



ANÁLISE DE UM PROCESSO DE PINTURA AUTOMOTIVA USANDO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

JULIANA TIYOKO YOSHIOKA COELHO – j.yoshioka@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP), FACULDADE DE
ENGENHARIA E CIÊNCIAS, GUARATINGUETÁ

JOÃO BATISTA TURRIONI – joao.turri@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP), FACULDADE DE
ENGENHARIA E CIÊNCIAS, GUARATINGUETÁ

GISLAINE CRISTINA BATISTELA - gislaine.batistela@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP), INSTITUTO DE CIÊNCIAS E
ENGENHARIA, ITAPEVA

ÁREA: 4. ENGENHARIA DA QUALIDADE

SUBÁREA: 4.2 – PLANEJAMENTO E CONTROLE DA QUALIDADE

RESUMO: O PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS É UMA FERRAMENTA UTILIZADA PARA COMPREENDER AS RELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS DE UM SISTEMA E OTIMIZAR UM PROCESSO. ESTE ARTIGO APLICA A METODOLOGIA DOE PARA A ANÁLISE DE UM PROCESSO DE PINTURA AUTOMOTIVA, ESPECIFICAMENTE NA APLICAÇÃO DE MASSA LÍQUIDA DE ALTA VISCOSIDADE À BASE DE PVC NO ASSOALHO DO VEÍCULO. O ESTUDO VISA IDENTIFICAR AS VARIÁVEIS DE PROCESSO QUE MAIS INFLUENCIAM A QUALIDADE DA APLICAÇÃO DE MATERIAL. UTILIZANDO UM EXPERIMENTO FATORIAL FRACIONADO, FORAM ANALISADAS SEIS VARIÁVEIS CONTÍNUAS E UMA CATEGÓRICA. A ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) E O GRÁFICO DE PARETO IDENTIFICARAM A VELOCIDADE DE APLICAÇÃO E A PRESSÃO COMO OS FATORES MAIS SIGNIFICATIVOS. OS RESULTADOS FORNECEM DIRETRIZES CLARAS PARA A OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE PINTURA, PROMOVENDO MAIOR QUALIDADE E EFICIÊNCIA NA PRODUÇÃO AUTOMOTIVA.

PALAVRAS-CHAVES: PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS; PROCESSO;
PINTURA AUTOMOTIVA; ANOVA

1. INTRODUÇÃO

A expansão do transporte automotivo na última metade do século XX, gerou um vasto impacto ecológico e social como poluição sonora, congestionamento, acidentes, poluição do ar e da água, alteração do clima e esgotamento de recursos (GRAEDEL; ALLENBY, 1998). Há uma dificuldade em equilibrar o tripé da sustentabilidade, pois índices positivos nas vertentes ambiental e social nem sempre se refletem em bons resultados econômicos (SZÁSZ; CSÍKI; RÁCZ, 2021).

A pintura automotiva enfrenta crescentes padrões ambientais. É crucial analisar as implicações ambientais de toda a cadeia de produção e uso de materiais na operação de pintura. (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. Na indústria, a eficiência é fundamental e a redução de desperdício de material enquanto mantém a especificação de projeto é primordial (LUANGKULARB; PROMBANPONG; TANGWARODOMNUKUN, 2014).

Problemas complexos, na prática, os resultados muitas vezes não correspondem às previsões teóricas ou muitas vezes, o fenômeno é desconhecido. Nestes casos para entender a relação de causa e efeito em um sistema, é necessário realizar experimentos. Experimentação é uma ferramenta fundamental na pesquisa científica, fornecendo uma estrutura sistemática para a investigação de relações de causa e efeito entre variáveis. No âmbito da experimentação, o delineamento de experimentos desempenha um papel crucial na concepção e execução de estudos que visam obter resultados que a otimização de um processo de pintura automotiva (TANZIM; KONTOS; WHITE, 2022).

Embora estudos apontem a importância de otimizar os processos de pintura automotiva para reduzir desperdícios e minimizar impactos ambientais, ainda há uma falta de investigação aprofundada sobre como variáveis específicas do processo de pintura influenciam a qualidade final e a eficiência do processo. Neste artigo, objetivou-se explorar a aplicação da metodologia do planejamento de experimentos para analisar o processo de aplicação de um processo de pintura automotiva a fim de identificar quais variáveis afetam na qualidade da aplicação do material.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

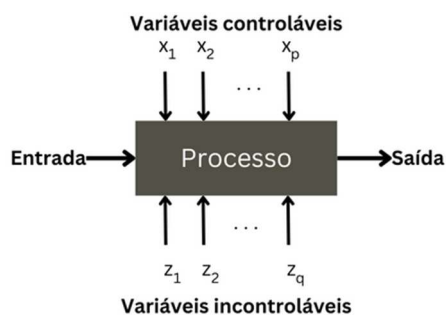
Frequentemente, problemas de engenharia demandam a aplicação de princípios científicos com o objetivo final de solucionar uma questão que envolve interesses gerais da sociedade. Como base, princípios físicos, como leis da mecânica, termodinâmica, eletricidade, entre outros, tentam entender e prever o comportamento de sistemas complexos com base em equações matemáticas ou princípios físicos fundamentais, são os modelos mecanicistas. Entretanto, a aplicação da teoria na prática nem sempre o resultado medido é igual ao cálculo teórico (MONTGOMERY, 2009).

Em algumas situações, os problemas são tão complexos ou únicos que não há teoria científica que possa ser aplicada para solucioná-los. Nessas circunstâncias, experimentos e observações cuidadosas dos dados resultantes constituem a única forma de resolução e tomada de decisão.

Para entender a relação de causa e efeito em um sistema, é necessário mudar as variáveis de entrada do sistema e observar as mudanças na saída do sistema. A observação sobre um sistema ou processo pode levar a teorias ou hipóteses sobre o que faz o sistema funcionar.

Os experimentos são testes ou série de execuções em que mudanças propositalmente são feitas nas variáveis de entrada e um processo ou sistema para que possamos observar e identificar as razões para as mudanças que podem ser observadas na resposta de saída (MONTGOMERY, 2009). O processo é uma combinação de operações, máquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transformam uma entrada (material) em uma saída que possui uma ou mais variáveis de resposta observáveis. Conforme representado na Figura 1, algumas variáveis de processo e propriedades do material, denotadas por $x_1, x_2 \dots, x_p$, são controláveis, enquanto outras variáveis como fatores ambientais ou algumas propriedades do material, denotadas por $z_1, z_2 \dots, z_q$, são incontroláveis (embora possam ser controláveis para fins de teste).

FIGURA 1 - Modelo geral de um sistema.



Fonte: Adaptado de Montgomery (2009)

Os objetivos do experimento podem incluir

- Determinar quais variáveis são mais influentes na resposta, ou seja, variável de saída;
- Determinar onde ajustar as variáveis x influentes para que y esteja quase sempre próximo ao valor desejado;
- Determinar onde ajustar as variáveis x influentes para que a variabilidade em y seja pequena;
- Determinar onde ajustar as variáveis x influentes para que os efeitos das variáveis incontrolláveis $z_1, z_2 \dots, z_q$ sejam minimizados.

Montgomery (2009) orienta que para lidar com vários fatores, a abordagem correta é conduzir um experimento fatorial. Esta é a estratégia experimental na qual os fatores são variados juntos, em vez de um de cada vez. Todas as combinações possíveis dos fatores em todos os níveis são usadas. Este experimento permite investigar os efeitos individuais e determinar se os fatores interagem.

A quantidade de experimentos necessários é representada por 2^k sendo k o número de fatores. À medida que o número de fatores de interesse aumenta, o número de rodadas necessárias aumenta rapidamente, tornando inviável do ponto de vista de tempo e recursos. Quando a quantidade de fatores em estudo for acima de 4, é utilizado uma variação denominada experimento fatorial fracionário, no qual apenas um subconjunto das rodadas é utilizado. Este experimento fornece boas informações sobre os principais efeitos dos fatores, bem como algumas informações sobre como os fatores interagem (MONTGOMERY, 2009).

Durante o teste de caracterização, o objetivo é determinar quais variáveis do processo afetam a resposta. O próximo passo é otimizar, ou seja, determinar a região nos fatores importantes que levam à melhor resposta possível.

Ainda segundo Montgomery (2009), o planejamento de experimentos (*Design of Experiments* – DOE) tem aplicações em várias áreas do conhecimento, como por exemplo, ciências físicas, engenharia, medicina, ciências sociais e na indústria. Seja na otimização de processos industriais, no desenvolvimento de novos medicamentos ou na avaliação de políticas públicas, a aplicação de técnicas de delineamento de experimentos pode fornecer *insights* valiosos e impulsionar o progresso científico e tecnológico. “O DOE fatorial completo ajuda as indústrias de pintura automotiva a estabelecerem parâmetros de aplicação otimizados” (TANZIM; KONTOS; WHITE, 2022).

Esta técnica leva a produtos mais fáceis de fabricar, com melhor desempenho e

confiabilidade do que a concorrência, e em menos tempo (DENGIZ; BELGIN, 2014). Os experimentos são conduzidos de forma sequencial, começando com experimentos exploratórios para identificar as variáveis mais importantes e progredindo para refinamento e otimização do processo. O uso de métodos estatísticos torna os experimentos mais eficientes e econômicos, garantindo objetividade científica na análise de dados (MONTGOMERY, 2009).

2.1 Diretrizes para planejar experimentos

Conforme Montgomery (2009), as diretrizes são:

- a) Clarificação e declaração do problema:** é recomendado o envolvimento de uma equipe de trabalho, envolvendo diferentes departamentos para solicitar contribuições, para clareza do problema em estudo, bem como manter em mente os objetivos gerais do experimento.
- b) Seleção da variável resposta:** a variável selecionada deve fornecer informações úteis sobre o processo em estudo. Além disso, é necessário definir como cada resposta será medida e abordar questões como será calibrado qualquer sistema de medição.
- c) Seleção dos fatores, níveis e amplitude:** fatores que podem influenciar o desenho do processo ou sistema sendo que os fatores podem ser controláveis e os não-controláveis (ruído). Definido os fatores de estudo, é preciso escolher os intervalos nos quais esses fatores serão variados e os níveis específicos nos quais as execuções serão feitas. Também é necessário definir como os valores dos fatores serão controlados e como serão medidos. Nesta etapa, é importante investigar todos os fatores que podem ser importantes e não ser influenciados por experiências. Quando o objetivo é investigar os fatores de maior impacto, geralmente usam apenas dois níveis e utiliza um intervalo amplo. O diagrama de causa e efeito, também conhecido como diagrama de espinha de peixe, é uma técnica citada pelo autor para organizar as informações geradas no planejamento pré-experimental.
- d) Escolha do planejamento experimental:** a escolha envolve consideração do tamanho da amostra (número de réplicas), seleção de uma ordem adequada de execução para os testes e determinação de se há ou não bloqueio ou outras restrições de aleatorização envolvidas.
- e) Realização do experimento:** ao conduzir o experimento, é vital monitorar o processo cuidadosamente para garantir que tudo esteja sendo feito conforme planejado. O planejamento antecipado para evitar erros é crucial nesta etapa. Coleman e Montgomery (1993) sugerem que antes de conduzir o experimento, algumas rodadas de teste ou rodadas piloto são importantes para detectar qualquer ponto de correção.
- f) Análise estatística dos dados:** métodos estatísticos devem ser usados para analisar os dados de forma que os resultados e conclusões sejam objetivos em vez de baseado em julgamentos.

Procedimentos de teste de hipótese e estimativas de intervalo de confiança são muito úteis na análise de dados de um experimento planejado. Também é comum a representação em termos de um modelo empírico. As análises estatísticas fornecem diretrizes quanto à confiabilidade e validade dos resultados.

g) Conclusão e recomendações: após as análises, o experimentador deve tirar conclusões práticas sobre os resultados e recomendar uma ação. Métodos gráficos são frequentemente úteis nesta etapa, principalmente na apresentação de resultados para outras pessoas. Um experimento bem-sucedido requer conhecimento dos fatores de impacto, dos intervalos nos quais esses fatores devem ser variados, do número apropriado de níveis a serem usados e das unidades de medidas adequadas para essas variáveis. Geralmente, não conhecemos perfeitamente as respostas para essas perguntas, mas as aprendemos à medida que avançamos.

3. MÉTODO EXPERIMENTAL

3.1 Considerações iniciais

Este estudo é aplicado a uma montadora de automóveis no Brasil, estabelecida em 1958, com várias fábricas em São Paulo. Conhecida por sua produção eficiente de veículos, incluindo modelos híbridos, a empresa adota práticas de produção enxuta e sustentabilidade. Com foco na inovação e no desenvolvimento local, gera milhares de empregos e contribui para o crescimento socioeconômico das comunidades. A definição do objeto de estudo foi feito com base levantamento de custo do veículo no processo de pintura e escolhido a área que representa o maior custo, que é o processo de aplicação de uma massa líquida de alta viscosidade à base de resina de policloreto de vinila (*PolyVinyl Chloride – PVC*), plastificante ftálico e outros, no assoalho do veículo, com o objetivo de realizar vedações da chapa contra infiltração de água e pó para o interior do veículo, proteção das bordas de chapa contra corrosão e também, conforto acústico.

3.2 Caracterização do processo de estudo

O processo do PVC é realizado após a inspeção da pintura protetiva realizada por eletrodeposição. A carroceria é elevada aereamente e todo o processo é realizado em quatro etapas. Na primeira zona, é feito o apontamento do modelo do carro para programar o robô e realizado colagem de alguns selos em furos de drenagem e referência do carro, antes da aplicação do material. Posteriormente, a carroceria passa por duas zonas automatizadas, com quatro robôs em cada zona. Em cada zona, são 2 robôs de cada lado da carroceria. Os oito robôs

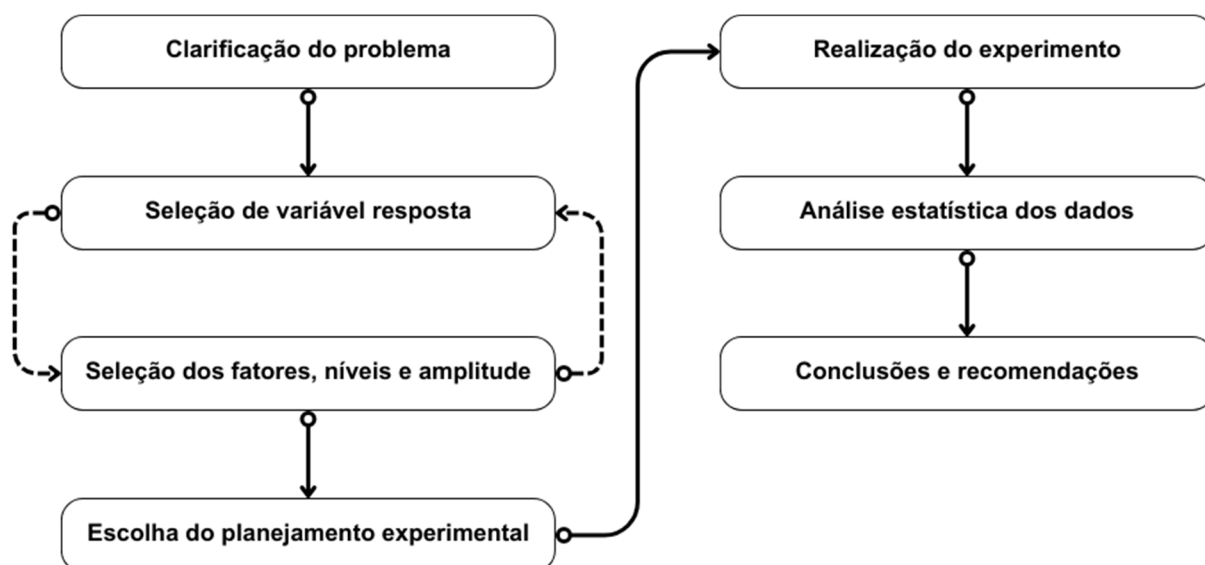
fazem a aplicação de toda a área do assoalho e caixas de rodas, dianteiras e traseiras.

Os robôs são programados e têm movimentos em 7 eixos. É constituído de duas ferramentas na saída do material: a primeira, denominada filete (*swirl*), forma um cordão de massa, enquanto a segunda, chamada spray (*mistless*), aplica o material na forma de um leque.

3.3 Descrição do método experimental

Conforme apresentado na fundamentação teórica, segundo Montgomery (2009), o DOE deve seguir as etapas demonstradas na Figura 2. O processo inicia com a clarificação e declaração do problema em estudo. Posteriormente, devem ser definidas as variáveis respostas, seguida dos fatores, seus níveis e amplitude. Nesta etapa, é comum que tenha uma checagem se a resposta é a mais adequada para os fatores escolhidos.

FIGURA 2 – Diagrama das diretrizes do planejamento de experimentos.



Fonte: própria do autor

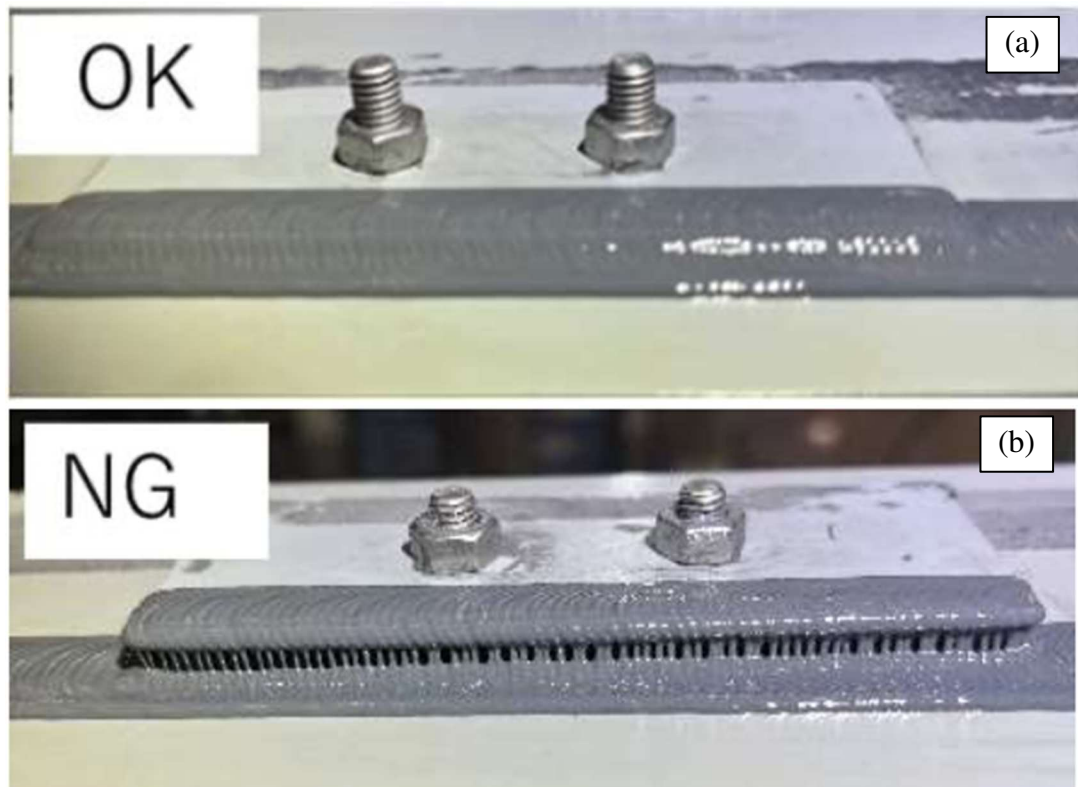
É recomendado que seja também realizada em conjunto com uma equipe multidisciplinar, com diferentes pontos de vista para que todas as variáveis consigam ser consideradas no estudo. Posteriormente, o planejamento experimental mais apropriado definido, é realizado o experimento, coleta de dados e análise estatística dos dados. Com base nos resultados, considerados as conclusões do estudo.

3.3.1 CLARIFICAÇÃO DO PROBLEMA

A aplicação do PVC é definida por desenho, os locais de cobertura necessários para garantir a qualidade esperada do veículo. O filete deve cobrir a sobreposição de chapas,

garantindo a total cobertura, sem que haja falhas (furos) na aplicação, conforme representado na Figura 3.

FIGURA 3 – Classificação de aplicação de filete boa (a) e aplicação de filete ruim (b)



Fonte: própria do autor

3.3.2 SELEÇÃO DA VARIÁVEL RESPOSTA

O cerne deste estudo é utilizar o delineamento de experimentos para analisar as variáveis de processo que tem maior influência no objeto de. Neste sentido, é crucial exercer o controle sobre o peso correspondente de material depositado

O gerenciamento adequado do peso do material assegura que a quantidade utilizada se alinhe perfeitamente com as especificações teóricas, evitando desperdícios e garantindo a qualidade do resultado.

3.3.3 SELEÇÃO DOS FATORES E NÍVEIS

Estudos internos consideram as variáveis de aplicação como distância de aplicação da pistola, ângulo de aplicação, fluxo de material, pressão de aplicação e velocidade de aplicação como variáveis importantes de controle. Na Tabela 2 estão listadas todas as variáveis e níveis de trabalho pré-determinadas no projeto do processo de pintura.

TABELA 2 – Sumarização das variáveis e níveis de trabalho

	Variável	Unidade	Mínimo	Máximo
Aplicação	Distância da pistola	mm	75	125
	Ângulo α	°	-30	30
	Ângulo β	°	-30	30
	Velocidade de rotação	rpm	20.000	24.000
	Fluxo de material	cc/min	560	1.000
	Velocidade da pistola	mm/s	200	700
	Pressão de aplicação	MPa	2	8
Sistema	Pressão do sistema	Mpa	18	22
	Temperatura da massa	°C	24	34
Material	Densidade	g/cm ³	1,4	-
	Limite de escoamento	Pa	400	700
	Viscosidade Bingham	Pa.s	1	2
	Viscosidade Brookfield	Pa.s	75	95

Fonte: própria do autor

As características do material não são controláveis do processo, porém será considerado como uma variável categórica. Já as variáveis de ângulo (α e β) não é possível a medição no processo, portanto não serão estudadas. Já a pressão do sistema, também foi desconsiderado, já que existe o controle de pressão de aplicação. Portanto, para este estudo, serão avaliadas 6 variáveis contínuas e 1 variável categórica, que representa um número muito alto de fatores para estudo, representados na Tabela 3.

TABELA 3 – Variáveis e níveis de trabalho

	Fator	Tipo	Unidade	Notação	Níveis de trabalho	
					-1	1
1	Distância da pistola	Contínua	mm	D	70	100
2	Velocidade de rotação	Contínua	rpm	Vr	20.000	24.000
3	Fluxo de material	Contínua	cc/min	F	560	650
4	Velocidade de aplicação	Contínua	mm/s	Va	300	600
5	Pressão de aplicação	Contínua	MPa	P	4	7
6	Temperatura da massa	Contínua	°C	T	25	32
7	Material	Categórica	-	M	A	B

Fonte própria do autor

3.3.4 ESCOLHA DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para o planejamento do experimento, foi utilizado o *software* Minitab (MINITAB, 21).

Nas ferramentas estatísticas do software, na opção “DOE (Planejamento de Experimentos)”, “Fatorial” e “Criação de um experimento fatorial”, foi selecionado a opção: “fatorial com dois níveis (geradores padrão)” e selecionado “32 ensaios” (resolução IV). Neste caso, nenhum efeito principal é confundido com qualquer outro efeito principal ou interação com 2 fatores, mas algumas interações com 2 fatores são confundidas com outras interações de 2 fatores e efeitos principais é confundido com interações de 3 fatores.

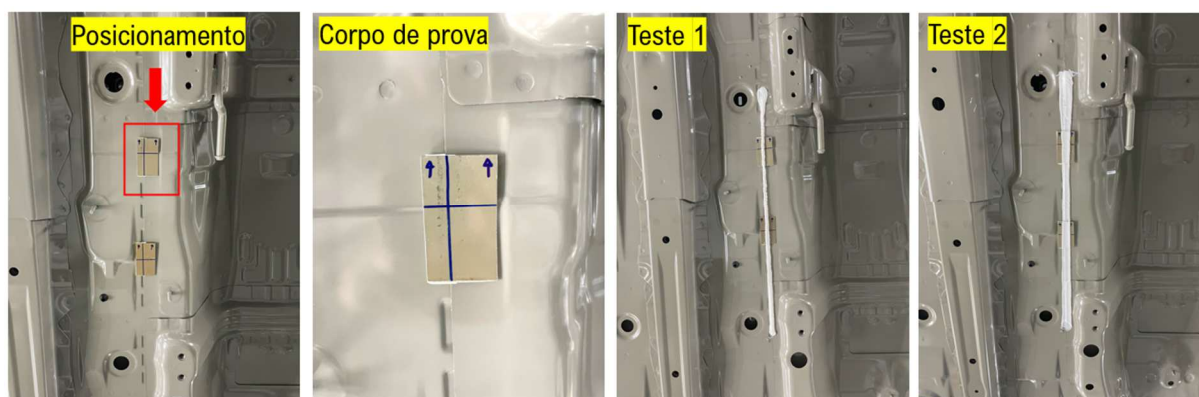
3.3.5 REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

A execução dos experimentos foi realizada em uma linha de aplicação automática, com o robô de pintura. O robô em estudo é o robô da segunda estação, o robô UR2-3, responsável pela aplicação da região frontal do assoalho direito do veículo.

Os experimentos foram realizados com o auxílio de uma carroceria de produção posicionada na estação e com o corpo de prova com dimensões de 50 x 25 x 0,6 mm (Figura 4). Antes de iniciar os testes, foi feito a cópia do programa original 121 como um programa teste 188. O programa 188 foi desligado a aplicação do material em todos os pontos do carro, com exceção nos pontos de estudo. Uma nova cópia do programa 188 foi feito como 288, sendo este último, realizado o ajuste na programação do robô para a distância de aplicação para 100 mm. Os demais ajustes das variáveis são realizados através do controlador, apenas na parametrização (velocidade de aplicação, velocidade de rotação, fluxo, pressão).

O material foi avaliado de lotes diferentes, com características diferentes, porém dentro da faixa de especificação de trabalho. Já o ajuste de temperatura foi realizado no controlador de temperatura do sistema de massas e do robô.

FIGURA 4 – Etapas da realização do experimento



Fonte própria do autor

3.3.5.1 Registro das respostas

Os corpos de prova foram nomeados e registrados juntamente com o peso delas usando uma balança de precisão de 3 casas decimais. Após a aplicação do filete de massa no corpo de prova, foi realizado a cura do material a 120°C por aproximadamente 1 hora para facilitar o manuseio e evitar qualquer remoção acidental do material. Após a cura do material, os corpos de prova com o filete de massa aplicado, foram pesados novamente na mesma balança de precisão (Figura 5). Assim, o peso de material depositado foi calculado utilizando a seguinte expressão:

$$P = P_f - P_i \quad (1)$$

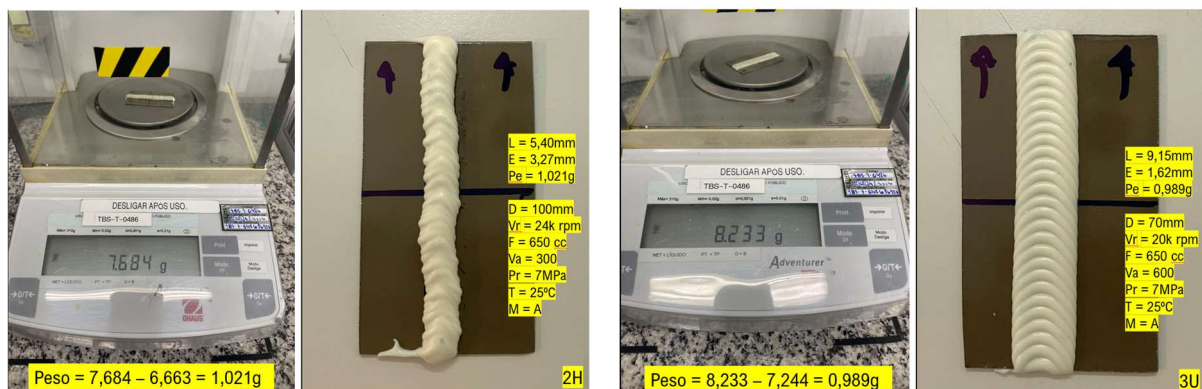
em que:

P é o peso do filete de massa

P_f é o peso final (chapa com o filete de massa)

P_i é o peso inicial (chapa)

FIGURA 5 – Exemplificação de registro das respostas de 2 experimentos realizados



Fonte própria do autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o *software* Minitab (MINITAB, 21), foi realizado a análise do experimento fatorial e os principais resultados estão demonstrados a seguir.

4.1 Análise de variância

A análise de variância (ANOVA) foi conduzida para avaliar os efeitos de diferentes variáveis independentes e suas interações sobre a variável dependente. A tabela 4 apresenta os valores de p e os fatores de inflação da variância (VIF) para cada termo incluído no estudo. Os

resultados da ANOVA indicam que alguns termos têm um efeito estatisticamente significativo sobre a resposta. Em particular, a "Velocidade de Aplicação" ($p = 0,000$), "Pressão" ($P < 0,000$), "Distância da Pistola * Vel. Aplicação" ($p = 0,047$) e "Distância da Pistola * Temperatura" ($p = 0,019$) mostraram-se significativos pois representam um valor-p menor que 0,05. Os valores de VIF para todas as variáveis foram iguais a 1,00, indicando que não há problemas de multicolinearidade no modelo.

TABELA 4 – Resultado da ANOVA

Termo	Valor-p	VIF
Constante	0,000	
Distância da Pistola	0,085	1,00
Velocidade	0,175	1,00
Fluxo	0,137	1,00
Vel. Aplicação	0,000	1,00
Pressão	0,000	1,00
Temperatura	0,290	1,00
Material	0,701	1,00
Distância da Pistola*Velocidade	0,902	1,00
Distância da Pistola*Fluxo	0,961	1,00
Distância da Pistola*Vel. Aplicação	0,047	1,00
Distância da Pistola*Pressão	0,903	1,00
Distância da Pistola*Temperatura	0,019	1,00
Distância da Pistola*Material	0,145	1,00
Velocidade*Vel. Aplicação	0,196	1,00
Distância da Pistola*Velocidade*Vel. Aplicação	0,775	1,00

Fonte própria do autor

4.2 Análise de Pareto

Um gráfico de Pareto foi gerado para identificar e visualizar os efeitos das variáveis independentes e suas interações sobre a resposta. O gráfico de Pareto é uma ferramenta eficaz para destacar quais fatores têm maior impacto no resultado, permitindo uma priorização das variáveis mais influentes (Figura 6).

Os efeitos padronizados das variáveis foram plotados no gráfico de Pareto, como mostrado na figura 6. A linha de referência indica o nível de significância estatística, com barras que ultrapassam essa linha representando efeitos significativos.

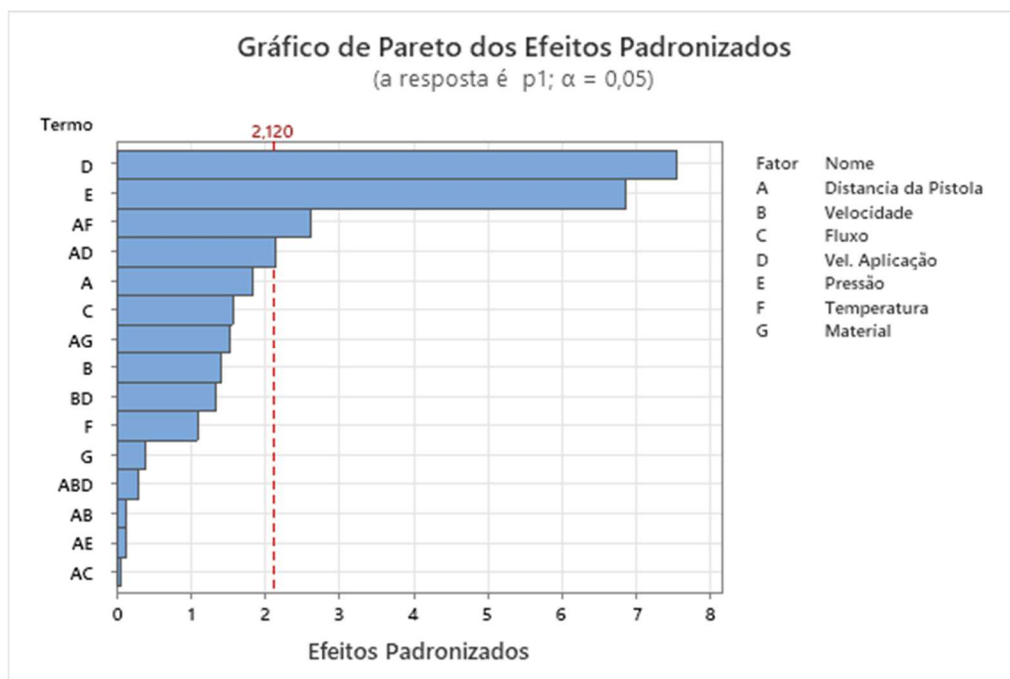
Os resultados do gráfico de Pareto indicam que os seguintes termos têm os maiores efeitos padronizados:

- Velocidade de Aplicação: Esta variável mostrou o maior efeito padronizado, confirmando sua significância no modelo conforme identificado na ANOVA.

- Pressão: Também apresentou um efeito significativo e é visualmente destacado no gráfico.
- Interação Distância da Pistola * Velocidade de Aplicação: Esta interação se mostrou significativa, conforme evidenciado tanto na ANOVA quanto no gráfico de Pareto.
- Interação Distância da Pistola * Temperatura: Outra interação significativa que foi destacada no gráfico.

Os efeitos de outras variáveis, como "Temperatura" e "Material," não ultrapassaram a linha de significância, corroborando os resultados da ANOVA, que indicaram a falta de significância estatística desses termos individualmente.

FIGURA 6 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados das variáveis e suas interações.



Fonte própria do autor

4.3 Efeitos principais

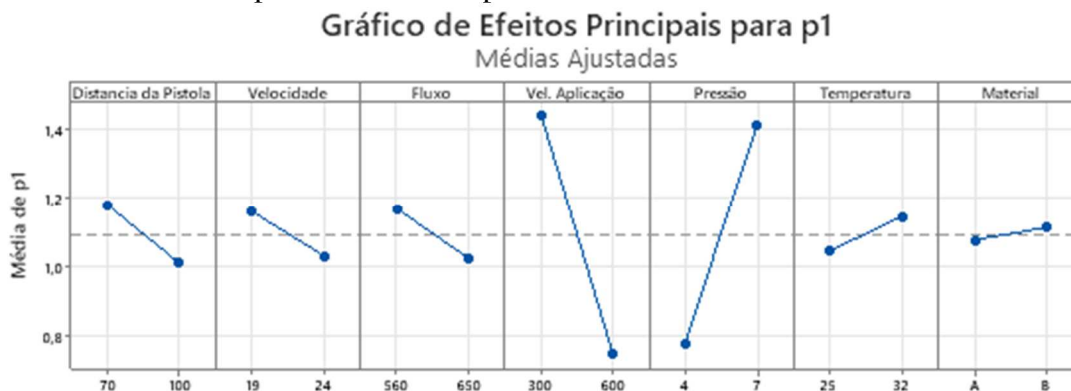
Para entender melhor o impacto de cada variável independente na variável dependente, foi gerado um gráfico de efeitos principais. Esse gráfico ajuda a visualizar como as mudanças nos níveis de cada fator influenciam o resultado do experimento.

Os efeitos principais para cada variável são apresentados na Figura 7. As linhas representam a média da resposta para cada nível da variável.

- Distância da Pistola: A linha para a distância da pistola mostra uma leve inclinação, sugerindo que essa variável tem algum efeito, mas pode não ser muito forte.

- Velocidade: A linha para a velocidade apresenta uma inclinação moderada, indicando que mudanças na velocidade têm um efeito visível sobre a variável dependente.
- Fluxo: A linha para o fluxo mostra uma inclinação que sugere um efeito moderado, similar ao observado para a velocidade.

FIGURA 7 – Principais efeitos na resposta



Fonte própria do autor

- Velocidade de Aplicação: A linha para a velocidade de aplicação é bastante inclinada, indicando um efeito significativo. Isso é consistente com os resultados da ANOVA e do gráfico de Pareto, que também destacaram a importância desta variável.
- Pressão: A linha para a pressão também é significativamente inclinada, confirmando que esta variável tem um impacto importante no resultado do experimento.
- Temperatura: A linha para a temperatura é relativamente plana, sugerindo que esta variável tem um efeito mínimo ou insignificante sobre a variável dependente.
- Material: A linha para o material também é bastante plana, indicando pouca ou nenhuma influência no resultado.

5. CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou a eficácia do DOE na análise do processo de aplicação de PVC na pintura automotiva. Através de um experimento fatorial fracionado, foi possível reduzir os sete fatores iniciais do estudo: distância da pistola, velocidade de rotação, fluxo, velocidade de aplicação, pressão, temperatura e material, para apenas dois fatores mais influentes no processo, com a velocidade de aplicação e a pressão. A análise de variância (ANOVA) e o gráfico de Pareto forneceram insights valiosos sobre como ajustar essas variáveis para alcançar a melhor qualidade de aplicação, minimizando desperdícios e maximizando a eficiência.

Os resultados deste estudo oferecem diretrizes práticas para a indústria automotiva,

contribuindo para processos de pintura mais eficientes e produtos de alta qualidade. Além disso, a metodologia pode ser aplicada a outros processos industriais, reforçando a importância do DOE como uma ferramenta indispensável na otimização de processos complexos. A implementação dessas melhorias pode resultar em economia significativa de material, minimização do impacto ambiental, redução de custos de produção e aumento da competitividade no mercado automotivo.

Apesar de concluído esta etapa do estudo, há várias áreas que podem ser exploradas em pesquisas futuras. Com o número reduzido para dois fatores que tem impacto no objeto de estudo, é possível aplicar o experimento fatorial completo para otimização do processo e contribuir na melhoria de eficiência do processo, crucial para a competitividade e na minimização do impacto ambiental.

REFERÊNCIAS

- COLEMAN, D. E.; MONTGOMERY, D. C. **A Systematic Approach to Planning for a Designed Industrial Experiment**. *Technometrics*, v. 35, n. 1, p. 1-12, 1993.
- DENGIZ, B.; BELGIN, O. Simulation optimization of a multi-stage multi-product paint shop line with Response Surface Methodology. *SIMULATION*, v. 90, n. 3, p. 265–274, 2014.
- GRAEDEL, T. E.; ALLENBY, B. R. **Industrial Ecology and the Automobile**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998.
- KONDO, M. Y. et al. 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**, v. 6, n. 6, 22 mar. 2019.
- 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**, v. 15, n. 11–12, p. 1053–1062, 2007.
- LUANGKULARB, S.; PROMBANPONG, S.; TANGWARODOMNUKUN, V. **Material consumption and dry film thickness in spray coating process**. *Procedia CIRP*. **Anais...Elsevier B.V.**, 2014.
- MINITAB. Minitab versão 21 [software]. State College: Minitab, Inc., 2021.
- 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**, v. 71, n. 1, 1 dez. 2024.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 9. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

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. **Yosetsu Gakkai Ronbunshu/Quarterly Journal of the Japan Welding Society**, v. 41, n. 4, p. 273–288, 2023.

PAPASAVVA, S. et al. **Characterization of automotive paints: an environmental impact analysis Progress in Organic Coatings**. [s.l: s.n.].

SZÁSZ, L.; CSÍKI, O.; RÁCZ, G. Estudo de caso sobre a eficiência energética. **Revista de Engenharia**, v. 35, n. 2, p. 45-60, 2021.

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**, v. 13, 1 mar. 2022.