

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta
Dissertação será disponibilizado
somente a partir de 24/09/2027

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

JULIANA TIYOKO YOSHIOKA COELHO

**MELHORIA DE UM PROCESSO DE PINTURA AUTOMOTIVA USANDO
PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS**

Guaratinguetá
2025



JULIANA TIYOKO YOSHIOKA COELHO

**MELHORIA DE UM PROCESSO DE PINTURA AUTOMOTIVA USANDO
PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciência, Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestra em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Gestão da Produção

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Gislaine Cristina Batistela

Coorientador: Prof. Dr. João Batista Turrioni

Guaratinguetá

2025

S586e	Coelho, Juliana Tiyoko Yoshioka Melhoria de um processo de pintura automotiva usando planejamento de experimentos / Juliana Tiyoko Yoshioka Coelho - Guaratinguetá, 2025. 164 f : il. Bibliografia: f. 112-116 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2026. Orientadora: Profª. Drª. Gislaine Cristina Batistela Coorientador: Prof. Dr. João Batista Turroni 1. Planejamento experimental. 2. Automóveis - Pintura. 3. Gestão da qualidade total. I. Título. CDU 658.56(043)
-------	---

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A presente pesquisa, ao aplicar o planejamento de experimentos (*Design of Experiments* - DOE) no processo de pintura automotiva, demonstrou um impacto técnico e científico significativo, com resultados práticos mensuráveis em ambiente real de produção. A utilização estruturada do DOE e da análise de variância (ANOVA) permitiu a identificação das variáveis críticas do processo, culminando na definição de novos parâmetros operacionais que reduziram 61 gramas por veículo de uma massa de alta viscosidade, no processo automatizado de selagem do assoalho externo, sem prejuízo da qualidade final. Esse ganho evidencia o potencial do método como ferramenta de engenharia aplicada à melhoria contínua e à tomada de decisão baseada em dados. Do ponto de vista industrial, a implementação do experimento diretamente na linha produtiva, viabilizada pelo desenvolvimento de um método de medição específico, reforça a viabilidade operacional da abordagem, consolidando um modelo replicável para outras etapas ou áreas da manufatura. Esta ação resultou na redução no consumo de material através do ajuste das variáveis operacionais, maior padronização do produto e consequentemente, aumento na eficiência energética, fortalecendo a competitividade da empresa no mercado global. Sob a perspectiva ambiental e social, a racionalização do processo de pintura contribui para a minimização de desperdícios, redução da geração de resíduos e do consumo de recursos naturais, alinhando-se aos princípios do desenvolvimento sustentável. A melhoria na qualidade do produto também impacta positivamente a satisfação dos consumidores e a durabilidade e segurança dos veículos, gerando benefícios tangíveis à sociedade. Por fim, a pesquisa se destaca também pelo seu potencial educativo e institucional. O estudo serve como referência prática para programas de engenharia e gestão industrial, ao demonstrar como ferramentas estatísticas podem ser integradas à realidade fabril com resultados concretos. Além disso, promove uma mentalidade de inovação, análise crítica e melhoria contínua, tanto no ambiente acadêmico quanto nas organizações industriais, contribuindo para a formação de profissionais mais capacitados e comprometidos com a excelência.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The present research by applying Design of Experiments (DOE) in the automotive painting process, demonstrated a significant technical and scientific impact, with measurable practical results in a real production environment. The structured use of DOE and analysis of variance (ANOVA) allowed the identification of critical process variables, culminating in the definition of new operational parameters that reduced 61 grams of material per vehicle without compromising the final quality. This gain highlights the potential of the method as an engineering tool applied to continuous improvement and data-driven decision-making. From an industrial perspective, the implementation of the experiment directly on the production line—enabled by the development of a specific measurement method—reinforces the operational feasibility of the approach, consolidating a replicable model for other stages or areas of manufacturing. The reduction in material consumption and fine-tuning of operational variables lead to greater product standardization and increased energy efficiency, strengthening the company's competitiveness in the global market. From an environmental and social standpoint, the rationalization of the painting process contributes to minimizing waste, reducing the generation of residues, and the consumption of natural resources, aligning with the principles of sustainable development. The improvement in product quality also positively impacts consumer satisfaction and the durability and safety of vehicles, generating tangible benefits for society. Finally, the research also stands out for its educational and institutional potential. The study serves as a practical reference for engineering and industrial management programs, demonstrating how statistical tools can be integrated into the manufacturing reality with concrete results. Moreover, it promotes a mindset of innovation, critical analysis, and continuous improvement, both in academic settings and industrial organizations, contributing to the formation of more skilled and committed professionals dedicated to excellence.

JULIANA TIYOKO YOSHIOKA

Melhoria de um processo de pintura automotiva usando planejamento de experimentos

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção – Mestrado Profissional

Data da defesa: 24/09/2025

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
GISLAINE CRISTINA BATISTELA
Data: 04/12/2025 15:50:18-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. GISLAINE CRISTINA BATISTELA

Orientador - UNESP



Documento assinado digitalmente
JULIANA HELENA DAROZ GAUDÊNCIO
Data: 24/09/2025 16:56:56-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. JULIANA HELENA DAROZ GAUDÊNCIO

UNIFEI



Documento assinado digitalmente
MESSIAS BORGES SILVA
Data: 17/12/2025 15:53:33-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. MESSIAS BORGES SILVA

UNESP

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças à contribuição e ao apoio de diversas pessoas e instituições, às quais registro minha sincera gratidão.

À Toyota do Brasil, pelo incentivo, pelo apoio constante e por me proporcionar esta oportunidade de unir aprendizado acadêmico e a prática profissional. O suporte oferecido foi fundamental para que os resultados aqui apresentados tivessem não apenas relevância científica, mas também aplicabilidade real.

À UNESP do campus de Guaratinguetá, pelo acolhimento neste momento tão importante da minha trajetória e por ter sido parte essencial da minha formação desde a graduação, contribuindo para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

Aos meus professores e orientadores, pela dedicação, paciência e conhecimento compartilhado ao longo desta jornada. Suas orientações foram essenciais para meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Por fim, agradeço às pessoas que me apoiaram e acreditaram em mim durante todo este percurso. À minha família e amigos, pela compreensão nos meus momentos de ausência, pelas palavras de incentivo e pelo suporte incondicional, que me deram forças para seguir até a conclusão desta etapa.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta caminhada, deixo o meu sincero agradecimento.

RESUMO

O setor automotivo possui forte relevância econômica e tecnológica, sustentando cadeias produtivas complexas. O processo de pintura exerce papel fundamental na proteção, durabilidade e qualidade percebida do veículo. Este trabalho apresenta a aplicação da metodologia de planejamento de experimentos (*Design of Experiments* - DOE) no processo de pintura automotiva industrial com o objetivo de reduzir desperdícios, otimizar o consumo de materiais e promover a sustentabilidade. Embora existam estudos sobre o uso do DOE em processos de pintura por spray, observa-se uma lacuna de pesquisa quanto à aplicação dessa metodologia em processos que envolvem massa de alta viscosidade, foco deste estudo.

A pesquisa foi conduzida em uma montadora localizada na região de São Paulo, em ambiente real de produção. O objeto de estudo o processo automatizado de aplicação de massa de alta viscosidade para formação do cordão de vedação no assoalho do veículo. A partir da análise de sete variáveis de processo – velocidade de aplicação, pressão, temperatura do material, fluxo, distância de aplicação, velocidade de rotação e material – foi possível identificar as duas mais influentes, velocidade de aplicação e pressão, resultando na simplificação e otimização do processo produtivo.

Por meio do uso de técnicas estatísticas, foram definidos parâmetros ideais que proporcionaram redução do peso do material aplicado, com ganhos de até 63% em determinadas regiões do cordão de vedação. A implementação das novas condições operacionais (velocidade de 530 mm/s e pressão de 7 MPa) resultou em uma economia de 61 gramas de material por veículo, evidenciando o impacto econômico e ambiental da melhoria. O desenvolvimento de um método de medição adaptado à linha produtiva garantiu a confiabilidade dos dados sem comprometer a operação. Como contribuição adicional, o estudo propõe a integração de tecnologias de inspeção automatizada para controle estatístico contínuo, reforçando o uso estratégico da estatística na engenharia de manufatura.

Palavras-chave: *Design of Experiments* - DOE; melhoria de parâmetros; pintura automotiva; redução de desperdício; controle de qualidade.

ABSTRACT

This work presents the application of the Design of Experiments (DOE) methodology in the industrial automotive painting process with the aim of reducing waste, optimizing material consumption, and promoting sustainability. Although there are studies on the use of DOE in spray painting processes, a research gap is observed regarding the application of this methodology in processes involving high-viscosity sealant, which is the focus of this study. The research was conducted in a real production environment, and from the analysis of seven process variables, it was possible to identify the two most influential ones - application speed and pressure - resulting in the simplification and optimization of the production process. Using Minitab software and the desirability technique, ideal parameters were defined that provided a significant reduction in the weight of the applied material, with gains of up to 63% in certain regions of the sealing bead. The implementation of the new operational conditions (speed of 530 mm/s and pressure of 7 MPa) resulted in savings of 61 grams of material per vehicle, highlighting the economic and environmental impact of the improvement. The development of a measurement method adapted to the production line ensured data reliability without compromising operations. As an additional contribution, the study proposes the integration of automated inspection technologies for continuous statistical control, reinforcing the strategic use of statistics control, and reinforcing the strategic use of statistic in manufacturing engineering.

Keywords: design of experiments; process improvement; automotive painting; waste reduction; applied statistics; quality control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Percurso metodológico de seleção de literatura baseado no fluxograma PRISMA 2020.....	19
Figura 2 – Número de artigos identificados por ano.....	20
Figura 3 – Principais etapas do processo de pintura automotiva	26
Figura 4 – Pintura eletrostática.....	27
Figura 5 - Modelo geral de um sistema	29
Figura 6 – Representação da sequência de experimentos até atingir a melhoria.....	31
Figura 7 – Principais etapas do processo de pintura automotiva	45
Figura 8 – Esquematização do sistema de aplicação automatizada	46
Figura 9 – Esquematização do robô.....	46
Figura 10 – Fluxo de abastecimento do material até o robô.....	47
Figura 11 - Aplicação de cordão realizado por aplicador tipo swirl.....	47
Figura 12 – Ferramenta de aplicação duas vias.....	48
Figura 13 – Identificação do robô em estudo na linha de produção	48
Figura 14 – Diagrama das diretrizes do planejamento de experimentos.....	50
Figura 15 – Classificação de aplicação de filete boa (a) e aplicação de filete ruim (b)	50
Figura 16 – Definição da largura padrão do filete para garantia de qualidade	51
Figura 17 – Variação da largura do cordão com a distância	54
Figura 18 – Ângulo de aplicação	55
Figura 19 – Fluxo de material.....	55
Figura 20 – Velocidade de aplicação	56
Figura 21 – Pontos de medição: (a) antes da aplicação do material; (b) e após a aplicação do material	60
Figura 22 – Medição da largura com escalímetro – primeiro método de medição	61
Figura 23 – Passo a passo do segundo método de medição.....	62
Figura 24 – Centralização da chapa nos pontos de coleta.....	63
Figura 25 – Medição da geometria do cordão	64
Figura 26 – Controlador para parametrização do robô.....	68
Figura 27 – Evidência dos experimentos exploratórios	69
Figura 28 – Distribuição dos dados do baseline no ponto 1	72
Figura 29 – Intervalo de 95% de confiança do baseline no ponto 1	74

Figura 30 – Análise de capacidade do baseline no ponto 1	74
Figura 31 – Análise exploratória do baseline no ponto 2.....	75
Figura 32 – Intervalo de 95% de confiança do baseline no ponto 2	76
Figura 33 - Análise de capacidade do baseline no ponto 2	78
Figura 34 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados das variáveis e suas interações do ponto 1	81
Figura 35 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados das variáveis e suas interações do ponto 2.....	81
Figura 36 – Principais efeitos na variável resposta dos pontos.....	82
Figura 37 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados das variáveis e suas interações do ponto 1 (a) e no ponto 2 (b).....	85
Figura 38 – Principais efeitos na resposta do ponto 1	86
Figura 39 - Principais efeitos na resposta do ponto 2	87
Figura 40 – Saída do Minitab: Desirability composta	90
Figura 41 – Imagem da região de estudo dos pontos 1 e 2	92
Figura 42 – Imagem da região de estudo antes da alteração da melhoria.....	93
Figura 43 - Imagem da região de estudo depois da alteração da melhoria.....	94
Figura 44 – Imagem da continuação da aplicação do cordão de estudo	94
Figura 45 - Imagem da continuação da aplicação antes da alteração da melhoria...96	
Figura 46 - Imagem da continuação da aplicação depois da alteração da melhoria .96	
Figura 47 - Análise exploratória da coleta dos resultados no ponto 1	99
Figura 48 – Intervalo de 95% de confiança da coleta de dados do processo no ponto 1	100
Figura 49 - Análise de capacidade da coleta dos resultados do processo no ponto 1	101
Figura 50 - Análise exploratória da coleta dos resultados no ponto 2.....	102
Figura 51 – Intervalos de 95% de confiança da coleta de dados do processo no ponto 2	103
Figura 52 - Análise de capacidade da coleta dos resultados do processo no ponto 2	104
Figura 53 – Diferença visual das geometrias dos cordões de material, mesmo com pesos similares.....	108

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos artigos selecionados quanto ao processo.....	21
Quadro 2 – Resumo dos artigos revisados	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo do processo de busca para revisão de literatura.....	19
Tabela 2 – Análise de Variância para o modelo de efeitos fixos de fator único.....	37
Tabela 3 – Levantamento de características de 9 lotes do material.....	49
Tabela 4 – Sumarização das variáveis e níveis de trabalho.....	54
Tabela 5 – Parâmetros das variáveis de aplicação e valores do baseline	65
Tabela 6 - Características dos materiais do baseline.....	65
Tabela 7 – Variáveis e níveis de trabalho.....	66
Tabela 8 – Matriz de teste	67
Tabela 9 - Registro das características dos materiais do teste exploratório.....	69
Tabela 10 – Peso das amostras dos pontos 1 e 2 do baseline	71
Tabela 11 – Resumo da análise descritiva dos dados baseline (ponto 1).....	73
Tabela 12 – Resumo da análise descritiva dos dados baseline (ponto 2).....	76
Tabela 13 – Intervalo de 95% de confiança do baseline no ponto 2	77
Tabela 14 – Matriz experimental do experimento fatorial fracionado e valores dos pesos para os pontos 1 e 2	79
Tabela 15 - Coeficientes estimados (Coef_Ponto1 e Coef_Ponto2) e valores p (p_Ponto1 e p_Ponto2) dos fatores e interações nos pontos 1 e 2.....	80
Tabela 16 – Resultados do experimento fatorial 2 ² para as variáveis Velocidade de Aplicação (Va) e Pressão (Pr)	84
Tabela 17 – Coeficientes (Coef_Ponto1 e Coef_Ponto2) e valores p (p_Ponto1 e p_Ponto2) dos fatores e interação nos pontos 1 e 2.....	85
Tabela 18 – Desempenho do modelo do ponto 1 e do ponto 2.....	87
Tabela 19 – Parâmetros utilizados na função “Response Optimizer” do Minitab	89
Tabela 20 – Condições ótimas de processo e valores ajustados com a respectiva <i>desirability</i> composta.....	91
Tabela 21 – Valores ajustados, erros padrão, intervalos de confiança e predição para múltiplas respostas.....	91
Tabela 22 – Velocidade de aplicação antes e depois da melhoria.....	93
Tabela 23 – Velocidade de aplicação antes e depois da melhoria.....	95
Tabela 24 - Características dos materiais da coleta de dados do processo	97
Tabela 25 - Registro das respostas dos dados finais.....	98

Tabela 26 – Estatísticas descritivas e teste de normalidade para o ponto 1 após a alteração do processo	99
Tabela 27 – Intervalo de 95% de confiança da coleta de dados no ponto 1	100
Tabela 28 – Estatísticas descritivas e teste de normalidade para o ponto 2 após a alteração do processo	103
Tabela 29 – Intervalos de 95% de confiança da coleta de dados do processo no ponto 2	103
Tabela 30 – Estatística descritiva do ponto 1 antes e depois da melhoria	105
Tabela 31 – Estimativa da diferença do ponto 1	105
Tabela 32 – Estatística descritiva do ponto 2 antes e depois da melhoria	105
Tabela 33 – Estimativa da diferença do ponto 2	106
Tabela 34 – Resumo das alterações de processo	107

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1.1	Critérios de busca.....	18
2.1.2	Classificação dos trabalhos quanto aos processos empregados o DOE 20	
2.2	PINTURA AUTOMOTIVA	25
2.2.1	Pré-Tratamento & ED	26
2.2.2	PVC & Sealer.....	27
2.2.3	Cabine	27
2.2.4	Inspeção	27
2.3	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS	28
2.3.1	Definição e conceitos.....	28
2.3.1.1	<i>Abordagem do melhor palpite.....</i>	29
2.3.1.2	<i>Abordagem de um fator de cada vez (One Factor At Time – OFAT)30</i>	
2.3.1.3	<i>Planejamento de experimentos (Design of Experiments – DOE)</i>	30
2.3.2	Princípios básicos do planejamento de experimentos	32
2.3.3	Diretrizes para planejar experimentos	33
2.3.4	Experimento fatorial.....	34
2.3.4.1	Planejamentos fatoriais $2k$	35
2.3.4.2	<i>Planejamento fatorial fracionado $2k - p$</i>	35
2.3.4.2.1	<i>Resolução do experimento fracionado.....</i>	35
2.3.4.2.2	<i>Confundimento</i>	36
2.3.5	Análise dos resultados experimentais	36
2.3.5.1	<i>Análise de variância</i>	36
a)	<i>Formular Hipóteses:.....</i>	38
b)	<i>Calcular a Estatística F:</i>	38
c)	<i>Determinar o valor p:.....</i>	38
2.3.5.2	<i>Análise de regressão.....</i>	38
2.3.6	Otimização de processos	39
2.3.6.1	<i>Desejabilidade (desirability)</i>	39

2.4	CAPACIDADE DO PROCESSO.....	41
2.4.1	Definição e conceitos.....	41
2.4.2	Formulações da capacidade de processo	42
2.4.2.1	<i>Índice de capacidade potencial - Cp</i>	43
2.4.2.2	<i>Índice de capacidade real - Cpk</i>	43
2.4.2.3	<i>Índice de performance potencial - Pp</i>	44
2.4.2.4	<i>Índice de performance real - Ppk</i>	44
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	45
3.1	CONTEXTO DA PESQUISA.....	45
3.1.1	Caracterização do processo	45
3.1.2	Caracterização do material.....	48
3.2	PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	49
3.2.1	Clarificação do problema	49
3.2.2	Seleção da variável resposta.....	52
3.2.3	Seleção dos fatores, níveis e amplitude	53
3.2.4	Escolha e realização do planejamento experimental.....	57
3.2.5	Análise estatística.....	58
3.3	COLETA E ANÁLISE DE DADOS <i>BASELINE</i>	59
3.3.1	Identificação das variáveis relevantes	59
3.3.2	Definição dos pontos de coleta de dados	60
3.3.3	Definição do método de medição	61
3.3.4	Registro das respostas	63
3.3.4.1	<i>Peso de material depositado</i>	63
3.3.4.2	<i>Geometria do cordão</i>	64
3.3.5	Dados <i>baseline</i>	64
3.4	EXPERIMENTO EXPLORATÓRIO	65
3.5	EXPERIMENTO FATORIAL COMPLETO	70
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
4.1	BASELINE	71
4.1.1	Análise exploratória do ponto 1	72
4.1.1.1	<i>Análise de capacidade do ponto 1</i>	74
4.1.2	Análise exploratória do ponto 2	75
4.1.2.1	<i>Análise de capacidade do ponto 2</i>	77
4.2	EXPERIMENTO EXPLORATÓRIO	77

4.3	EXPERIMENTO FATORIAL COMPLETO	83
4.3.1	Melhoria do processo	88
4.3.2	Alteração do processo	92
4.4	COLETA DE DADOS NO PROCESSO DE PINTURA AUTOMOTIVA..	95
4.4.1.1	Análise exploratória do ponto 1	97
4.4.1.2	Análise de capacidade dos resultados do ponto 1	101
4.4.1.3	Análise exploratória do ponto 2	102
4.4.1.4	Análise de capacidade dos resultados do ponto 2.....	103
4.5	COMPARAÇÃO ANTES E DEPOIS DA MELHORIA DO PROCESSO	104
4.6	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	106
5	CONCLUSÕES	109
	REFERÊNCIAS	111
	APÊNDICE A – EVIDÊNCIAS DO EXPERIMENTO FRACIONADO ..	116
	APÊNDICE B – REGISTRO DOS CORDÕES DO <i>BASELINE</i>.....	148
	APÊNDICE C – REGISTRO DOS CORDÕES DO EXPERIMENTO	
	FRACIONADO.....	152
	APÊNDICE D – Registro dos cordões do experimento fatorial	
	completo.....	156
	APÊNDICE E – Coleta dos resultados	158
	DADOS CURRICULARES	163

1 INTRODUÇÃO

A expansão da indústria automotiva ao longo do século XX intensificou os desafios ambientais, sociais e econômicos, tais como poluição sonora e atmosférica, congestionamento, acidentes e esgotamento de recursos naturais. (PAPASAVVA *et al.*, 2001). Embora o setor automobilístico seja considerado estratégico para promover a sustentabilidade global, sua performance ambiental e social ainda apresenta inconsistências em relação às expectativas regulatórias e da sociedade (KOPLIN *et al.*, 2007). Neste contexto, Szász *et al.* (2021) apontam que existe uma dificuldade para equilibrar o tripé da sustentabilidade, índices positivos nas vertentes ambientais e sociais, não apresentando necessariamente bons índices econômicos.

No contexto produtivo, a pintura automotiva é reconhecida como uma das etapas mais críticas da fabricação, tanto por seu alto impacto ambiental, quanto pelo elevado consumo de energia e materiais. Padrões cada vez mais rigorosos exigem que toda cadeia seja analisada, desde os insumos até a aplicação final (PAPASAVVA *et al.*, 2001). O uso de materiais para atender aos padrões de proteção e aparência final de um veículo, é definido por meio de desenhos técnicos que definem um valor mínimo de material necessário para que garantam a pintura funcionalmente e a qualidade percebida pelo cliente final. Entretanto, as ineficiências decorrentes do processo, geram desperdícios, excesso de material, consequentemente, altos custos de produção e impactos ambientais. A literatura destaca que a eficiência no uso de materiais é fundamental para reduzir o impacto ambiental e melhorar a competitividade industrial (LUANGKULARB *et al.*, 2014; CHIDHAMBARA *et al.*, 2018)

Apesar dos avanços tecnológicos, o controle da deposição de revestimentos permanece um desafio técnico relevante. Estudos recentes evidenciam que a espessura aplicada e a qualidade superficial dependem fortemente de múltiplos parâmetros de processo – pressão, velocidade, distância, temperatura, umidade e viscosidade – cuja interação complexa dificulta a obtenção de camadas uniformes e eficientes em ambientes industriais reais (BHAT *et al.*, 2025). Por isso, técnicas de planejamento de experimentos (DOE) têm sido cada vez mais empregados para identificar fatores críticos e apoiar decisões de processo em pintura automotiva.

Entretanto, a maioria das pesquisas concentram-se em processos atomizados (spray) utilizando tintas líquidas de baixa viscosidade, em ambiente controlado de laboratório ou em simulações, não refletindo plenamente a

complexidade das condições industriais reais. Conforme observado na revisão de literatura conduzida neste estudo, nenhum trabalho foi identificado tratando da aplicação de materiais de alta viscosidade, como o policloreto de vinila (PVC) automotivo aplicado por extrusão contínua, amplamente utilizado para vedação e proteção estrutural do veículo. Também não foram encontrados estudos que utilizassem DOE para modelar ou melhorar esse processo em condições reais de produção.

Nesta lacuna, insere-se a contribuição do presente trabalho. Além de preencher um vazio metodológico, ao aplicar técnicas estatísticas consolidadas a um processo ainda não modelado, o estudo oferece contribuições práticas relevantes para a indústria automotiva, incluindo redução de desperdício, maior previsibilidade do processo, diminuição de retrabalhos e aumento da robustez operacional. Do ponto de vista econômico e ambiental, a redução de material aplicado implica menor custo de produção e menor geração de resíduos, contribuindo com metas corporativas. Assim, o presente estudo foi conduzido em uma montadora dos segmentos B e C, que correspondem, respectivamente, a modelos de pequeno e médio porte na classificação europeia adotado pela indústria automotiva, localizada na região de São Paulo. A pesquisa aplica os conceitos de planejamento de experimentos a um processo industrial real de aplicação de PVC, processo que tradicionalmente, depende da experiência do operador, do método do “melhor palpite” e de ajustes empíricos. Ao propor uma modelagem quantitativa e baseada em evidências, busca-se avançar tanto o conhecimento científico quanto o desempenho operacional de um dos processos críticos da pintura automotiva.

1.1 OBJETIVO

O objetivo geral é a aplicação da técnica de planejamento de experimentos (DOE) para modelar e melhorar o processo industrial de aplicação de PVC automotivo por extrusão contínua, com foco na melhoria do processo. Com o propósito de se atingir o objetivo são apresentados os respectivos objetivos específicos desta pesquisa:

- a) Identificar, por meio da experimentação exploratória, os fatores de processo com maior influência sobre o volume de PVC aplicado, considerando a ausência de estudos prévios na literatura para este tipo de material e tecnologia;

- b) Desenvolver um modelo estatístico, utilizando planejamento fatorial completo, capaz de prever a configuração ideal dos parâmetros do processo para alcançar os resultados desejados;
- c) Validar o modelo proposto em condições reais de produção, verificando a capacidade de prever o comportamento do processo e de reduzir variação e desperdícios.
- d) Reduzir desperdícios do processo de pintura com foco na melhora da qualidade do produto final de forma sustentável.
- e) Avaliar o impacto prático das melhorias obtidas, incluindo a redução de consumo de material.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo aplicar técnicas de planejamento de experimentos como ferramenta de melhoria do processo de pintura automotiva industrial, visando reduzir desperdícios de material, aumentar a previsibilidade da aplicação e aprimorar a qualidade do produto final de forma sustentável.

A aplicação do DOE permitiu ganhos práticos concretos, permitindo reduzir o número de variáveis críticas para duas principais – velocidade de aplicação e pressão – e definir parâmetros que fornecem base objetiva para decisões operacionais na linha de produção. Como resultado, observou-se uma redução de 61 gramas de material por veículo, refletindo um impacto direto na eficiência do uso de PVC e na redução de custos, além de contribuir para a sustentabilidade ao reduzir desperdícios.

Os resultados confirmaram que, mesmo sem atingir integralmente o valor alvo de 1,095g, os ajustes realizados proporcionaram melhorias consistentes, estatisticamente significativas e facilmente aplicáveis no ambiente real de produção. O DOE não só aumenta a confiabilidade do processo, mas também fornece uma ferramenta prática de controle e padronização da aplicação do PVC, reforçando seu valor como contribuição técnica para a engenharia automotiva.

Apesar dos avanços, há espaço para ampliar a aplicação dos parâmetros ideais a outras regiões do veículo, o que exigirá avaliações adicionais em diferentes robôs e pontos de aplicação, considerando a variabilidade geométrica e técnica das superfícies. Além disso, identificou-se que o peso do cordão, embora relevante, não é suficiente para assegurar a qualidade final. A inclusão de variáveis geométricas, como largura e espessura, pode tornar os modelos mais robustos e representativos.

Como perspectivas futuras, recomenda-se:

- O desenvolvimento de modelos estatísticos com múltiplas respostas (peso, largura e espessura);
- A coleta de maior volume de amostras, distribuídas em diferentes lotes e especificações de material;
- A análise da correlação entre geometria do cordão e defeitos de aplicação em campo, como furos ou falhas de cobertura;

- A integração do processo com tecnologias de inspeção automática, capazes de monitorar em tempo real as características do cordão.

Por fim, destaca-se como contribuição relevante a execução dos experimentos em ambiente real de produção, garantindo validação prática e aplicabilidade direta. O método de medição adaptado às condições operacionais mostrou-se eficaz, permitindo a coleta de dados confiáveis sem comprometer o ritmo da linha. Essa abordagem reforça o papel estratégico da estatística na engenharia de manufatura, ao unir rigor técnico, viabilidade operacional e sustentabilidade.

Em síntese, esta pesquisa não apenas gerou ganhos diretos de eficiência no processo de pintura automotiva, como também abriu caminhos para avanços futuros baseados na integração entre engenharia, estatística e tecnologia, consolidando práticas mais inteligentes, sustentáveis e competitivas para o setor automotivo.

REFERÊNCIAS

- BAIMA, J.; GONIAKOWSKI, J.; NOGUERA, C.; KOLTISOV, A.; MATAIGNE, J. M. Optimization of anticorrosive zinc coatings: tuning the adhesion of zinc/silica contact by interfacial ternary oxide formation. **Journal of Physical Chemistry C**, Washington, v. 124, n. 17, p. 9337-9344, 2020. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jpcc.0c00617>. Acesso em: 29 jun. 2026.
- BASKAR, S.; RAMAN, A.; KARTHICK, M.; LENIN, N.; KUMAR, R.; ROHINI, B.; CHANDRASEKARAN, M.; DEVI, U. A.; SUDHARSAN, M. S.; RUBAN, M. Enhancing machining efficiency of UNS S45000 alloy steel using cryogenically treated TiAlSiN coated tungsten carbide inserts. **Results in Engineering**, Amsterdam, v. 25, 104161, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104161>. Acesso em: 29 jun. 2026.
- BHALAMURUGAN, R.; PRABHU, S. Performance characteristic analysis of automated robot spray painting using Taguchi method and gray relational analysis. **Arabian Journal for Science and Engineering**, Riyadh, v. 40, n. 6, p. 1657-1667, 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13369-015-1628-7>. Acesso em: 29 jun. 2026.
- BHAT, R.; KARUPPASAMY, M.; MARAGATHARAJAN, M.; HALDORAI, A.; NIRMALA, E.; NAIK, N. Optimization of robotic spray painting trajectories using machine learning for improved surface quality. **Scientific Reports**, London, v. 15, n. 1, 18767, 2025. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-03448-z>. Acesso em: 29 jun. 2026.
- BOSE, S.; NANDI, T. A novel optimization algorithm on surface roughness of WEDM on titanium hybrid composite. **Sādhana**, Bengaluru, v. 45, n. 1, 236, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12046-020-01472-5>. Acesso em: 29 jun. 2026.
- BUCKO, M.; SCHINDLEROVA, V.; KRUPOVA, H. Application of lean manufacturing methods in the production of ultrasonic sensor. **Tehnički vjesnik**, Slavonski Brod, v. 29, n. 5, p. 1671-1677, 2022. Disponível em: <https://hrcak.srce.hr/281683>. Acesso em: 29 jun. 2026.
- CHIDHAMBARA, K. V.; LATHA SHANKAR, B.; VIJAYKUMAR. Optimization of robotic spray painting process parameters using Taguchi method. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Bengaluru, v. 310, 012108, 2017. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/310/1/012108>. Acesso em: 29 jun. 2026.
- DEMCHYSHYNA, O.; VARGALYUK, V.; POLONSKYY, V.; SKNAR, I.; PLYASOVSKAYA, K.; CHEREMYSINOVA, A.; SIGUNOV, O. Research into effect of propionic and acrylic acids on the electrodeposition. **Eastern-European Journal of Enterprise Technologies**, Kharkiv, v. 6, n. 6(90), p. 41-46, 2017. Disponível em: <https://journals.urau.ua/eejet/article/view/114559>. Acesso em: 29 jun. 2026.

DENGIZ, B.; BELGIN, O. Simulation optimization of a multi-stage multi-product paint shop line with response surface methodology. **Simulation**, Thousand Oaks, v. 90, n. 3, p. 265-274, 2014. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0037549713516508>. Acesso em: 29 jun. 2026.

DENGIZ, B.; IÇ, Y. T.; BELGIN, O. A meta-model based simulation optimization using hybrid simulation-analytical modeling to increase the productivity in automotive industry. **Mathematics and Computers in Simulation**, Amsterdam, v. 120, p. 120-128, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378475415001494>. Acesso em: 29 jun. 2026.

DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous optimization of several response variables. **Journal of Quality Technology**, Milwaukee, v. 12, n. 4, p. 214-219, 1980. Disponível em: <https://asq.org/quality-resources/articles/simultaneous-optimization-of-several-response-variables?id=6cc4986c5c2d4d8e97806c2ef97ef0dd>. Acesso em: 29 jun. 2026.

ELLWOOD, K. R. J.; TARDIFF, J. L.; ALAIE, S. M. A simplified analysis method for correlating rotary atomizer performance on droplet size and coating appearance. **Journal of Coatings Technology and Research**, New York, v. 11, n. 3, p. 303-309, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11998-013-9555-8>. Acesso em: 29 jun. 2026.

FATOBA, O. S.; AKINLABI, E. T.; AKINLABI, S. A.; ERINOSHO, M. F. Influence of process parameters on the mechanical properties of laser deposited Ti-6Al-4V alloy: Taguchi and response surface model approach. *Materials Today: Proceedings*, Amsterdam, v. 5, n. 9, p. 19785-19792, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785318313968>. Acesso em: 29 jun. 2026.

FEUJOFACK KEMDA, B. V.; BARKA, N.; JAHAZI, M.; OSMANI, D. Optimization of resistance spot welding process applied to A36 mild steel and hot dipped galvanized steel based on hardness and nugget geometry. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 106, n. 5-6, p. 2477-2491, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-019-04750-8>. Acesso em: 29 jun. 2026.

GÜDÜMCÜOĞLU, N.; SEVİM ÜNLÜTÜRK, S.; ÇELİK, İ. M.; YENER, H. B.; HELVACI, Ş. Ş. Development of surface modified SiO₂ nanoparticles incorporated clearcoats for automotive industry. **Surfaces and Interfaces**, Amsterdam, v. 56, 103096, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S246802302401647X>. Acesso em: 29 jun. 2026.

JEANDIN, M.; BORIT, F.; FABRÈGUE, N.; ROLLAND, G.; DELLORO, F. An artistic approach to thermal spray. In: Materials Science Forum. Wollerau: **Trans Tech Publications Ltd.**, v. 879, 2017. p. 15-28. Disponível em: <https://www.scientific.net/MSF.879.15>. Acesso em: 29 jun. 2026.

JURAN, J. M.; GODFREY, A. B. Juran's quality handbook. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

KIM, T. G.; SRIVASTAVA, R. R.; JUN, M.; KIM, M. S.; LEE, J. C. Hydrometallurgical recycling of surface-coated metals from automobile-discarded ABS plastic waste. **Waste Management**, Kidlington, v. 80, p. 414-422, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X18305786>. Acesso em: 29 jun. 2026.

KONDO, M. Y.; PINHEIRO, C.; DE PAULA, M. A.; DE SOUZA, T. A.; SOUZA, J. V. C.; RIBEIRO, M. V.; ALVES, M. C. S. Cutting parameters influence investigations on cutting consumed power, surface roughness and tool wear during turning of superalloy VAT 32 with PVD coated carbide tools using Taguchi method. **Materials Research Express**, Bristol, v. 6, n. 6, 066539, 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/ab0da8>. Acesso em: 29 jun. 2026

KOPLIN, J.; SEURING, S.; MESTERHARM, M. Incorporating sustainability into supply management in the automotive industry: the case of the Volkswagen AG. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 15, n. 11-12, p. 1053-1062, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652606002047>. Acesso em: 29 jun. 2026.

LAZAREVIC, S.; MILLER, S. F.; LI, J.; CARLSON, B. E. Experimental analysis of friction stir forming for dissimilar material joining application. **Journal of Manufacturing Processes**, Amsterdam, v. 15, n. 4, p. 616-624, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612513001012>. Acesso em: 29 jun. 2026.

LUANGKULARB, S.; PROMBANPONG, S.; TANGWARODOMNUKUN, V. Material consumption and dry film thickness in spray coating process. In: **Procedia CIRP**, Amsterdam, v. 13, p. 789-794, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114003874>. Acesso em: 29 jun. 2026.

MOHAN, R.; VENKATESAN, H.; MAHADEVAN, S. New methodology for light weight solutions to improve BIW structural performance using bulk head optimization. **Journal of Mechanical Science and Technology**, Seoul, v. 30, n. 8, p. 3533-3537, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-016-0713-5>. Acesso em: 29 jun. 2026.

MOHANTA, D. K.; SAHOO, B.; MOHANTY, A. M. Experimental analysis for optimization of process parameters in machining using coated tools. **Journal of Engineering and Applied Science**, Cairo, v. 71, n. 1, 36, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s44147-024-00370-5>. Acesso em: 29 jun. 2026.

MONTGOMERY, D. C. Design and analysis of experiments. 9th ed. Hoboken: Wiley, 2017.

MURADI, M.; WANKA, R. Sample-based motion planning for multi-robot systems. In: 2020 6th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), 2020. Piscataway: **IEEE**, 2020. p. 130-138. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9108020>. Acesso em: 29 jun. 2026.

MURAKOSHI, T.; SHIBAYANAGI, T. Optimization of welding conditions for friction stir spot welding of A6063S-T5 with composite coated films using a triangular prism-shaped tool. **Quarterly Journal of the Japan Welding Society**, Tokyo, v. 41, n. 4, p. 273-288, 2023. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/qjws/41/4/41_273/_article/-char/ja/. Acesso em: 29 jun. 2026.

PAPASAVVA, S.; KIA, S.; CLAYA, J.; GUNTHER, R. Characterization of automotive paints: an environmental impact analysis. **Progress in Organic Coatings**, Amsterdam, v. 43, n. 1-3, p. 193-206, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944001001825>. Acesso em: 29 jun. 2026.

PUNGAIAH, S. S.; KAILASANATHAN, C. K. Thermal analysis and optimization of nano coated radiator tubes using computational fluid dynamics and Taguchi method. **Coatings**, Basel, v. 10, n. 9, 804, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-6412/10/9/804>. Acesso em: 29 jun. 2026.

RAO, P. P. A heat exchanger analogy of automotive paint ovens. **Applied Thermal Engineering**, Amsterdam, v. 61, n. 2, p. 381-392, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431113005449>. Acesso em: 29 jun. 2026.

ROELANT, G. J.; KEMPPAINEN, A. J.; SHONNARD, D. R. Assessment of the automobile assembly paint process for energy, environmental, and economic improvement. **Journal of Industrial Ecology**, New Haven, v. 8, n. 4, p. 147-165, 2004. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1162/1088198041269355>. Acesso em: 29 jun. 2026.

TAKAHASHI, S.-I.; TODA, K.; ICHIHARA, K.; UCHIYAMA, K. Recent approaches for saving energy in automotive painting. In: SAE Technical Paper Series. Warrendale: **SAE International**, 1999. Paper 1999-01-3188. Disponível em: <https://saemobilus.sae.org/papers/recent-approaches-saving-energy-automotive-painting-1999-01-3188>. Acesso em: 29 jun. 2026.

TANZIM, F.; KONTOS, E.; WHITE, D. Generating prediction model of fan width by optimizing paint application process for electrostatic rotary bell atomizer. **Results in Engineering**, Amsterdam, v. 13, 100356, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123021001031>. Acesso em: 29 jun. 2026.

TILLMANN, W.; HOLLINGSWORTH, P.; BAUMANN, I.; HIEGEMANN, L.; WEDDELING, C.; TEKKAYA, A. E.; RAUSCH, S.; BIERMANN, D. Thermally sprayed fine-structured WC-12Co coatings finished by ball burnishing and grinding as an innovative approach to protect forming tools against wear. **Surface and Coatings Technology**, Amsterdam, v. 268, p. 134-141, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897214005507>. Acesso em: 29 jun. 2026.

VILLARREAL-MARROQUÍN, M. G.; CASTRO, J. M.; CHACÓN-MONDRAGÓN, Ó. L.; CABRERA-RÍOS, M. Optimisation via simulation: a metamodeling-based method and a case study. **European Journal of Industrial Engineering**, Geneva, v. 7, n. 5, p. 580-605, 2013. Disponível em: <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/EJIE.2013.054131>. Acesso em: 29 jun. 2026.

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO	
	JULIANA TIYOKO YOSHIOKA COELHO 18 de agosto de 1986
Nacionalidade	brasileira
Nome em citações bibliográficas:	Yoshioka, Juliana Tiyoko Yoshioka, J. T.
Currículo Lattes	https://lattes.cnpq.br/2198941584995819
OCID	https://orcid.org/0009-0004-6103-5386
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
22/12/2008	Graduação em Engenharia Mecânica Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá
24/09/2025	Mestrado Profissional em Engenharia de Produção Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá
PARTICIPAÇÃO EM BANCAS E ORIENTAÇÕES	
Bancas de trabalhos de conclusão	
Moya, P. P., Participação em banca de Paula Petrini Moya. Análise estatística dos fatores de influência sobre a eficiência global do equipamento (OEE) de uma máquina rebitadora. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de produção) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva, 2024.	
PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS	
SIMPEP, 31., 2024, (Bauru). Análise de um processo de pintura automotiva usando planejamento de experimentos. 2024. (Seminário).	
Congresso SAE Brasil, 2024, (São Paulo). Relação de riscos organizacionais & legais para amadurecer a implantação de novas tecnologias em fábricas automotivas no Brasil. 2024. (Congresso).	