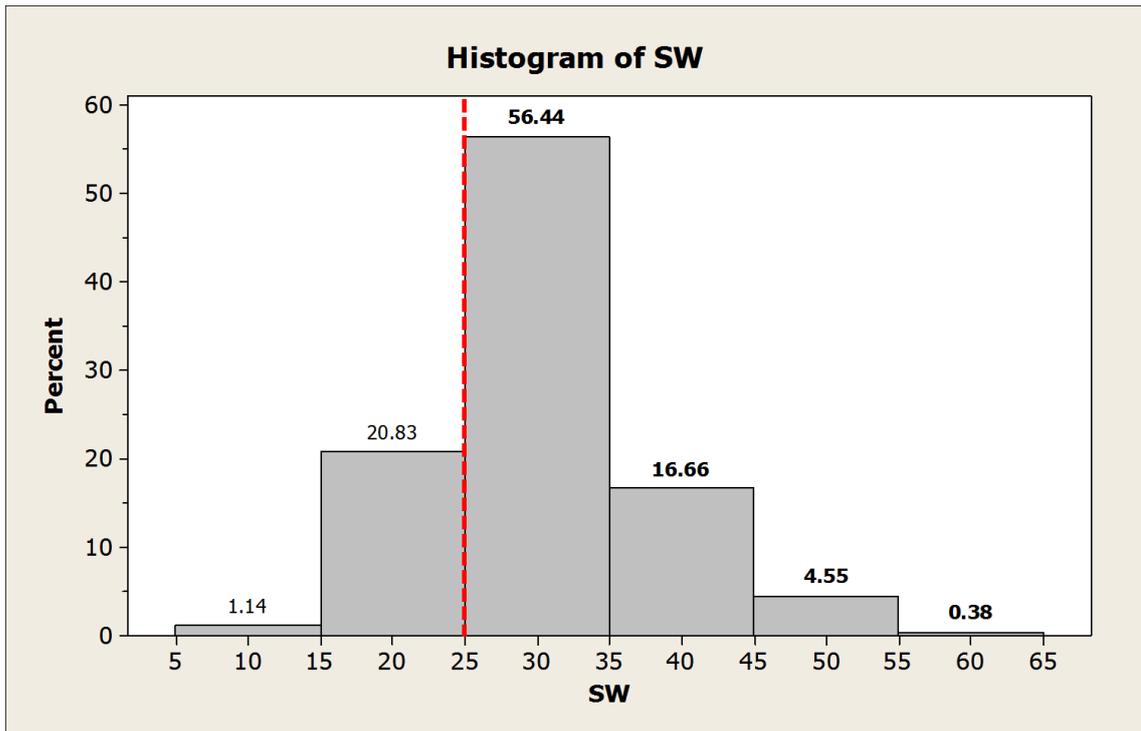


FIGURA 31 – HISTOGRAMA DO COMPRIMENTO DE ONDA SW  
 FONTE: MINITAB (2015)

As medições do comprimento de onda do conjunto de para-choques também apresentou a dispersão do comprimento de onda *Long Wave* através da Figura 32. Nela, a linha vermelha pontilhada, ilustrada no histograma, representa o ponto de corte no valor de 8mm. À esquerda dessa linha estão os valores aceitáveis de comprimento de onda LW e à direita da linha estão os valores não aceitáveis, conforme as condições do Quadro 4. Assim, a Figura 32 revelou que uma quantidade de 79,17% de peças apresentaram índices acima do valor aceitável.

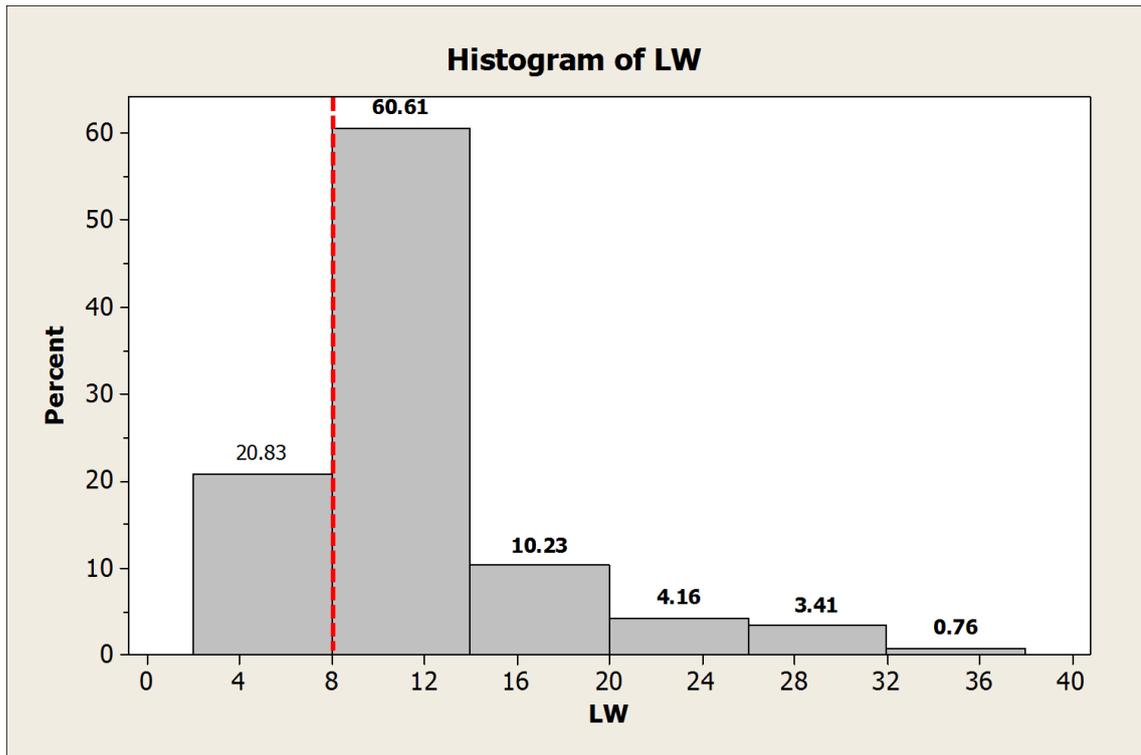


FIGURA 32 – HISTOGRAMA DO COMPRIMENTO DE ONDA LW  
 FONTE: MINITAB (2015)

Desse modo, o problema da casca de laranja foi identificado 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 na agilidade da linha de produção e compromete a entrega de peças ao cliente final.

A identificação do problema permitiu a definição dos objetivos da pesquisa. Portanto, o objetivo foi identificar os fatores de aplicação do verniz que interferem na intensidade da casca de laranja em superfícies de para-choques pintados e propor uma combinação ótima dos fatores através da metodologia do projeto robusto.

## 4.2 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 as variações. No entanto, um processo robusto depende do entendimento dos fatores causadores dessa variação. O estudo desses fatores ocorre por meio das ferramentas Razão Sinal-Ruído e o Arranjo Ortogonal.

No trabalho desenvolvido na empresa de pintura de para-choques, foi selecionada a característica da qualidade referente ao aspecto visual em superfície de peças pintadas. Um dos defeitos comuns da pintura tratou-se da aparência da superfície pintada similar a uma casca de laranja, que gera a distorção da imagem refletida. Como foi explicada anteriormente, essa imperfeição da superfície da peça pintada pode ser medida através de comprimento de onda, SW (*Short Wave*) e o LW (*Long Wave*).

Tendo clara a característica de qualidade selecionada no trabalho, os modos de quantificá-la, através dos tipos de comprimento de onda SW e LW, podem ser classificados como os fatores ruídos do experimento.

De acordo com o quadro 4, pode-se concluir que quanto mais baixos os valores de SW e LW melhor para a característica de qualidade, ou seja, para o presente trabalho é indicada a razão sinal ruído tipo “menor é melhor”, também conhecida como *Lower is Best (LB)*, que pode ser calculada conforme a Fórmula 10.

#### 4.3 CONDUÇÃO DO *BRAINSTORMING*

Para auxiliar a análise do problema da alta intensidade da casca de laranja na superfície pintada de para-choques, foi empregado o método do diagrama de causa e efeito ilustrado na Figura 33. A partir de um *brainstorming* entre técnicos e engenheiros da empresa, foram apuradas as possíveis causas de variação da característica de qualidade em questão e divididas em seis principais tipos: Meios de Medição; Matéria-Prima; Mão de Obra; Meio Ambiente; Método de Trabalho; Máquina.

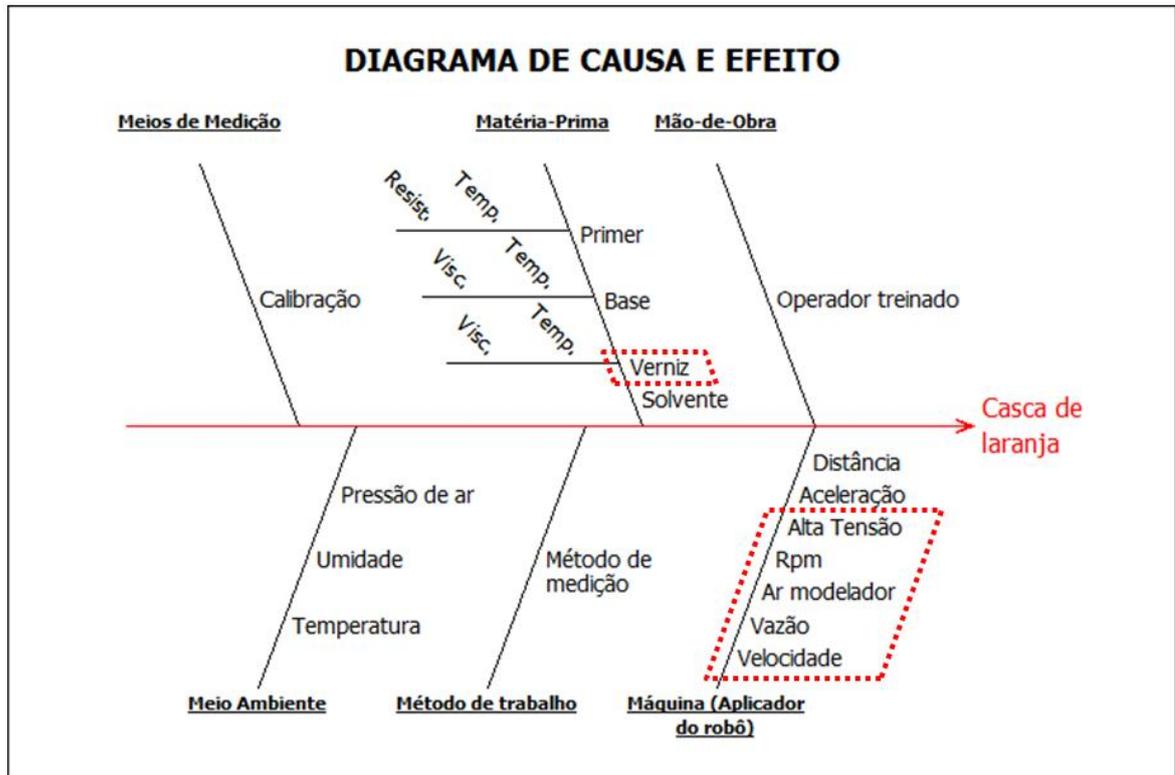


FIGURA 33 – DIAGRAMA DE CAUSA E EFEITO  
 FONTE: O Autor (2015)

#### 4.3.1 Medição

O instrumento medidor da intensidade da casca de laranja, como já foi antes explicado, é o Wave Scan. Esse aparelho capaz de medir a aparência do revestimento de pintura através do cálculo do comprimento de onda, assim como os demais equipamentos da fábrica precisa estar com a calibração em dia. Utilizar esse equipamento com data de calibração vencida representa um risco para o controle de qualidade da empresa e a veracidade dos resultados dos experimentos deste estudo. Portanto, a calibração foi apurada como possível causa da casca de laranja na superfície das peças pintadas e foi classificada como fator suplementar. Ou seja, o fator serviu apenas como registro para que o estudo fosse confiável. Durante o experimento, a calibração do equipamento Wave Scan estava dentro do período de validade.

#### 4.3.2 Matéria-Prima

A variação da matéria-prima, seja por diferença entre lotes ou mesmo por composição de componentes, representa um risco relevante para a característica de qualidade em estudo. Conforme a Figura 33 as matérias-primas envolvidas no processo de pintura são o primer, base, verniz e solvente.

O primer possui algumas características que podem fazê-lo variar na sua composição ou interferir no processo de aplicação como, por exemplo, a resistividade e a temperatura. Ambas podem, portanto, interferir no processo e são controladas periodicamente. A base também possui propriedades que precisam ser controladas, essas são: viscosidade e temperatura. O verniz, da mesma forma que a base, tem a viscosidade como propriedade da sua composição e a temperatura como condição, ambas são periodicamente controladas. O tipo de solvente usado para fazer a diluição do primer, base e verniz também é um componente que pode interferir no processo de pintura.

Depois de analisar todas as características das matérias-primas envolvidas no processo de pintura que poderiam interferir na intensidade da casca de laranja em superfície pintada de para-choques, foi definido entre os técnicos que o experimento se concentraria apenas na operação de aplicação de verniz, ou seja, não haveria aplicações de primer e base. Conforme histórico técnico e a bibliográfica estudada, acredita-se que o verniz seja o maior responsável pela casca de laranja na superfície pintada das peças plásticas. Essa escolha teve como finalidade simplificar o experimento, torná-lo mais ágil e com menor custo, além de evitar a ocupação de espaço na linha de pintura para testes do experimento.

Assim a matéria-prima do verniz e suas características tornaram-se fatores suplementares. Todos os valores referentes a temperatura e viscosidade do verniz foram coletados em cada um dos ensaios do experimento para garantir a repetitividade das condições de pintura. Os valores de viscosidade e temperatura do verniz eram controlados para certificar que eles estivessem dentro da tolerância exigida pelo fornecedor do produto. Qualquer valor fora do especificado invalidaria o ensaio e após os ajustes da matéria-prima o ensaio seria repetido. É válido ressaltar que durante o experimento, foi mantido o mesmo lote de verniz assim como o lote, quantidade e tipo de solvente utilizado para a sua diluição.

#### 4.3.3 Mão-de-Obra

A calibração do equipamento Wave Scan não é suficiente para fazer uma medição correta da intensidade da casca de laranja da peça. Uma mão-de-obra treinada é indispensável para a correta configuração e utilização do aparelho. Por isso, todas as medições dos corpos de prova foram realizadas por técnicos aptos a utilizar o Wave Scan.

#### 4.3.4 Meio Ambiente

Uma cabine de pintura requer várias condições para assegurar um processo de qualidade. Cabines enclausuradas e climatizadas são essenciais para que as condições externas do meio ambiente não interfiram no processo de aplicação.

Conforme o diagrama de causa e efeito, os fatores pressão de ar, umidade e principalmente temperatura interna das cabines foram julgados como suplementares. Segundo a revisão bibliográfica, uma das possíveis causas das peças com casca de laranja é a alta temperatura do ambiente de pintura. Por isso, uma das preocupações do trabalho foi garantir que a temperatura estivesse sempre estável dentro dos níveis de especificação, assim como os outros fatores destacados.

Assim sendo, em cada ensaio do experimento foram registradas a temperatura, umidade e pressão de ar das cabines no momento da aplicação do verniz. Caso algum dos fatores estivesse com níveis fora da tolerância o ensaio seria descartado e assim que as condições estivessem aceitáveis haveria a sua repetição.

#### 4.3.5 Método de Trabalho

Para o controle de qualidade das peças em produção, existe um método de trabalho o qual determina a região de cada para-choque que deve ser medida a casca de laranja. Como alteração da região de medição pode alterar os resultados da medição, o método de trabalho foi apontado como causa de possível variação na característica de qualidade.

Em vista disso, foi elaborado um gabarito para a padronização da região medida dos corpos de prova utilizados no experimento. Assim pode-se garantir a medição através do Wave Scan sempre na mesma região em todas as amostras.

#### 4.3.6 Máquina

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 (*American Society for Testing and Materials (ASTM)*, 2005), as obras de Domnick e Thieme (2006, p. 857), Rupp; Guffey; Jacobsen (2010, p. 150), Ellwood e Braslaw (1998, p. 14) e o histórico técnico adquirido pelos técnicos e engenheiros da linha de pintura, os parâmetros relacionados à aplicação de verniz foram: distância do aplicador para a peça, aceleração, alta tensão, rpm (rotações por minuto), ar modelador, vazão e velocidade. Como a interação entre eles podem garantir ou não a qualidade da pintura, todos foram apontados como fatores que podem interferir na intensidade da casca de laranja da peça.

Porém, durante o *brainstorming*, por decisão dos técnicos, dois dos fatores foram considerados como suplementares, ou seja, apenas serviram de registro. Esses foram à distância de aplicação e a aceleração, que tiveram valores fixos durante todos os ensaios. Já os demais fatores foram selecionados como controláveis, os quais se havia maior interesse de obter a combinação ideal e entender a interação entre eles.

O Quadro 5 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, foi representada a unidade de medida de cada fator. Nas colunas seguintes, cada fator foi mensurado e dividido em três níveis. Os técnicos acharam conveniente estabelecer valores mínimos (nível 1), abaixo dos usados atualmente, e valores máximos (nível 3), acima dos valores usados hoje (nível 2), para aplicação de verniz nas peças. É importante esclarecer que todos os valores de todos os fatores representados no Quadro 5 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.

Como medida de praticidade, durante o trabalho, os fatores rotação por minuto, ar modelador e alta tensão foram chamados de, respectivamente, rpm, ar e tensão. Assim os fatores controláveis selecionados foram: velocidade, vazão, ar, rpm e tensão.

Fatores de controle	Simbologia	Unidade	Nível 1	Nível 2	Nível 3
<b>Velocidade</b>	A	m/s	680	800	920
<b>Vazão</b>	B	ml/min	160	190	220
<b>Ar modelador</b>	C	bar	180	210	240
<b>Rpm</b>	D	Rotação / min	90	110	130
<b>Alta tensão</b>	E	kilovolts	150	180	210

QUADRO 5 – NÍVEIS DOS FATORES CONTROLÁVEIS  
 FONTE: O Autor (2015)

#### 4.4 SELEÇÃO DO ARRANJO ORTOGONAL

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, conforme a Tabela 4. O tipo de arranjo indicado pelas bibliografias foi o  $L_{27}$ , portanto, a matriz do experimento correspondente foi descrita da seguinte forma  $L_{27}(3^5)$ , onde 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 pelas letras alfabéticas (A = velocidade; B = vazão; C = ar; D = rpm; E = tensão), e o algarismo 3 indica a quantidade de níveis de cada fator. A disposição dos níveis de cada fator na Tabela 4 foi determinada pelo software Minitab.

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

TABELA 4 – MATRIZ DE EXPERIMENTOS DO ARRANJO ORTOGONAL TIPO L<sub>27</sub>  
 FONTE: O Autor (2015)

#### 4.5 CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

A condução do experimento foi dividida em duas partes, preparação e execução do experimento. A primeira, explica todo o planejamento e ferramentas que tiveram que ser organizadas antes da realização dos testes do experimento. Já a segunda parte explica em detalhes o passo a passo do experimento na linha de pintura.

#### 4.5.1 Preparação

Antes da condução dos testes, algumas condições da linha de pintura precisavam ser adaptadas para que fosse possível a realização do experimento. Pode-se dividir este 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 uma 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 240 mm de largura por 920 mm de comprimento, conforme Figura 34. Essas peças utilizadas no experimento foram cortadas de um único modelo de para-choque (o modelo de maior volume na linha de pintura) por meio de uma guilhotina. No total, foram utilizados 54 corpos de prova para cumprir todos os ensaios.



FIGURA 34 – CORPO DE PROVA DO EXPERIMENTO  
FONTE: O Autor (2015)

A segunda etapa da preparação envolveu a montagem de uma gancheira de ferro exclusiva para dispor os corpos de prova de forma mais adequada para passarem pelo processo de pintura. A gancheira foi projetada de forma a suportar o máximo de peças possíveis sem 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. A Figura 35 apresenta a gancheira pronta com um corpo de prova localizado na posição intermediária.



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 receber o excesso de produto durante a aplicação na peça superior. As três peças carregadas na gancheira e o isolamento com fita entre elas podem ser visualizados na Figura 36.

A terceira etapa da preparação do experimento só pode ser iniciada a partir do fim da construção da gancheira do corpo de prova, pois só com a gancheira pronta foi possível colocar as peças na linha para começar a programação dos robôs de pintura. O programa de pintura faz uso da linguagem de programação para comandar a trajetória, velocidade, aceleração e parâmetros de aplicação do robô. Para a linha de pintura automatizada da empresa parceira, cada modelo de peça demanda um programa de pintura exclusivo para cada um dos 16 robôs de pintura distribuídos entre os processos: flameado, primer, base e verniz. 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.

Logo, os técnicos desenvolveram um programa para o robô de flambagem de forma que a trajetória do robô fizesse com que a chama do aplicador passasse por toda a superfície da peça.

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 distância de 80 mm entre elas, para cada peça. A Figura 37 ilustra a trajetória do programa do robô de verniz. Como foi dito anteriormente, a distância entre a peça e o aplicador foi fixada, assim como a aceleração do robô. Os demais parâmetros de aplicação podiam ser configurados de forma independente entre as três peças.

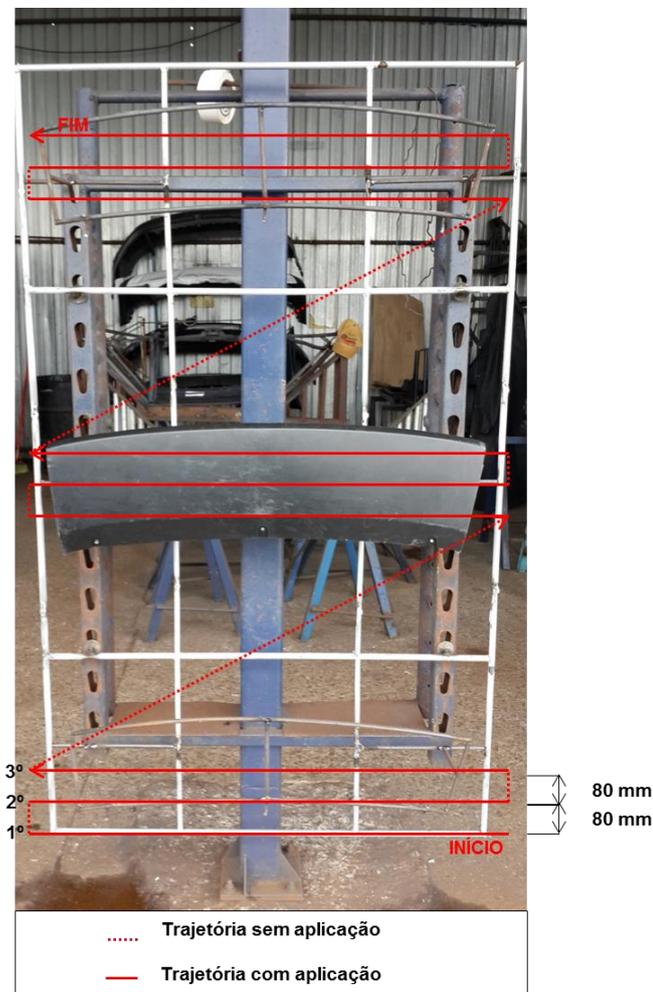
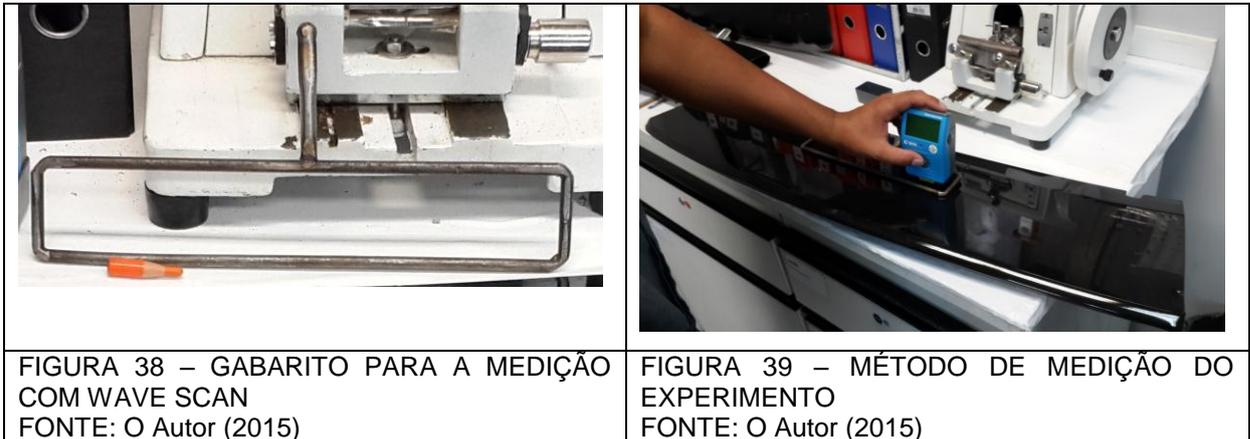


FIGURA 37 – TRAJETÓRIA DO PROGRAMA DO ROBÔ DE VERNIZ  
 FONTE: O Autor (2015)

A quarta e 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 (Figura 38) 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 garantia a medição na mesma região em todas as peças do experimento (Figura 39).



#### 4.5.2 Execução

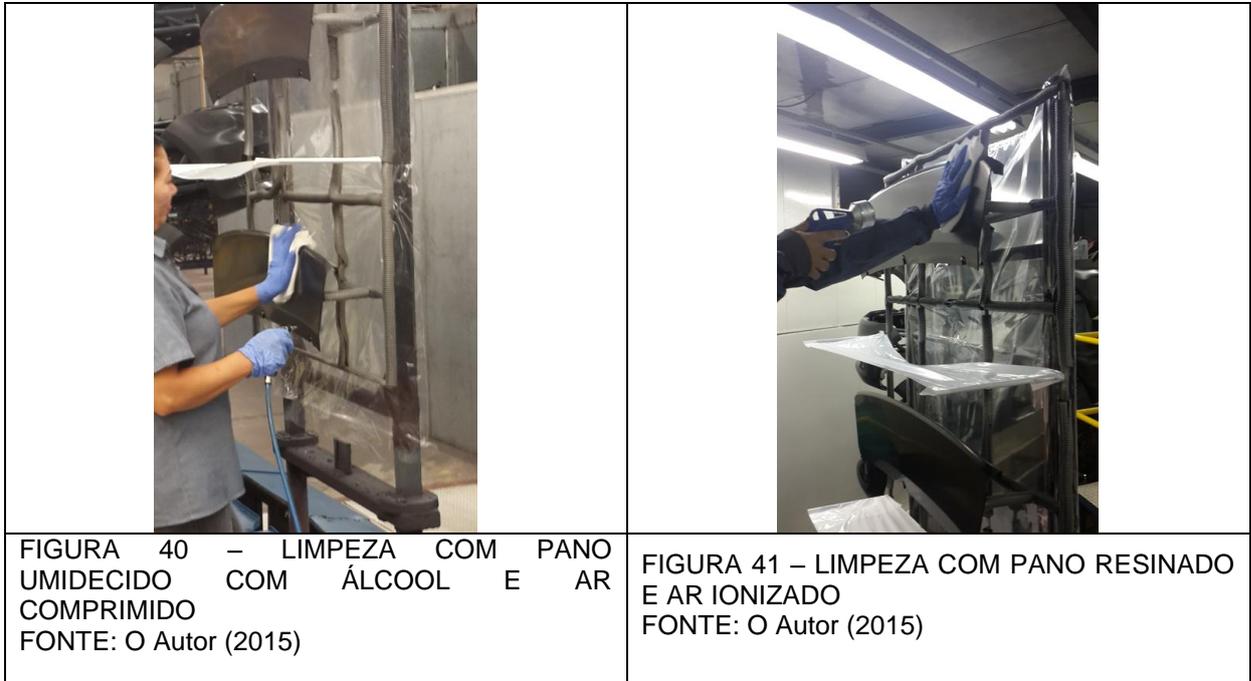
Encerrada todas as etapas de preparação, a fase de execução dos testes foi iniciada. Nessa fase, são descritos todos os procedimentos necessários para que cada um dos ensaios fosse bem sucedido.

Em cada um dos ensaios, o primeiro passo era 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 teste (conforme a Tabela 4), data e número da volta da linha para posterior identificação.

Após a aprovação da inspeção visual, o corpo de prova era armazenado na gancheira exclusivamente desenvolvida 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 era a limpeza com um pano umedecido com álcool e ar comprimido. Logo após as peças eram submetidas à segunda operação, também de limpeza, onde era passado um pano resinado e ar ionizado em toda superfície dos corpos de prova. As operações de limpeza foram ilustradas nas Figuras 40 e 41. Todos os processos até este momento

eram manuais. Nas etapas seguintes as operações seriam totalmente automatizadas.



No próximo momento, os corpos de prova recebiam um tratamento de flambagem por todas suas superfícies. A Figura 42 ilustra a operação automatizada de flambagem.

Logo após a flambagem, os técnicos configuravam os níveis dos parâmetros de aplicação do verniz, estabelecidos na matriz do experimento (Tabela 4), para cada corpo de prova. Portanto, a próxima operação sofrida pelo corpo de prova foi à aplicação da camada de verniz. Na Figura 43 foi ilustrada a operação automatizada de aplicação do verniz nos corpos de prova.

Durante o processo algumas informações eram coletadas para garantir a repetitividade das condições ambientais e da matéria-prima de cada ensaio. Eram anotados os valores referentes à temperatura e viscosidade do verniz, e às condições da cabine de verniz, como, pressão de ar, umidade e temperatura.

Por último, as peças eram submetidas a um forno aquecido durante aproximadamente 40 minutos, responsável pela cura do verniz. O processo completo de pintura para cada teste durava aproximadamente 2 horas.



Após a saída das peças do forno, elas eram retiradas da gancheira e levada ao laboratório para análise. Nesse estágio do experimento, os técnicos do laboratório realizavam a medição do comprimento das ondas superficiais da camada de verniz através do equipamento Wave Scan. Os valores fornecidos pelo equipamento de medição eram então registrados.

Por último, as peças eram armazenadas em local apropriado para uma eventual necessidade de reavaliação.

Após o fim dos procedimentos para a execução dos três testes, era iniciada a preparação para as próximas três peças que entrariam na linha de pintura. A escolha do número do teste (Tabela 4) que entraria no processo de pintura era feito através de um sorteio aleatório.

#### 4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO EXPERIMENTO

Após a realização de todos os vinte e sete 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 5. Os valores dos fatores ruído  $SW_1$  e  $LW_1$  representam a primeira rodada de testes e os números pertencentes ao  $SW_2$  e  $LW_2$  representam a segunda rodada, onde cada ensaio teve uma repetição. Na tabela, os valores destacados em verde representam as condições aceitáveis da intensidade da casca de laranja e os valores coloridos de vermelho representam as condições em não conformidade, de acordo com o Quadro 4.

Como foi visto anteriormente, a razão sinal-ruído S/N no caso menor é melhor (*Lower is Best*) foi o tipo mais indicado para os fatores ruídos LW e SW. Através da Fórmula 10 foi calculada a razão sinal ruído para o fator ruído SW, como foi apresentado na penúltima coluna da Tabela 5, e para o fator ruído LW na última coluna da mesma tabela.

Nº do teste	Nível dos fatores					Fatores de Ruído				Razão S/R (dB) SW	Razão S/R (dB) LW
	A	B	C	D	E	SW <sub>1</sub>	LW <sub>1</sub>	SW <sub>2</sub>	LW <sub>2</sub>		
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

TABELA 5 – SINAL RÚIDO DA MATRIZ DE EXPERIMENTOS TIPO L<sub>27</sub>  
 FONTE: O Autor (2015)

No intuito de analisar os valores adquiridos da intensidade da casca de laranja na Tabela 5, foram dispostos dados estatísticos referentes aos valores do fator ruído SW na Tabela 6. Da mesma forma, a Tabela 7 apresenta os dados estatísticos referentes aos valores do fator ruído LW obtidos na Tabela 5.

	Contagem Numérica	54			Contagem Numérica	54	
	Mínimo	15			Mínimo	4.2	
	Máximo	44.9			Máximo	18.1	
	Média	30.9			Média	8.1	
	Variância	56.9			Variância	9.7	
	Desvio padrão	7.5			Desvio padrão	3.1	
TABELA 6 – DADOS ESTATÍSTICOS SW FONTE: O Autor (2015)				TABELA 7 – DADOS ESTATÍSTICOS LW FONTE: O Autor (2015)			

Sendo assim foram utilizados os valores da Tabela 5 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 é expressa a partir da Tabela 8.

Analysis of Variance for SN ratios

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				

TABELA 8 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA RAZÃO SINAL RUÍDO SW N°1  
 FONTE: MINITAB (2015)

No intuito de fazer uma rápida explicação da estrutura da Tabela 8, 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. O grau de liberdade do fator controlável é calculado pelo número total de níveis que ele possui subtraído pelo grau de liberdade da média, que sempre corresponde ao valor 1. Portanto, no caso do fator velocidade (A) que possui três níveis, o grau de liberdade é obtido pelo seguinte cálculo,  $gl_A = 3 - 1 = 2$ . O grau de liberdade total ( $gl_T$ ) do quadro da análise da variância corresponde ao número total de linhas do arranjo ortogonal escolhido para o experimento, no caso 27, subtraído pelo grau de liberdade da média, assim,  $gl_T = 27 - 1 = 26$ . Já o grau de liberdade do erro residual ( $gl_e$ ) é dado a partir da diferença entre o grau de liberdade total e a somatória dos graus de liberdade de todos os fatores e interações. Dessa forma,  $gl_e = 26 - 26 = 0$ , conforme a fórmula a seguir:

$$gl_e = gl_T - \sum_{i=A}^E gl_i \quad (12)$$

Onde:

$gl_e$  = grau de liberdade do erro residual

$gl_T$  = grau de liberdade total

A terceira coluna (Seq SS) da Tabela 8 apresenta a soma dos quadrados (SQ) de cada fator e interação. Os valores são obtidos através da diferença entre a soma dos quadrados dos valores da razão sinal-ruído ( $\eta$ ) para cada nível fatorial, divididos pelo número de vezes ( $n$ ) em que cada nível aparece nos testes, e a soma dos quadrados dos valores da razão sinal-ruído em relação à média global. A Fórmula 13 demonstra o cálculo da soma dos quadrados do fator velocidade. Sendo  $n_{A_i}$  a representação do número dos corpos de prova utilizados com o nível  $i$ ,  $N$  o número total de testes do experimento e  $\eta_T$  a soma de todos os valores de  $\eta$  obtidos no experimento.

$$SQ_A = \frac{\eta_{A_1}^2}{n_{A_1}} + \frac{\eta_{A_2}^2}{n_{A_2}} + \frac{\eta_{A_3}^2}{n_{A_3}} - \frac{\eta_T^2}{N} \quad (13)$$

Onde:

$SQ_A$  = soma dos quadrados do fator A

$n_{A_i}$  = número dos corpos de prova utilizados com o nível  $i$

$\eta_T$  = soma de todos os valores de  $\eta$  obtidos no experimento

$N$  = o número total de testes do experimento

De forma diferente da apresentada para o cálculo da soma dos quadrados dos fatores, a soma dos quadrados total ( $SQ_T$ ) corresponde à diferença da soma dos quadrados de todos os valores de sinal ruído e a soma dos quadrados em função da média ( $m$ ), assim como indicado na Fórmula 14, onde a média é calculada conforme na Fórmula 15.

$$SQ_T = \sum_{i=1}^n (\eta_i - m)^2 \quad (14)$$

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_i \quad (15)$$

Onde:

$SQ_T$  = soma dos quadrados total

$n$  = número dos corpos de prova utilizados

$\eta$  = razão sinal-ruído

m = média

Após a soma das somas dos quadrados de todos os fatores e interações e da soma dos quadrados total, é possível calcular a soma dos quadrados do erro residual, conforme a Fórmula 16.

$$SQ_e = \sum_{i=A}^E SQ_i - SQ_T \quad (16)$$

Onde:

$SQ_e$  = soma dos quadrados do erro residual

$SQ_T$  = soma dos quadrados total

$SQ_i$  = soma dos quadrados de cada fator

A quarta coluna (*Adj SS*) representa a soma dos quadrados ajustada dos fatores e interação que repete os valores da soma dos quadrados com exceção da soma total dos quadrados.

A coluna seguinte (*Adj SM*) mostra a soma dos quadrados médios (SQM). Os seus valores são obtidos através da divisão da soma dos quadrados (SQ) pelo grau de liberdade (gl). No exemplo do fator velocidade, para chegar ao valor da soma dos quadrados médios, o cálculo é descrito por  $1,9466 \div 2 = 0,97329$ , assim como é demonstrado na Fórmula 17.

$$SQM_A = \frac{SQ_A}{gl_A} \quad (17)$$

Onde:

$SQM_A$  = soma dos quadrados médios do fator A

$SQ_A$  = soma dos quadrados do fator A

$gl_A$  = grau de liberdade do fator A

De forma semelhante, à soma dos quadrados médio do erro residual ( $SQM_e$ ) é calculada de acordo com a Fórmula 18.

$$SQM_e = \frac{SQ_e}{gl_e} \quad (18)$$

Onde:

$SQM_e$  = soma dos quadrados médio do erro residual

$SQ_e$  = soma dos quadrados do erro

$gl_e$  = grau de liberdade do erro

Após a explicação da estrutura da Tabela 8, foi necessário fazer uma análise detalhada dos valores obtidos nela. A partir dos valores das somas dos quadrados foi possível concluir quais fatores eram mais significativos para o experimento. Conforme Tabela 8, a interação entre os fatores ar e tensão (ar\*tensão) mostra-se não significativa, por apresentar valor muito baixo relativo à soma dos quadrados (valor destacado com linha pontilhada vermelha). Então, foi usada a soma dos quadrados dessa interação como resíduo, ou seja, ele será retirado do ajuste. Assim o resíduo terá quatro graus de liberdade e  $SQ_e = SQ_{CxE} = 2.4988$ , conforme pode ser visto na Tabela 9 (valor destacado com linha pontilhada vermelha). É válido destacar que o fator velocidade, na Tabela 8, também apresentou um baixo valor na soma dos quadrados (valor destacado com linha pontilhada verde), 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.

Analysis of Variance for SN ratios

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				

TABELA 9 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA RAZÃO SINAL RUÍDO SW N°2  
 FONTE: MINITAB (2015)

Após compreender a Tabela 8, foi necessária a análise da tabela 9. Nela podem-se visualizar os valores das colunas da razão F e p-valor.

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, temos a Fórmula 19.

$$F_A = \frac{SQM_A}{SQMe} \quad (19)$$

Com base na Tabela 9, 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 à característica da qualidade escolhida. 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 Tabela 9 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 (valores destacados com linhas pontilhadas azuis). O caso do fator controlável tensão e a interação velocidade\*tensão expõem casos de valor-p maior que 0,05, porém muito próximo (valores destacados com linhas pontilhadas azuis). Nesses dois casos foi decidido que os efeitos de ambos são significativos. Outro indício da importância dos fatores, é que as somas dos quadrados dos fatores rpm, tensão e 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 do fator ruído SW. Conforme a Tabela 10, o fator controlável velocidade apresentou um baixo valor na soma dos quadrados (valor destacado com linha pontilhada verde), 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 (valor destacado com linha pontilhada vermelha), ou seja, será usado para acrescentar a soma dos quadros do resíduo. Assim o resíduo terá quatro graus de liberdade e  $SQ_R = SQ_{AR \times TENSÃO} = 4.128$ , conforme a Tabela 11 (valor destacado com linha pontilhada vermelha). 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.

Analysis of Variance for SN ratios

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				

TABELA 10 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA RAZÃO SINAL RUÍDO LW Nº1  
 FONTE: MINITAB (2015)

Analysis of Variance for SN ratios

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				

TABELA 11 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA RAZÃO SINAL RUÍDO LW Nº2  
 FONTE: MINITAB (2015)

Segundo a Tabela 11, 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 (valores destacados com linhas pontilhadas azuis) possuem o valor-p menor que 0,05, o que indica que os seus efeitos são significativos para o fator ruído LW.

#### 4.6.1 Análise das interações entre os fatores do experimento

As informações sobre a análise da variância, contidas nas Tabelas 6 e 7, 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. No objetivo de compreender melhor a relação entre os fatores que compõe cada interação fez-se necessário de 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.

Como foi ilustrado na Figura 44, o gráfico mostra a interação entre as variáveis, velocidade e tensão. No eixo horizontal do gráfico, são apresentados os três níveis do fator velocidade, enquanto no vertical, a média da razão sinal ruído. É possível perceber que quando o fator tensão é igual a 150 kV (linha preta) ou 210 kV (linha verde pontilhada), não há uma variação brusca dos valores da razão sinal ruído. De forma oposta, o comportamento do nível 180 kV do fator tensão (linha vermelha pontilhada), quando os valores da velocidade variam, revela uma diferença significativa nos valores do eixo vertical. Dessa forma, é justificável a interação, pois dependendo do nível do fator tensão, a variação da velocidade interfere na característica de interesse.

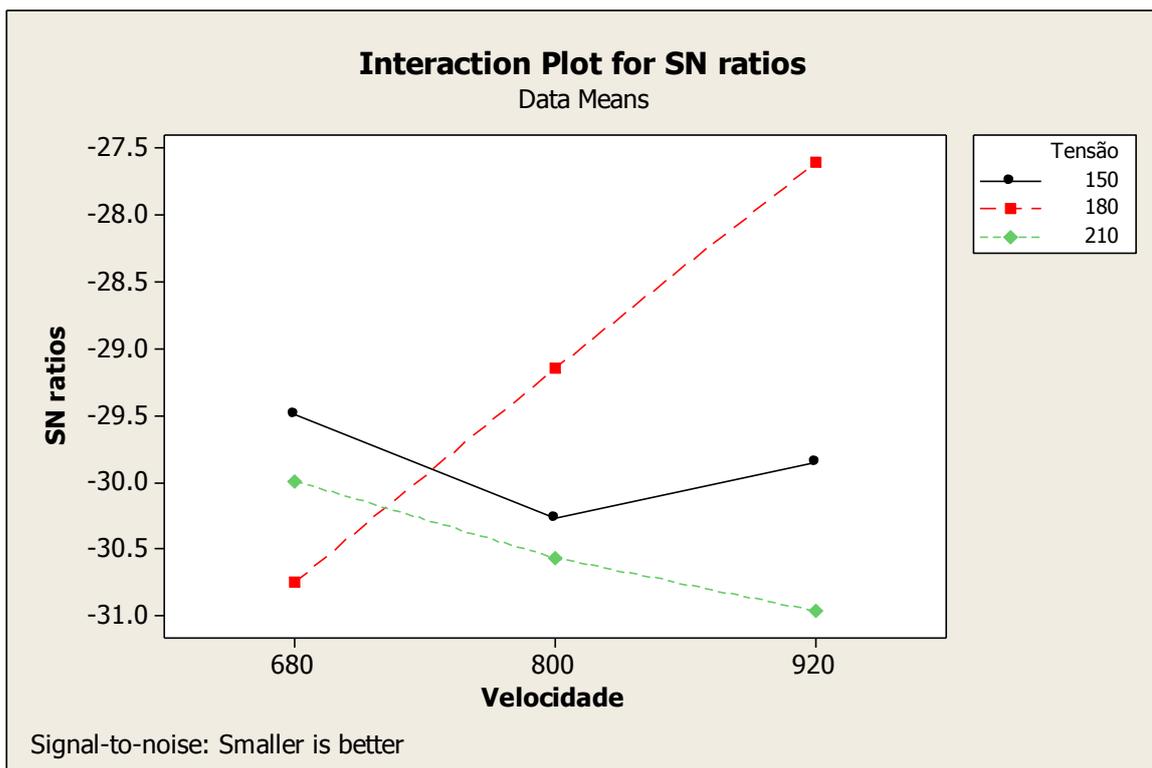


FIGURA 44 – GRÁFICO DE INTERAÇÃO VELOCIDADE\*TENSÃO (SW)  
FONTE: MINITAB (2015)

A Figura 45 ilustra a interação entre os fatores, vazão e tensão. No eixo horizontal estão ordenados os níveis da vazão (160 ml/min, 190 ml/min, 220 ml/min), as linhas coloridas representam os níveis da variável tensão, 150 kV (linha preta), 180 kV (linha vermelha pontilhada) e 210 kV (linha verde pontilhada), e no eixo vertical os valores da média da razão sinal ruído. Na Figura 45 é perceptível a ação negativa do fator vazão quando seu nível é 190 ml/min, em relação à tensão com nível igual a 180 kV. Em contrapartida, a variação da vazão para os níveis mínimos (160 ml/min) e máximos (210 ml/min) revela os melhores valores para a razão sinal ruído quando a tensão é 180 kV. Sendo assim, é possível concluir que existe a interação entre os fatores quando o nível da tensão é 180 kV. No entanto, nos demais níveis (linha preta e linha vermelha pontilhada) a mudança de comportamento da tensão, quando há variação nos níveis da vazão, mostrou-se sutil.

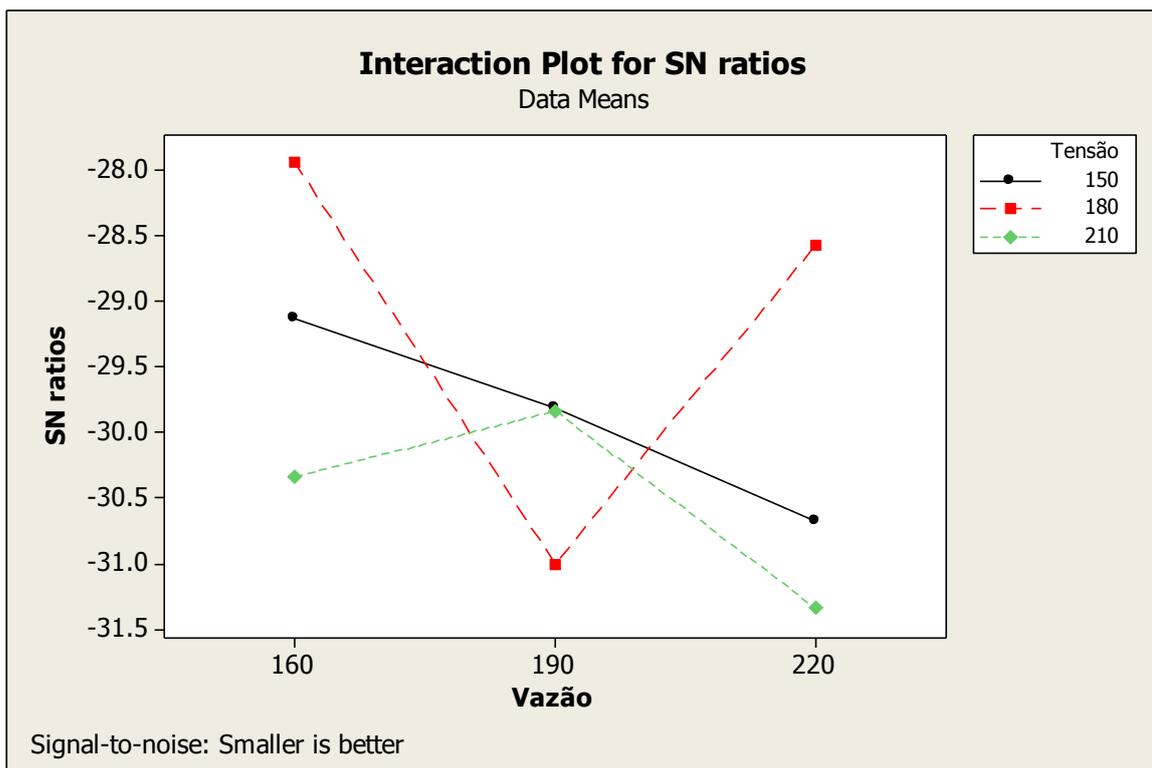


FIGURA 45 – GRÁFICO DE INTERAÇÃO VAZÃO\*TENSÃO (SW)  
FONTE: MINITAB (2015)

Na Figura 46 foi ilustrada a relação entre os fatores, rpm e tensão. O eixo horizontal apresenta os níveis do rpm em relação a média da razão sinal ruído, no eixo vertical, e as linhas coloridas mostram o comportamento dos níveis da tensão. Os níveis da variável tensão, 150 kV (linha preta) e 210 kV (linha verde pontilhada), durante a variação de valor do fator rpm, não apresentam mudanças significativas nos valores da razão. Já no nível 180 kV (linha vermelha pontilhada), a tensão demonstra mudança significativa de comportamento quando o nível do fator rpm passa do valor intermediário 110 rotações/minuto para o valor máximo, 130 rotações/minuto. Essa mudança caracteriza a interação entre as variáveis.

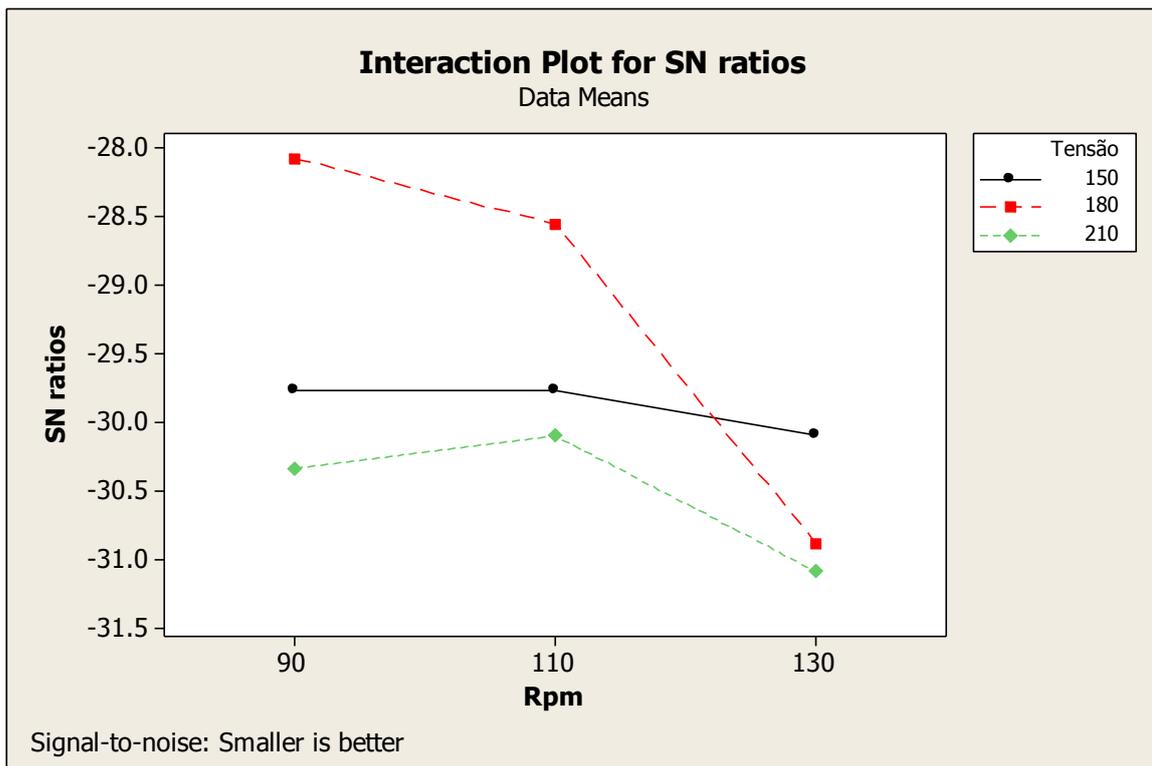


FIGURA 46 – GRÁFICO DE INTERAÇÃO RPM\*TENSÃO (SW)  
FONTE: MINITAB (2015)

Os gráficos de interação também foram aplicados para entender o comportamento dos fatores controláveis em relação aos valores obtidos da razão sinal ruído para o fator ruído LW.

A Figura 47 mostra a relação entre os fatores, velocidade e tensão. No eixo horizontal estão dispostos os níveis da velocidade (680 m/s, 800 m/s, 920 m/s) em relação à média da razão sinal ruído. As linhas coloridas mostram o comportamento dos níveis da tensão: 150 kV (linha preta), 180 kV (linha vermelha pontilhada) e 210 kV (linha verde pontilhada). Na Figura 47 pode-se concluir que há interação entre os fatores, pois há uma mudança considerável nos valores do sinal ruído para a tensão igual a 180 kV que acompanha o aumento dos valores da velocidade.

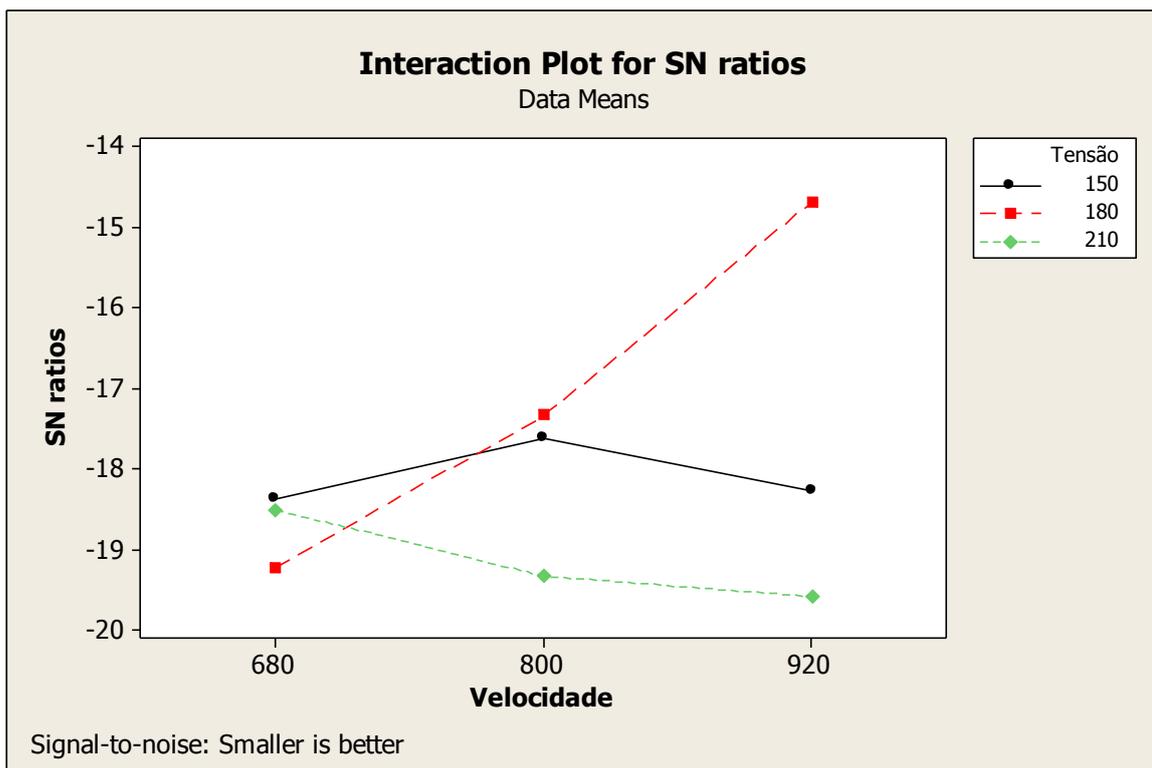


FIGURA 47 – GRÁFICO DE INTERAÇÃO VELOCIDADE\*TENSÃO (LW)  
FONTE: MINITAB (2015)

O gráfico de interação ilustrado pela Figura 48 mostra a relação entre as variáveis, vazão e tensão. A relação de interação entre os dois fatores pode ser percebida, pois todos os níveis da tensão sofrem mudanças consideráveis de valor da média da razão sinal ruído quando há variação dos níveis da vazão.

A Figura 49 ilustra a interação entre os fatores rpm e tensão. Constatou-se a relação de interação entre os fatores, pois dois níveis da tensão sofrem mudanças consideráveis de valor da média da razão sinal ruído quando há variação dos níveis do rpm. Nessa interação há um comportamento similar entre os níveis 180 kV (linha pontilhada vermelha) e 210 kV (linha pontilhada verde) do fator tensão, que com o aumento dos níveis do rpm, alcançam valores das médias da razão sinal ruído cada vez mais negativos.

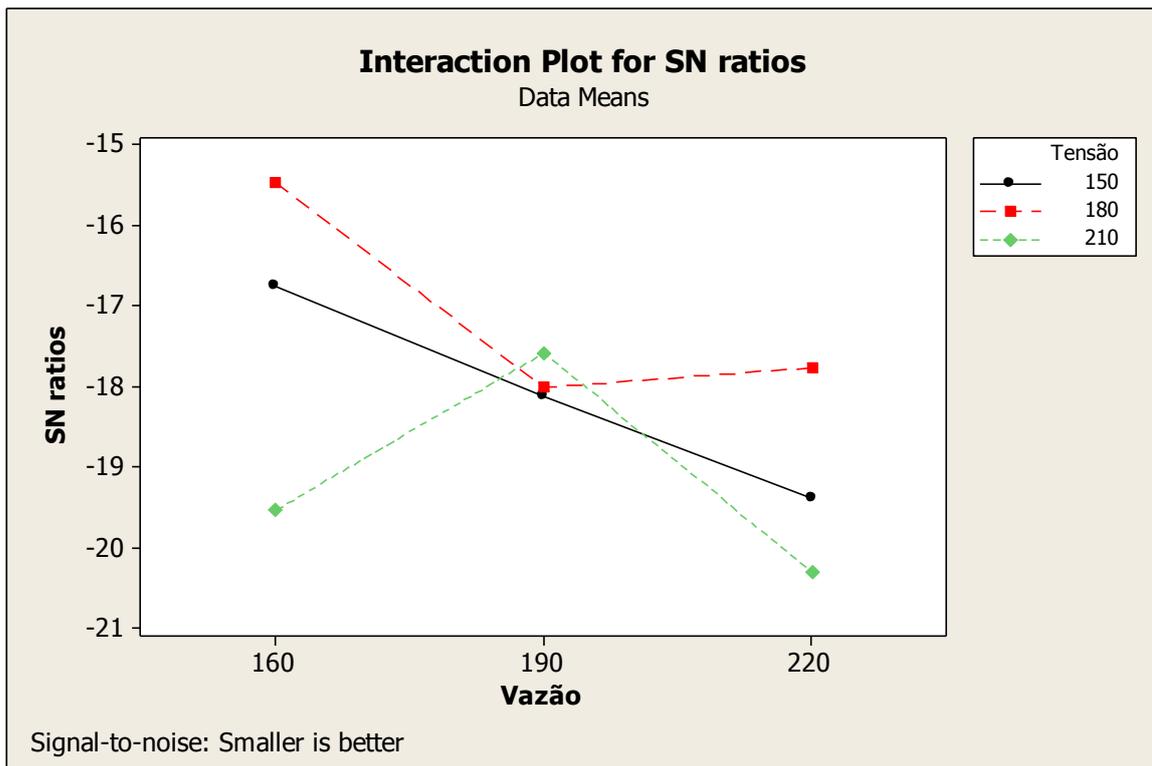


FIGURA 48 – GRÁFICO DE INTERAÇÃO VAZÃO\*TENSÃO (LW)  
FONTE: MINITAB (2015)

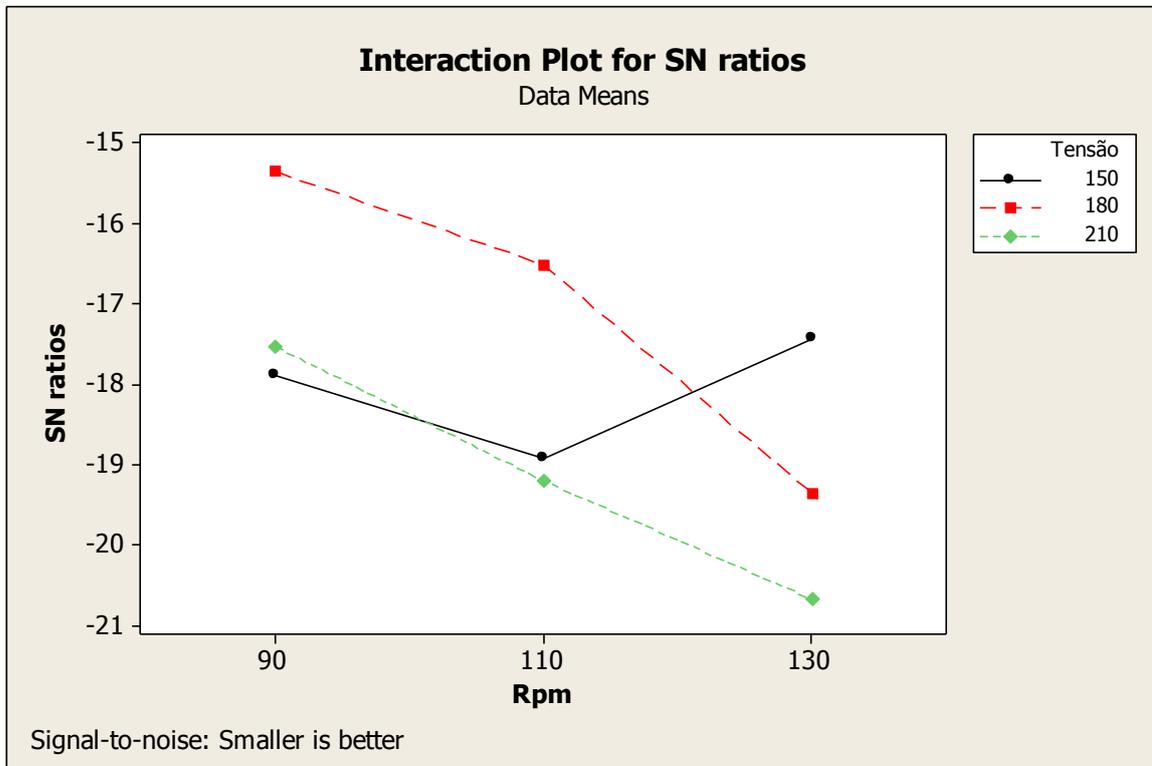


FIGURA 49 – GRÁFICO DE INTERAÇÃO RPM\*TENSÃO (LW)  
FONTE: MINITAB (2015)

#### 4.7 DETERMINAÇÃO DA COMBINAÇÃO ÓTIMA

Dando continuidade a 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.

Baseada nos valores obtidos pelos cálculos da razão sinal ruído SW apresentados na Tabela 5, foi criada a Tabela 12 das médias da razão sinal ruído. Nela os cinco fatores controláveis encontram-se dispostos em colunas, e seus três níveis estão organizados em linhas, onde o nível mais baixo corresponde ao número 1 (*Level 1*), o intermediário ao número 2 (*Level 2*) e o mais alto ao número 3 (*Level 3*). Por exemplo, o valor da coluna do fator velocidade com a linha do *Level 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 12, na linha de referência “Delta”, podemos encontrar os valores resultantes da diferença entre o maior valor e menor valor dos três valores das médias da razão sinal ruído de cada fator controlável. Na coluna do fator velocidade, por exemplo, o maior valor (-29,47 dB), entre os três, subtraído pelo menor valor (-30.08 dB), resulta no valor 0.61 dB. Os valores dessas diferenças servem para classificar os fatores na linha “Rank”, que determina em ordem numérica em qual fator ocorre maior variação da razão sinal ruído. No caso, o valor do fator tensão apresentou maior variação da razão sinal ruído (linha pontilhada verde). Também foi possível constatar que os efeitos dos fatores rpm (linha pontilhada azul) e tensão são aproximadamente duas vezes mais significativos que o efeito do fator velocidade (linha pontilhada vermelha).

Response Table for Signal to Noise Ratios					
Smaller is better					
Level	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
Delta	0.61	1.08	1.13	1.30	1.34
Rank	5	4	3	2	1

TABELA 12 – TABELA DE MÉDIA PARA A RAZÃO SINAL-RUÍDO MENOR É MELHOR (SW)  
 FONTE: MINITAB (2015)

Os dados da Tabela 12 foram utilizados para a criação da Figura 50, a qual ilustra os fatores e as suas respectivas médias da razão sinal ruído. 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 vermelhas na Figura 50. Portanto, a combinação ótima dos níveis de cada fator é: Velocidade = 920 m/s; Vazão = 160 ml/min; Ar = 180 bar; Rpm = 90 rotações/minuto; Tensão = 180 kV. A combinação ótima de SW também pode ser exposta em relação ao Quadro 5, que relaciona cada fator a uma letra e cada nível a um número, da seguinte maneira: A<sub>3</sub>, B<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>, D<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>. Dessa forma é possível perceber que 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.

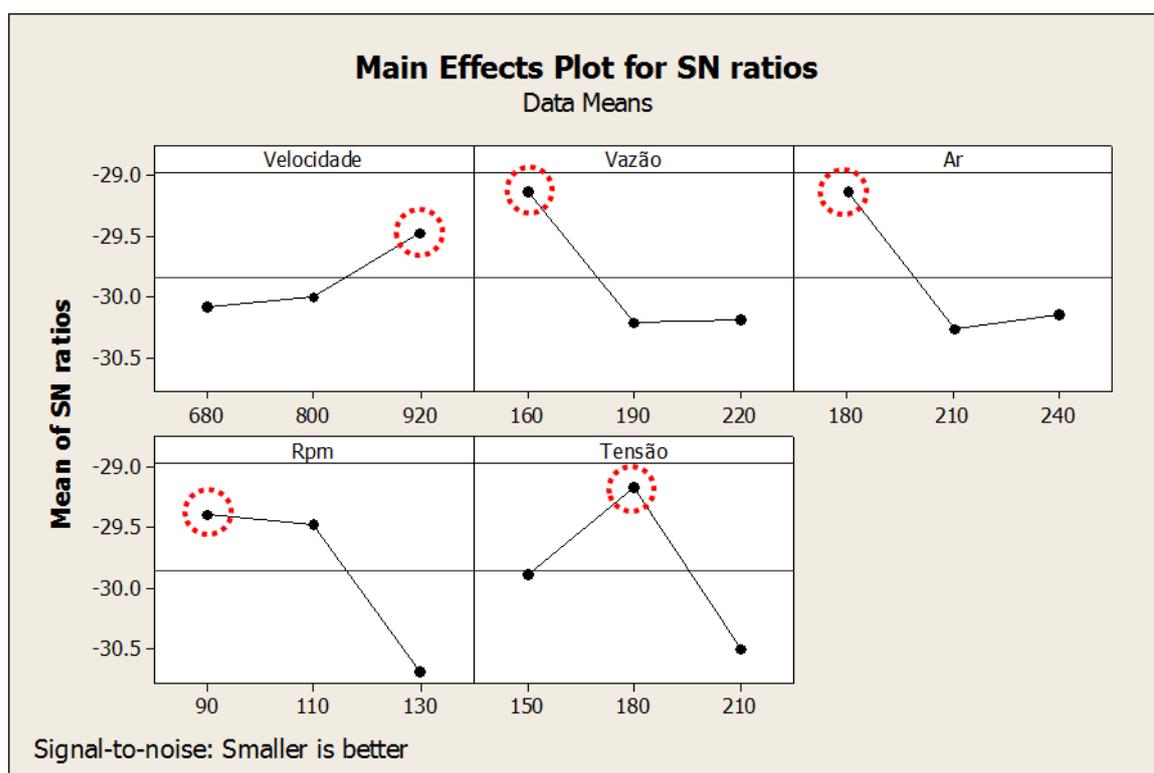


FIGURA 50 – EFEITOS PRINCIPAIS PARA RAZÃO SINAL-RUÍDO MENOR É MELHOR (SW)  
FONTE: MINITAB (2015)

Se tratando do fator ruído LW, a Tabela 13 foi criada baseando-se nos valores obtidos pelos cálculos da razão sinal ruído LW apresentados na Tabela 5. É apresentada na Tabela 13 as médias dos valores da razão sinal ruído. Assim como

a análise feita para o fator ruído SW, na Tabela 13 do fator LW os cinco fatores controláveis encontram-se dispostos em colunas, e seus três níveis estão organizados em linhas, onde o nível mais baixo corresponde ao número 1 (*Level 1*), o intermediário ao número 2 (*Level 2*) e o mais alto ao número 3 (*Level 3*).

Na linha de referência “Delta”, é possível 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. Os valores dessas diferenças servem para classificar na linha “Rank” qual fator ocorre maior variação da razão sinal ruído. Portanto, na análise das médias da razão sinal ruído de LW, o fator ar (linha pontilhada verde) apresenta maior variação em relação aos demais fatores. Também é possível observar que, assim como na Tabela 12 das médias dos valores da razão sinal ruído do fator ruído SW, o fator controlável velocidade (linha pontilhada vermelha) na Tabela 13 apresenta a menor variação entre todos os parâmetros, com efeitos três vezes menos significativos que o fator ar.

Response Table for Signal to Noise Ratios					
Smaller is better					
Level	Velocidade	Vazão	Ar	Rpm	Tensão
1	-18.70	-17.25	-16.64	-16.93	-18.09
2	-18.09	-17.90	-18.01	-18.22	-17.08
3	-17.51	-19.15	-19.65	-19.16	-19.14
Delta	1.19	1.91	3.00	2.23	2.06
Rank	5	4	1	2	3

TABELA 13 – TABELA DE MÉDIA PARA A RAZÃO SINAL-RUÍDO MENOR É MELHOR (LW)  
 FONTE: MINITAB

Da mesma forma em que foi estabelecida a combinação ótima para o fator ruído SW, será determinada para o LW. Através da Figura 51 é possível perceber quais são os níveis de cada fator que maximizam a razão sinal ruído: Velocidade = 920 m/s; Vazão = 160 ml/min; Ar = 180 bar; Rpm = 90 rotações/minuto; Tensão = 180 kV. Ou também na forma: A<sub>3</sub>, B<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>, D<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>.

Assim é possível perceber que 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.

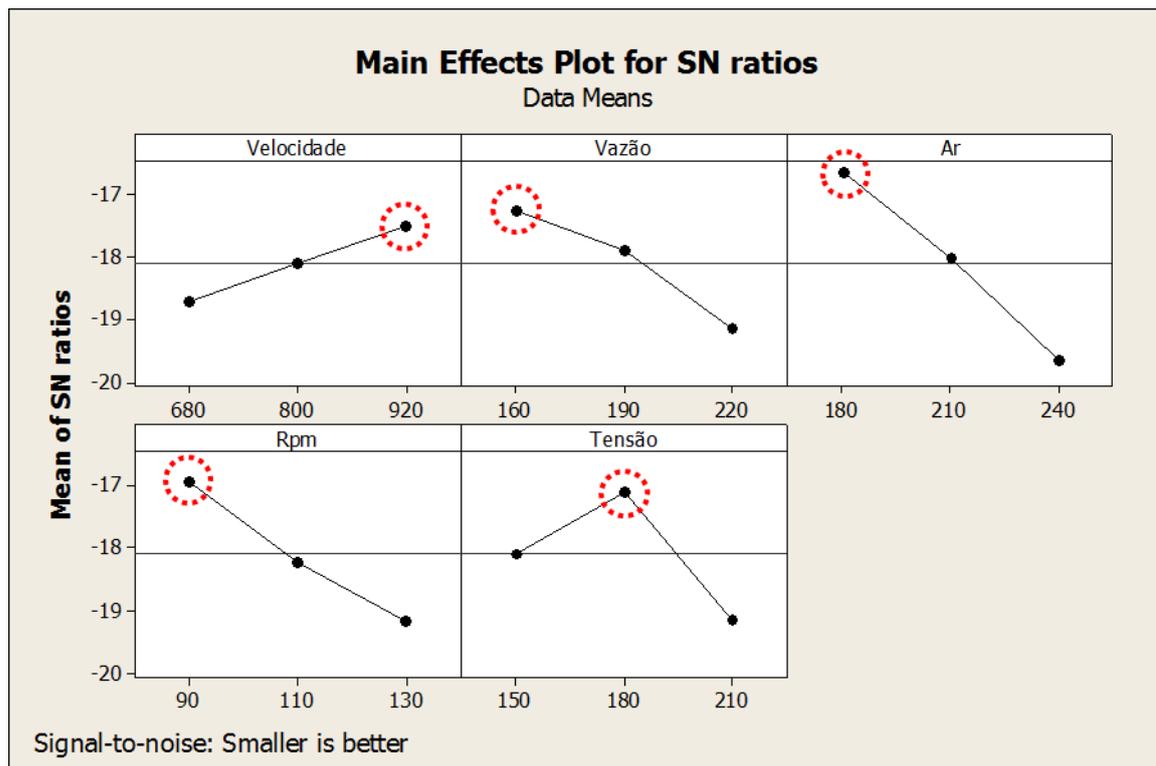


FIGURA 51 – EFEITOS PRINCIPAIS PARA RAZÃO SINAL-RUÍDO MENOR É MELHOR (LW)  
FONTE: MINITAB (2015)

Sendo assim, a combinação ótima dos níveis dos fatores controláveis selecionados para o experimento que atende os fatores ruídos LW e SW é apresentada no Quadro 6.

Fatores de controle	Unidade	Nível Ótimo
<b>Velocidade</b>	m/s	920
<b>Vazão</b>	ml/min	160
<b>Ar</b>	bar	180
<b>Rpm</b>	Rotação / min	90
<b>Tensão</b>	kilovolts	180

QUADRO 6 – COMBINAÇÃO ÓTIMA DOS NÍVEIS DOS FATORES CONTROLÁVEIS  
FONTE: O Autor (2015)

#### 4.8 CONFIRMAÇÃO DA COMBINAÇÃO ÓTIMA

O teste da confirmação da combinação ótima foi aplicado seguindo o mesmo número de repetições do experimento, ou seja, a combinação ótima foi repetida uma única vez. Conforme a Tabela 14, 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. Como pode ser visto na Tabela 14, os valores de SW e LW (destacados com a cor verde) são consideráveis aceitáveis segundo as condições estipuladas no Quadro 4. Os valores alcançados para o comprimento da onda LW, são melhores dos que os obtidos durante todos os testes do experimento. Já para o fator ruído SW, o primeiro valor de 15.2mm na coluna do  $SW_1$ , mesmo sendo aceitável, é superior ao menor valor do experimento obtido no teste de número 20 da Tabela 5. No entanto, o segundo valor de SW, 14.8mm, 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.

Nº do teste	Nível dos fatores					Fatores de Ruído			
	A	B	C	D	E	$SW_1$	$LW_1$	$SW_2$	$LW_2$
<b>Combinação ótima</b>	920	160	180	90	180	15.2	4.1	14.8	4.1

TABELA 14 – CONFIRMAÇÃO DA COMBINAÇÃO ÓTIMA  
 FONTE: O autor (2015)

O término da última etapa, confirmação da combinação ótima, determinou o fim da metodologia do projeto robusto aplicada no trabalho. Durante o capítulo de resultados e discussões foram apresentados todos os dados obtidos em cada uma das etapas do método. Esses dados geraram resultados e deram embasamento para que conclusões pudessem ser inferidas no capítulo seguinte.

## 5 CONCLUSÃO

Este capítulo visa apresentar as principais considerações elaboradas a partir dos resultados obtidos no desenvolvimento da pesquisa de modo a contribuir com o meio científico e a empresa parceira.

### 5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A realização da pesquisa na empresa parceira dependeu de um aprofundado entendimento sobre o processo de produção dos para-choques. Isso foi possível porque o pesquisador pertence ao quadro de funcionários na referida organização e atua diretamente no setor de pintura.

A análise das normas que normatizam a pintura automotiva foi pré-requisito do trabalho para possibilitar a realização do experimento. As normas ASTM D3451 (ASTM, 2001) e D5286 (ASTM, 2005) além de contribuírem para o capítulo de referência bibliográfica com as definições de problemas de pintura, também foram determinantes para a escolha dos fatores controláveis que conduziram o 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 à risca 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 tal, 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 almeja 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: a 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, possuiu 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. Neste caso os fatores e interações não significativos foram: velocidade, ar\*tensão, vazão\*tensão e rpm\*tensão.

Ao final do trabalho conclui-se que o objetivo geral proposto, de identificar os fatores de aplicação do verniz que interferem na intensidade da casca de laranja em

superfícies de para-choques pintados e propor uma combinação ótima dos fatores através da metodologia do projeto robusto, foi atingido.

## 5.2 CONTRIBUIÇÃO À EMPRESA PARCEIRA

Dentre os benefícios que trabalho desenvolvido trouxe para a empresa estudada pode-se destacar o conhecimento agregado através do confronto de pressupostos existentes entre os técnicos e os resultados obtidos no experimento. Por exemplo, os técnicos da empresa pressupunham que a correção de problemas pontuais em superfícies com alta intensidade da casca de laranja na linha tinha que ser feita a partir da redução da velocidade de aplicação e aumento da vazão, ou seja, deposição de maior quantidade de verniz na peça. No entanto, para o fator SW, por exemplo, os dados obtidos com o experimento mostraram que alterações isoladas nos níveis da velocidade ou vazão não surtem efeito na intensidade da casca de laranja. A velocidade e vazão só resultarão em uma superfície pintada com comprimento de onda aceitável se os valores da tensão estiverem de acordo com o ideal. Já para o fator ruído LW, alterações isoladas no fator vazão podem sim gerar efeitos significativos na casca de laranja, afirmação que não é válida para a variável velocidade. Além de tudo isso, os níveis encontrados na combinação ótima revelam o contrário do que os técnicos pensavam. A deposição da maior quantidade possível de verniz não significa melhores resultados para a casca de laranja, pois a combinação ideal determinou o valor mais baixo para a vazão e mais alto para a velocidade de aplicação.

Era consenso também entre os técnicos que o fator ar contribuía para o alastramento do verniz e, portanto, seria fator significativo para interferir na intensidade da casca de laranja. Esse pressuposto foi confirmado no experimento. No fator LW, o fator que se revelou mais significativo dentre todos os outros foi o ar.

Outro benefício do estudo à empresa, que deve ser enfatizado, é a oportunidade dos técnicos de utilizar a combinação ótima e o conhecimento das interações entre os fatores para realizar melhorias na aplicação do verniz nos diversos modelos de para-choques que são pintados na linha de pintura automática. E com isso diminuir a ocorrência de para-choques com alta intensidade da casca de laranja e aperfeiçoar o fluxo produtivo da linha de pintura.

### 5.3 CONTRIBUIÇÃO PARA A ACADEMIA

Sob a ótica da contribuição do trabalho para a academia, pode-se concluir que o sucesso da aplicação do projeto robusto no presente estudo reforça a eficácia do método.

A parceria estabelecida com a empresa durante o trabalho possibilitou retratar para o ambiente acadêmico as dificuldades existentes na indústria em relação à investigação de problemas do processo. Portanto, a pesquisa comprovou a importância da interação entre a aplicação das técnicas estatísticas e a realidade produtiva da indústria, para a melhoria de processos.

Por fim, o trabalho contribuiu com o ambiente acadêmico que trata da pintura automotiva, pois oferta mais um exemplo que enriquece e auxilia novas pesquisas no setor.

### 5.4 TRABALHOS FUTUROS

A investigação do trabalho referente a um problema existente no setor da pintura automotiva abre caminhos para a continuidade de pesquisas que visem à melhoria desse processo.

Trabalhos futuros podem explorar:

- A interferência das camadas precedentes do verniz na ocorrência de casca de laranja nas superfícies de para-choques pintados.
- A identificação dos fatores de aplicação do primer e base que interferem na intensidade da casca de laranja na superfície de para-choques pintados.
- A identificação dos fatores referentes à preparação matéria-prima do primer, base e verniz, que interferem na intensidade da casca de laranja na superfície de para-choques pintados.

## 6 REFERÊNCIAS

ADAMSONS, K. *Chemical surface characterization and depth profiling of automotive coating systems. Progress in polymer science. DuPont Automotive. Philadelphia. Estados Unidos. v.25. p. 1363-1409. 2000.*

ADAMSONS, K. *A modern analytical toolbox: defect. (W&D) studies of automotive coating systems, including depth profiling studies. J. Coat Technol. Res. v. 9. p. 745 – 756. 2012.*

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 3451**: *Testing coating powders and powder coatings. section 33.8: Surface profile. United States, 2001.*

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **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. United States, 2005.*

ARVIDSSON, M; GREMYR, I. Principles of Robust Design Methodology. **Quality and reliability engineering international. v. 24. p. 23-35. 2008.**

ARINEZ, J.; BILLER, S.; MEERKOV, S. M.; ZHANG, L. *Quality/Quantity Improvement in an Automotive Paint Shop: A Case Study. IEEE Transactions on automation science and engineering. v. 7. n°4. p. 755-761. 2010.*

Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA). **Relatório Técnico anual 2014**: versão internet. Disponível em: < <http://www.anfavea.com.br/anuario.html> > Acesso em: 29/03/2015.

BABEL, G. *On-line coating of plastic parts in the automotive industry. Progres in Organic Coatings. v. 20. p. 223-234.1992.*

BARLETTA, M.; GISARIO, A.; TAGLIAFERRI, V. *Electrostatic spray deposition (ESD) of polymeric powders on thermoplastic (PA66) substrate. Surface & Coatings Technology. v. 201. p. 296-308. 2006.*

BERNARDIN, A. M. **Delineamento de experimentos utilizando as técnicas de Taguchi para formulação de massa cerâmica.** Dissertação submetida à Univesidade Federal de Santa Catarina para obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica. Florianópolis. 1994.

BORGNE, R. L.; FEILLARD, P. *End-of-Life of a Polypropylene Bumper Skin. LCA. PSA Peugeot-Citroen. Division of Research and Automobile Innovation. França. v.6. p. 167-176. 2001.*

BRADY, P. *Development in automotive plascits. Reinforced Plastics. Society of Plastics Engineers. Novembro. 2008.*

BRINCKMANN, F.; STEPHAN, P. *Experimental investigation of the drying process of water-based paints used in automotive industry*. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**. Institute of Technical Thermodynamics. Alemanha. v. 50. p. 489-494. 2011.

BYK. **Orange Peel / DOI Meters**. versão internet. Disponível em: <<https://www.byk.com/en/instruments/products/appearance-measurement/orange-peel-doi-meter.html>> Acesso em: 18/05/2015.

CARVALHO, P. R. W. **Controle de Qualidade na Pintura Industrial**. Monografia apresentada ao curso de especialização em Engenharia de Manutenção Mecânica. UFPR/IEP. Curitiba – PR. 1993.

CAULY, F. Crise no setor automotivo não afugenta montadoras. **Carta Capital**, 13 de março de 2015. Disponível em: <http://www.cartacapital.com.br/economia/crise-no-setor-automotivo-nao-afugenta-montadoras-6532.html>. Acesso em: 29/03/2015.

CHEN, C. C.; CHUANG, M. C. *Integrating the Kano model into a robust design approach to enhance customer satisfaction with product design*. **International Journal of Production Economics**. n° 114. p. 667– 681. 2008.

CHIAVENATO, I. **Introdução a teoria geral da administração**. Rio de Janeiro. 2004.

COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle estatístico de qualidade**. v. 2. São Paulo. Atlas. 2005.

COSTA, I.; QUEIROZ, S. R. R. Autopeças no Brasil: mudanças e competitividade na década de noventa. **Revista Administração**. v.35, n°3. p. 27-37. 2000.

CRIPPA, A. **Estudo do desempenho de filmes multicamadas em embalagens termoformadas**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Curitiba. 2006.

DAIYAN, H.; ANDREASSEN, E.; GRYTEN, F.; LYNGSTAD, O. V.; LUKSP, T.; OSNES, H. *Low-velocity impact response of injection-moulded polypropylene plates – Part 1: Effects of plate thickness, impact velocity and temperature*. **Polymer Testing**. University of Oslo. Noruega. v. 29. p. 648-657. 2010.

DENG, K.; FELORZABIHI, N.; WINNIK, M. M.; JIANG, Z.; YIN, Z.; LIU, Y.; YANEF, P. V.; RYNTZ, R. A. *Influence of position and composition on adhesion to injection-molded TPO plates as model automotive parts*. **Polymer**. China; Canadá; Estados Unidos. v. 50. p. 5084-5093. 2009.

DOMENICO, J. D.; HENSHAW. P. *The effects of basecoat bell application parameters on elements of appearance for an automotive coatings process*. **Journal of Coating technology**. p. 675-686. University of Windsor/Chrysler Canada Inc. Automotive. Windsor. Canadá. 2012.

DOMNICK, J.; SCHEIBE, A.; YE. *The simulation of electrostatic spray painting process with high-speed rotary bell atomizers. Part II: External Charging*. **Particle and Particle System Characterization**. v. 23. p. 408-416. 2006.

DOMNICK, J.; THIEME, M. *Atomization characteristics of high-speed rotary bell atomizers. **Atomization and Sprays***. v. 16. p. 857-874. 2006.

DRAIN, D. **Statistical methods for industrial process control**. Chapman & Hall. 1998.

DRUMOND, F. B.; WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. **Análise de variância: Comparação de várias situações**. v. 6. Belo Horizonte. 1996.

DUNCAN, A. J. **Quality control and Industrial Statistics**. 1974.

ELLWOOD, K. R. J.; BRASLAW, J. *A finite-element model for an electrostatic bell sprayer. **Journal of Electrostatics***. Material Science Department. Ford research Laboratory. Dearborn - USA. v. 45. p. 1-23. 1998.

ENDREGAARD, E. A. *Paint Robotics – Improving Automotive Painting Performance. **Metal Finishing***. Maio. p. 8-13. 2002.

ERNST, E.; REUßNER, J.; POELT, P.; INGOLIC, E. *Surface Stability of Polypropylene Compounds and Paint Adhesion. **Journal of Applied Polymer Science***. Graz University of Technology. Graz – Austria. v. 97. p. 797-805. 2005.

FAZANO, C. A. T. V. **Tintas: Método de controle de pinturas e superfícies**. Editora Hemus. 6ª edição. Curitiba-PR. 2002.

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

FUJII, M.; KAWANO, S.; FUJINO, H. *Benchmark problem for crush analysis of plastic parts for automotive. **JSAE Review***. Society of Automotive Engineers of Japan. Japão. v.22. p. 23-27. 2000.

GARBASSI, F.; MORRA, M.; OCCHIELLO, E. *Polymer surfaces from physics technology. **International Journal of Adhesion and adhesives***. 1998.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4. ed. São Paulo. 2002.

GROHMANN, U. *Paint robots in the automotive industry – process and cost optimization. **Industrial Robot***. v. 23, nº5. p. 11-16. Alemanha. 1996.

HONGSHEN, Z.; MING, C. *Inventory Analysis on the Effect of End-of-Life Passenger Vehicle Plastic Bumper Recycling in China. **Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology***. School of Mechanical Engineering. Shanghai Jiao Tong University. Shanghai. China.. v. 29, nº1. p. 21-38. 2013.

JUNG, C. K.; BAE, L. S.; LEE, S. B.; CHO, J. H.; SHIN, E. S.; CHOI, S. C.; BOO, J. H. *Development of painting technology using plasma surface technology for automobile parts. **Thin Solid Films***. p. 316-322. 2006.

JURGETZ, A. *Automotive Paint Performance*. **Metal Finishing**. Dingolfing-Alemanha. p. 53-55.1995.

KIM, K. D; HAN, D. N; KIM, H. T. *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**. Chemical Engineering. Hanyang University. South Korea. v. 104. p. 55-61. 2004.

KMETTY, À.; BÁRÁNY. T.; KOCSIS, J, K. *Injection moulded all-polypropylene composites composed of polypropylene fibre and polypropylene based thermoplastic elastomer*. ELSEVIER. **Composites Science and Technology**. University of Technology and Economy. Budapest. Hungria. v.73. p. 72-80. 2012.

KUMAR, A.; MOTWANI, J.; OTERO, L. *Na application of Taguchi's robust experimental design technique to improve service performance*. **International Journal of Quality & Reliability Management**. Grand Valley State University. Michigan – USA. v. 13. n° 4. p. 85-98. 1996.

LAI, H. H; CHANG, Y. M; CHANG, H. C. *A robust design approach for enhancing the feeling quality of a product: a car profile case study*. **International Journal of Industrial Ergonomics**. National Cheng Kung University. Taiwan. v. 35. p. 445-460. 2005.

LIU, G.; Qiu, G. *Study on the mechanical and morphological properties of toughened polypropylene blends for automobile*. Springer. **Polym. Bull**. Qingdao University of Science and Technology. Qingdao-China. v. 70. p. 849-857. 2012.

MARK, A.; ANDERSSON, B.; TAFUR, S.; ENGSTROM, K.; SOROD, H.; EDELVIK, F.; CARLSON, J. S. **Atomization and Sprays**. Sweden. v. 23. p. 25-45. 2013.

MICHAELI, W.; GREIF, H.; KAUFMANN, H.; VOSSEBURGER, F. J. **Tecnologia dos Plásticos**. Editora Edgarg Blucher Ltda. 1995.

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. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão das Operações**. Rio de Janeiro. Elsevier. 2010.

MIRRHA, M. Pinceladas de Otimismo. **Revista Tratamento de Superfície**. n°181. 2013.

MONKS, J. G. **Administração da produção**. São Paulo. Editora McGraw-Hill Ltda. 1987.

MONTGOMERY, D. C; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. Rio de Janeiro. LTC. 2012.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 6. Ed. Hoboken-NJ. John Wiley & Sons. 2005..

MORAES, M. A. **Melhoria no fluxo de informações de um processo de pintura da indústria automobilística**. Projeto Técnico apresentado como requisito parcial a obtenção de grau de especialista no Cursos de Especialização em Gestão da Qualidade da Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2010.

MORI, T. **The new experimental design : Taguchi's approach to quality engineering**. Michigan. ASI Press. 1990.

MOURA, R. Novas cores já ameaçam reinado de carros preto e prata. **Folha de S.Paulo**. 23/01/2011. Caderno Mercado. Disponível em <<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/864695-novas-cores-ja-ameacam-reinado-de-carros-preto-e-prata.shtml>>. Acesso em: 21/04/2014.

MUHAMMAD, N.; MANURUNG, Y. H. P.; JAAFAR, R.; ABAS, S. K.; THAM, G.; HARUMAN, E. *Model development for quality features of resistance spot welding using multi-objective Taguchi method and response surface methodology*. **Journal Intell Manufacture**. Malásia. MARA Univesity of Technology. v. 24. p. 1175-1183. 2013.

NAJJAR, D.; BIGERELLE, M.; HENNEBELLE, F.; IOST, A. *Contribution of statistical methods to the study of worn paint coatings surface topography*. **Surface & Coatings Technology**. França. v. 200. p. 6088-6100. 2005.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Editora Bookman. 4ª edição. Porto Alegre – RS. 2010.

PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia: Microestrutura e Propriedades**. Editora Hemus. Curitiba-PR. 2000.

PEACOCK, E.; JURAS, P. *Alternative costing methods: Precision Paint Shop's Dilemma*. **Strategic Finance**. Agosto. 2006.

PETRY, A. **Mercado brasileiro de polipropileno com ênfase no setor automobilístico**. Trabalho ode Conclusão de Curso. UFRGS. Departamento de Engenharia Química. Porto Alegre. Julho. 2011.

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.

PIJPERS, A. P.; MEIER, R. J. *Adhesion behaviour of polypropylenes after flame treatment determined by XPS (ESCA) spectral analysis*. **Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena**. Holanda. v.121. p. 299-313. 2001.

PRIMIERY, R. I.; GUIMARÃES, J. C. F.; MOSCHEN, A. R.; DORION, E. C. H.; MARTINI, A. **Melhoria da Qualidade de Pintura em uma Empresa Montadora de Veículos Comerciais: uma abordagem Seis Sigma**. **II Simpósio Científico FTSG**. Bento Gonçalves-RS. 2012.

ROSATO, D. V.; ROSATO, M. G; ROSATO, D. V. **Concise Encyclopedia of Plastics**. Klumer Academy Publishers. p. 284. 2000.

ROSS, J. P. **Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade**. Editora McGraw-Hill Ltda. São Paulo. 1991.

RUMZAN, I.; WILLIAMS, J. B. *Compressive stress-strain properties of automotive paints over a range of strain rates and temperatures*. **Polymer**. Department of Mechanical Engineering. Londres. v. 41. p. 4291-4307. 2000.

RUPP, J.; GUFFEY, E.; JACOBSEN, G. *Electrostatic spray processes*. **Metal Finishing**. v. 108. p.150-163. Ohio. 2010.

SAMOHYL, R. W. **Controle Estatístico da Qualidade**. Rio de Janeiro. 2009.

SANCHEZ, S. M.; SANCHEZ, P. J.; RAMBERG, J. S.; MOEENI, F. *Effective Engineering Design through Simulation*. **Int. Trans. Opl. Res.** v. 3. n°2. p. 169-185. University of Missouri. USA.1996.

SILVA , A. F. **Estudo comparativo da tecnologia de pintura em para-choques empregada na indústria automobilística vs o sistema utilizado nas oficinas de funilaria e pintura**. São Paulo. 2011.

TAGUCHI, G.; ELSAYED, E. A.; HSIANG, C. T. **Engenharia da qualidade em sistemas de produção**. São Paulo. McGraw-Hill. 1990.

THIOLLENT, M. **Metodologia da pesquisa-ação**. São Paulo. Cortez. 2005.

VACARESCU, C. F.; VACARESCU, V. *The Taguchi's quality loss function in development and design for bulk goods in the automotive field*. **Annals of DAAAM International**. Vienna – Austria. v. 21. p. 9-10. 2010.

VANALLE, R. M.; SALLES, J. A. A. *Relação entre montadoras e fornecedores: modelos teóricos e estudos de caso da indústria automobilística brasileira*. **Gestão da Produção**. v.18, n°2. p 237-250. São Carlos. 2011.

VIEIRA, S. **Análise da variância: (Anova)**. São Paulo. Atlas. 2006.

WEISS, K, D. *Paint and Coatings: A mature industry in transition*. **Progress in Polymer Science**. Russel J. Gray Technogical Center. Minneapolis-Estados Unidos. v.22. p.203-245. 1997.

WIEMES, L. **Minimização de resíduos no processo de pintura da indústria automotiva**. Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2003.

WU, D. H.; CHEN, H. H. *Application of Taguchi Robust Design Method to SAW Mass Sensing Device*. **IEEE Transations on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control**. v. 52. n° 12. p. 2403-2410. Dezembro. 2005.

