

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE GESTÃO E ECONOMIA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA PRODUÇÃO

RICHARD SEVEGNANI

**ANÁLISE DOS FATORES RELACIONADOS AO DEFEITO DE FERVURA EM
TINTA APLICADA EM MOTOR INDUSTRIAL POR MEIO DE PLANEJAMENTO
DE EXPERIMENTOS**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA
2020

RICHARD SEVEGNANI

**ANÁLISE DOS FATORES RELACIONADOS AO DEFEITO DE FERVURA EM
TINTA APLICADA EM MOTOR INDUSTRIAL POR MEIO DE PLANEJAMENTO
DE EXPERIMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização
apresentado como requisito parcial para a obtenção
do título de Especialista em Engenharia da
Produção.

Orientador: Msc. Wanderson Stael Paris.

CURITIBA
2020

TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DOS FATORES RELACIONADOS AO DEFEITO DE FERVURA EM TINTA APLICADA EM MOTOR INDUSTRIAL POR MEIO DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Esta monografia foi apresentada no dia 30 de setembro 2020, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia da Produção – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato Richard Sevegnani apresentou o trabalho para a Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após a deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Msc. Wanderson Stael Paris.
Orientador

Msc. Egon Bianchini Calderari
Banca

Msc. Sérgio Zagonel
Banca

Dra. Luciana Vieira de Lima
Banca

Visto da coordenação:

Dr. Paulo Daniel Batista de Sousa

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

RESUMO

SEVEGNANI, Richard. **Análise dos fatores relacionados ao defeito de fervura em tinta aplicada em motor industrial por meio de planejamento de experimentos**. 2020. 34 p. Monografia. (Especialização em Engenharia da Produção) – Departamento de Gestão e Economia - DAGEE, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

O defeito de fervura está relacionado à evaporação do solvente da camada de tinta aplicada durante o processo de cura. Há diversos fatores relacionados a este processo que podem ser controlados de modo a reduzir a ocorrência do problema. Este estudo teve o objetivo de reduzir este defeito por meio do planejamento de experimentos. A empresa onde o estudo foi realizado produz componentes de chapa de aço que estão propensos a apresentar este defeito devido à sua elevada rampa de aumento de temperatura dentro da estufa de cura. Durante o planejamento inicial do estudo, destacaram-se diversos fatores do processo considerados críticos, os quais puderam ser controlados experimentalmente com o objetivo de identificar quais são os que mais contribuem para a ocorrência da fervura. Como início deste trabalho sequencial, realizou-se um experimento fatorial fracionado replicado, buscando eliminar alguns dos fatores e compreender melhor os níveis daqueles em estudo e sua influência no defeito estudado. Seis fatores foram selecionados neste primeiro experimento, resultando em dezesseis rodadas/tratamentos com um total de quarenta e oito corpos de prova. O fator relacionado à espessura de película seca da tinta foi o que mais contribuiu para a incidência do defeito de fervura. Seguindo uma abordagem sequencial, realizou-se outro experimento complementar com o objetivo de avaliar a influência da temperatura da estufa no processo de cura. Por meio deste, conclui-se que com a tinta em questão aplicada no processo atual no componente estudado não é possível produzir componentes com apenas uma demão de tinta de acabamento que apresentem tanto uma boa cobertura quanto ausência do defeito de fervura.

Palavras-chave: Fervura. Planejamento de experimentos. Experimento fatorial fracionado.

ABSTRACT

SEVEGNANI, Richard. **Analysis of factors related to solvent-pop defect in paint applied on industrial motor through design of experiments.** 2020. 34 f. Monografia. (Especialização em Engenharia da Produção) – Departamento de Gestão e Economia - DAGEE, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

The solvent-pop defect is related to the solvent evaporation in the applied paint coat during the curing process. There are several factors related to this process which can be controlled in a way to reduce the occurrence of this problem. This study aimed to reduce this defect through Design of Experiments (DOE). The company where the study was performed manufactures components made of steel plate, which are likely to present this defect due to their high temperature ramp in the curing oven. During the initial planning of the study, several factors were considered critical. Those could be experimentally controlled with the objective to identify what are the most-related to the solvent-pop occurrence. As a start of this sequential work, a replicated fractioned factorial experiment was performed, seeking to eliminate some of the previously selected factors and better understand their levels and their contributions to the studied defect. Six factors were selected in this first experiment, resulting on sixteen treatments with a total of forty-eight sample specimens. The factor related to the paint-film thickness was the one that most contributed for the solvent-pop occurrence. Following a sequential approach, other experiment was performed with the objective to analyze the influence of the temperature in the curing process. Through this experiment, it was concluded that with the current paint and paint process, and in the studied component, it is not possible to produce components with only one paint finish coat that present both good coverage and absence of the solvent-pop defect.

Key words: Solvent-pop. Design of experiments. Fractioned factorial experiment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplo de bolha causada pelo defeito de fervura	10
Figura 2 - Correlação entre espessura de película de tinta e o número de bolhas	11
Figura 3 - Corpos de prova com (a) e sem (b) fervura	19
Figura 4 - Corpos de prova separados em níveis de fervura apresentados	20
Figura 5 - Gráfico de variabilidade dos resultados	21
Figura 6 - Desvio padrão de cada tratamento	22
Figura 7 - Transformação Box-Cox: λ calculado para a melhor transformação de dados	22
Figura 8 - ANOVA	23
Figura 9 - Resultados de cada grau de liberdade	23
Figura 10 - Gráfico de Pareto da influência dos graus de liberdade sobre o resultado	24
Figura 11 - Dados comparativos de E(-) e E(+) e teste t de comparação de média	25
Figura 12 - Espessura de película seca obtida em relação aos níveis do fator E	26
Figura 13 - Incidência de fervura em relação à espessura de película seca (EPS) medida nos corpos de prova	26
Figura 14 - Análise da interação DF	27
Figura 15 - Relação entre o fator B e a EPS medida	28
Figura 16 - Incidência de fervura em cada tratamento	30
Figura 17 - Espessura de película seca (EPS) atingida em cada tratamento	31
Figura 18 - Fervura x EPS	31
Tabela 1 - Fatores analisados no Experimento I	18
Tabela 2 - Níveis dos fatores em cada rodada experimental	18
Tabela 3 - Matriz de confundimento do Experimento I	21
Tabela 4 - Fatores do experimento II	30

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	7
2.	OBJETIVOS	9
2.1.	OBJETIVO GERAL	9
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	10
3.1.	O DEFEITO DE FERVURA	10
3.1.1.	Fatores relacionados	10
3.2.	DOE (<i>Design of Experiments</i>)	12
3.2.1.	Experimento fatorial de dois níveis	12
3.3.	VALIDAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS	13
3.3.1.	Transformação de dados	13
4.	MÉTODO	15
4.1.	TIPO DO ESTUDO	15
4.2.	LOCAL DO ESTUDO	15
4.3.	EXPERIMENTOS REALIZADOS	15
4.4.	VARIÁVEIS DO ESTUDO	15
5.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	17
5.1.	PRIMEIRO EXPERIMENTO	17
5.1.1.	Planejamento	17
5.1.2.	Resultados	19
5.1.3.	Conclusões para os fatores avaliados	28
5.2.	SEGUNDO EXPERIMENTO	29
5.2.1.	Planejamento	29
5.2.2.	Resultados	30
5.2.3.	Conclusões	32
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

A qualidade é um ponto chave para a garantia da satisfação de qualquer cliente e auxilia na redução dos custos de uma empresa, otimizando os processos com a redução de refugos de componentes, retrabalhos e desvios de processo. É fundamental, nesse sentido, que a identificação de quaisquer defeitos de qualidade ocorra o mais próximo possível do início do processo, devido ao significativo aumento no impacto do custo da qualidade.

A pintura fornece o acabamento ao motor e constitui grande parte da percepção do cliente em relação à qualidade do produto. Por esse motivo, é fundamental que haja um acabamento adequado para fornecer um bom aspecto visual do produto. O contexto deste estudo, contudo, trata-se de um motor industrial que será utilizado como componente-chave de outra máquina, e por esse motivo pode não ser visível ao consumidor final. Nestes casos, a função estética da pintura pode ser importante para a percepção da qualidade final do produto pelo cliente próprio, porém não é a função principal.

A função principal da pintura no motor elétrico é a proteção superficial do equipamento, principalmente contra o processo natural de corrosão – presente em maior intensidade em diversas aplicações devido ao ambiente mais agressivo, com presença de alta salinidade ou químicos. Como componente do produto em questão neste estudo, a pintura tem a função de proteção da superfície contra corrosão. É necessária uma espessura de camada mínima para que haja proteção adequada, garantindo maior tempo de vida útil do produto.

No Departamento Fabril em que será realizado este estudo, há um alto índice de defeitos de fervura na tinta de acabamento. A característica desse defeito é que a cura da extremidade da película de tinta inicia o processo de cura e acaba retendo uma quantidade de solvente, o que resulta em pequenas bolhas na película de tinta. Tecnicamente, a falha de proteção ocorre nesse ponto, pois onde estão presentes as bolhas, há uma menor espessura de camada de proteção, o que reduz significativamente a resistência a corrosão. A principal incidência deste defeito é em um componente fabricado em chapas de aço, que possui menor espessura que o restante do motor fabricado em ferro fundido.

Dentro desse contexto, busca-se responder à seguinte pergunta: quais os fatores que mais contribuem para a ocorrência do defeito de fervura na tinta de acabamento nos componentes de chapa de aço nos motores elétricos de carcaça de ferro fundido?

Para a tratativa de um problema relacionado à qualidade, é comum utilizarmos uma metodologia de resolução de problemas conforme orienta Campos (2014). Devido à alta

complexidade envolvendo uma grande quantidade de variáveis relacionadas ao defeito em questão e pela limitação dos recursos disponíveis para os experimentos, optou-se pela utilização da ferramenta *Design of Experiments* (DOE), realizando experimentos sugeridos por Montgomery (2012).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Identificar fatores significativos para o defeito de fervura na tinta de acabamento nas defletoras de chapa de aço dos motores da Fábrica I da WEG Motores.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar o processo de pintura onde são identificados os defeitos de fervura na camada de tinta aplicada nas defletoras de chapa de aço dos motores elétricos.
- Analisar os fatores relacionados ao processo e suas variáveis para determinar as contribuições de cada um para a ocorrência do defeito estudado;

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 O DEFEITO DE FERVURA

Durante o processo de cura de uma tinta, uma erupção do solvente aprisionado na película é o que gera a formação de pequenas bolhas, que podem ter diferentes formatos na superfície, com próprias bolhas em si ou pequenas crateras (PRENDI, 2008).

De acordo com Hazelwood (1998, p. 3, apud Schneberger, 1983) a “fervura aparece quando o solvente evapora tão rapidamente de uma película úmida (tinta) que a tinta líquida com o aumento da viscosidade é incapaz de fluir para dentro do espaço vazio”.

A **Figura 1** ilustra como a bolha presente na película de tinta reduz a espessura de película efetiva de proteção do substrato. A degradação da tinta é um processo natural que ocorre ao longo do tempo, e a partir do momento em que a degradação rompe a extremidade do filme, o vazio da bolha presente na película ficará exposto ao ambiente, praticamente eliminando a camada de proteção da tinta de acabamento.

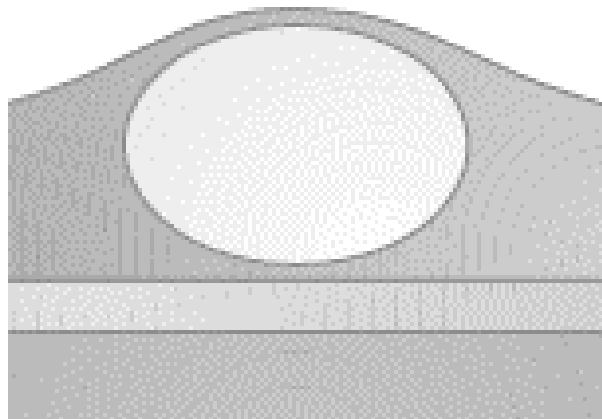


Figura 1 - Exemplo de bolha causada pelo defeito de fervura
Fonte: Adaptado de Standox (2020).

3.1.1 Fatores relacionados

McGinness (1988) apresenta um artigo técnico baseado nas propriedades físicas dos elementos químicos que constituem as tintas bicomponentes à base de poliuretanos (caso deste objeto de pesquisa). Neste estudo, são apontados diversos fatores que podem interferir diretamente no aparecimento de fervura, como alta espessura de película de tinta, solventes de evaporação rápida e aquecimento rápido em estufa. A associação entre alta velocidade de cura e baixo *potlife* da tinta também é citada pelo autor como agravante. Uma informação

específica apontada pelo autor é que uma de aplicação de tinta à base de uretano com espessura de camada acima de 2 milésimos de polegada (aprox. 50 μm) geralmente resulta em fervura, a menos que seja utilizado um solvente de evaporação lenta.

Hazelwood (1998) estudou 5 fatores em um DOE (*Design of Experiments*) para avaliar a relação de causa e efeito com a fervura. Em seus experimentos, concluiu que baixas temperaturas nas estufas de convecção e de radiação infravermelha reduzem a incidência de fervura, além de um catalisador ou acelerador de cura.

Prendi (2008) realizou um trabalho com o objetivo de avaliar a fervura em componentes automotivos de tintas à base d'água. Os parâmetros de aplicação da tinta foram controlados de maneira precisa devido à alta automação no processo. Em algumas fases dos experimentos propostos, houve uma alta taxa de ruído presente nos resultados, porém mesmo assim ficou evidente uma maior significância estatística atribuindo alta espessura de camada como a causa, conforme indica a Figura 2.

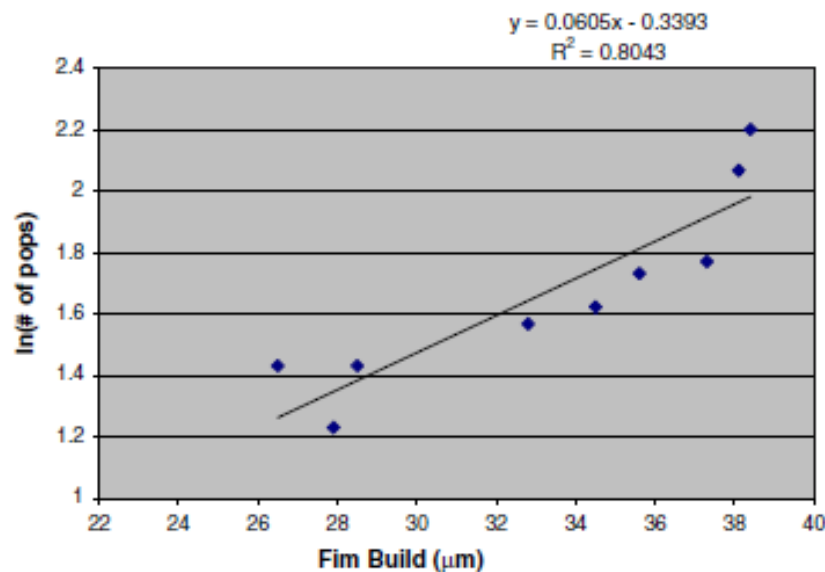


Figura 2 - Correlação entre espessura de película de tinta e o número de bolhas
Fonte: Prendi (2008).

Em outras rodadas de testes, outro fator estatisticamente significativo encontrado foi a temperatura da estufa. Fatores relacionados aos parâmetros de processo, como vazão da tinta e distância de aplicação da tinta não se mostraram significativos em nenhuma rodada. Apesar das descobertas, em seu estudo não foi possível obter um resultado que eliminasse totalmente o defeito.

Segundo Jassbi et al (2011), a alta espessura de película da tinta é um fator importante para a maioria dos defeitos de pintura, e que pode estar relacionada ao defeito de fervura.

3.2 DOE (*DESIGN OF EXPERIMENTS*)

De acordo com Montgomery (2012), métodos para o *design* de experimentos são de uma ampla aplicação em diversos temas. Adicionalmente, Montgomery (2020, p. 8) cita que “é uma ferramenta criticamente importante no mundo científico e de engenharia para a melhoria do processo de realização de produtos”.

Montgomery (2012, p. 12) cita três princípios básicos do *design* de experimentos, a saber: randomização, replicação e restrição. Segundo o autor, a randomização aumenta a probabilidade de que os erros experimentais sejam randômicos, distribuindo-os no experimento e evitando que se concentrem em uma etapa específica, o que poderia comprometer uma variável. A replicação, ou repetição, permite da mesma forma que haja uma amenização do impacto de um erro pontual, e possível identificação dele e atribuição como causa especial. A restrição (ou blocos) é uma técnica utilizada para melhorar a precisão das comparações entre diferentes fatores. Geralmente blocos são utilizados para avaliar a resposta experimental de diferentes combinações de fatores sobre os quais não há um interesse de conhecer individualmente.

3.2.1 Experimento fatorial

Segundo Montgomery (2012, p. 183), em um experimento fatorial, todas as combinações dos níveis dos fatores avaliados são investigadas. Como exemplo, podemos ter um experimento de dois níveis utilizando três fatores. Para termos todas as combinações possíveis executadas no experimento e analisadas, iremos precisar de 8 rodadas do experimento, pois a quantidade de rodadas em um experimento é dada por: $2^k = 2^3 = 8$. Neste caso, 2 é a quantidade de níveis em que as variáveis (fatores) foram selecionadas no experimento; e 3 (k) é a quantidade de fatores avaliados, logo 8 será a quantidade total de rodadas do experimento.

Considerando a forma de aplicação do experimento de fatorial completo e a necessidade supracitada de repetições em cada rodada de combinação dos fatores analisados, fica evidente o teste aplicado resultaria em uma quantidade relativamente alta de amostras, o que poderia encarecer ou até mesmo inviabilizar o experimento. Neste sentido, é proposto o tipo de experimento fracionado.

Experimentos fracionados, segundo Montgomery (2012), têm o objetivo de reduzir a quantidade de rodadas em um experimento por meio da utilização da matriz identidade no conjunto dos fatores, selecionando os graus de liberdade que têm menor possibilidade de significância estatística no experimento, matematicamente ou considerando a física da falha, sempre mantendo o balanceamento do experimento buscando minimizar os riscos.

Para elaborar de maneira mais otimizada um experimento com múltiplos fatores em que alguns deles sejam qualitativos, Montgomery (2012) sugere que o experimento ideal seja o fatorial fracionado de dois níveis. Neste caso, diversos fatores podem ser selecionados desde que a quantidade deles permita um número de rodadas factível e que proporcione uma resolução adequada do experimento.

É importante compreender o completo confundimento entre os graus de liberdade em que isso ocorre, a fim de que a interpretação dos resultados seja feita de forma correta. Um princípio citado por Montgomery (2012) para interpretarmos os resultados e elaborarmos experimentos de fatorial fracionado é a dispersão de efeitos: “quando há muitas variáveis, o processo ou sistema estará mais propenso a ser conduzido primariamente por efeitos principais ou pelas interações de baixa ordem”.

3.3 VALIDAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Segundo Montgomery (2012), análises estatísticas de dados, incluindo análises de DOE, exigem que pelo menos dois princípios básicos sejam atendidos:

- A. Variância constante;
- B. Erro normalmente distribuído.

Quando algum desses pré-requisitos não é atendido, o resultado da análise de dados pode resultar em decisões erradas, por meio de como alarmes falsos (risco alfa) ou negligências (risco beta). Para minimizar esses riscos em dados que violam tais condições, os dados devem sofrer uma transformação matemática (MONTGOMERY, 2012).

3.3.1 Transformação de dados

A transformação de dados é uma ferramenta de análise quantitativa utilizada para linearizar os dados de um experimento planejado.

Em experimentos replicados, existe um risco maior de violar o princípio da variância constante. Já em experimentos não replicados, o erro pode não estar normalmente distribuído quando o experimento gera muita variação. Em ambos os casos, uma análise dos princípios se torna fundamental antes de prosseguir com os cálculos estatísticos.

Segundo Osborne (2010), uma forma de avaliar com maior eficácia qual transformação de dados deve ser utilizada na análise estatística do experimento é o critério de transformação Box-Cox, o qual será utilizado neste trabalho. A base do critério é dada por um parâmetro “ λ ” estimado pelo *software* JMP®, utilizado para as análises estatísticas dos experimentos realizados neste trabalho, conforme equação 1.

$$y_i^{(\lambda)} = \begin{cases} \frac{y_i^\lambda - 1}{\lambda}; & \lambda \neq 0 \\ \ln y_i^\lambda; & \lambda = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Uma vez obtido o valor do “ λ ”, basta comparar com a lista de recomendações e definir a forma de transformação que deve ser aplicada nos dados.

$\lambda = 1$: não há a necessidade de transformar os dados;

$\lambda = 0,5$: raiz quadrada [$Y^{0,5}$];

$\lambda = 0,33$: raiz cúbica [$Y^{0,33}$];

$\lambda = 0,25$: raiz quarta [$Y^{0,25}$];

$\lambda = -0,5$: inverso da raiz quadrada [$1/Y^{0,5}$];

$\lambda = -1$: transformada inversa [$1/Y$].

4 MÉTODO

4.1 TIPO DO ESTUDO

Trata-se de um estudo experimental com abordagem quantitativa acerca da análise da influência de fatores relacionados ao processo de pintura e suas variáveis para a incidência do defeito de fervura no objeto de estudo.

4.2 LOCAL DO ESTUDO

O local de aplicação do estudo foi na área de pintura especial na Fábrica I da empresa WEG Equipamentos Elétricos S.A., unidade Motores. A empresa está localizada em Jaraguá do Sul, interior do estado de Santa Catarina. Nesta fábrica em questão, são produzidos diariamente aproximadamente 3.500 unidades de motores elétricos monofásicos e trifásicos de baixa tensão. Todos os experimentos foram realizados no plano de pintura especial da fábrica citada.

4.3 EXPERIMENTOS REALIZADOS

Em todos os experimentos elaborados, a principal variável-resposta considerada foi a presença de fervura nos corpos de prova avaliados.

Cada experimento foi conduzido dentro das seguintes etapas:

- a. Preparação da tinta a ser aplicada;
- b. Processo de aplicação da tinta nos corpos de prova (manual, com pistola de ar comprimido);
- c. Passagem dos corpos de prova em estufa de cura (com aquecimento por resistências).

4.4 VARIÁVEIS DO ESTUDO

O estudo foi focado em variáveis que podem ser classificadas da seguinte forma (REIS; REIS, 2002):

- Qualitativa Nominal (QLN): categorias nominais em que não há ordenação entre elas;
- Qualitativa Contínua (QTC): características mensuráveis em escala contínua.

As variáveis controladas no neste estudo são descritas a seguir acompanhadas de sua classificação

- Quantidade de catalisador na preparação da tinta (QTC);
- Quantidade de solvente utilizado na tinta (QTC);
- Tempo entre preparação da tinta e aplicação no corpo de prova (QTC);
- Passagem por estufa de pré-aquecimento (QLN);
- Espessura de camada de tinta (QTC);
- Tempo de *flash-off* (QTC);
- Temperatura da estufa de cura (QTC).

Todas foram levantadas a partir de uma avaliação do processo por profissionais técnicos da área e pelo autor e por leituras técnicas adicionais descritas no capítulo relacionado ao referencial teórico. Os níveis das variáveis especificados originalmente no processo, bem como após este estudo, foram em sua maioria omitidos para evitar restrições de publicação.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

As variáveis em avaliação dentro de cada etapa tiveram tratativas específicas em cada experimento conduzido. Em seguida, todos os corpos de prova foram avaliados por um inspetor de pintura e os resultados registrados para análise.

5.1 PRIMEIRO EXPERIMENTO

5.1.1 Planejamento

Na primeira etapa deste estudo foi realizado um fatorial fracionado com variáveis controladas (fatores) em dois níveis.

Foram utilizados corpos de prova de chapa de aço – mesmo material utilizado para a produção do componente em questão neste estudo. Os corpos de prova foram fornecidos pintados com tinta a pó por meio de pintura eletrostática na cor preta, conforme o processo normal de fabricação.

A pintura de acabamento crítica neste estudo é líquida com base em poliuretano (PU) e foi aplicada nos corpos de prova no local do estudo por meio de pistola de ar comprimido, seguindo o processo atual.

Este primeiro experimento teve um objetivo mais exploratório, para que fosse possível um melhor delineamento dos parâmetros que serão avaliados mais à frente. O objetivo foi avaliar a capacidade de reproduzir a falha e identificar características e condições que poderiam se apresentar como não significativas, para não serem consideradas nas próximas etapas experimentais.

No experimento inicial, as variáveis listadas em 4.4 foram organizadas por fonte de ruído característico à investigação, e separados os níveis em cada uma delas conforme a **Tabela 1**. Os níveis foram separados em "+" e "-" para diferenciação e posterior análise estatística dos dados.

Tabela 1 - Fatores analisados no Experimento I

Processo/etapa	Variável controlada	Nível (-)	Nível (+)
Preparação da tinta	A: Quantidade de catalisador	Proporção de 5:1	Proporção de 4:1
	B: Quantidade de solvente	10%	20%
	C: Tempo entre preparação da tinta e aplicação no corpo de prova (<i>potlife</i>)	15 min	2h 30min
Aplicação da tinta	D: Passagem por estufa de pré-aquecimento da peça	Sem	Com
	E: Quantidade de passagens da pistola com tinta de acabamento sobre o corpo de prova	4	6
Cura da tinta	F: Tempo de <i>flash-off</i>	5 min	20 min

Fonte: O autor (2020).

Uma variável levantada como tendo forte influência no processo para a ocorrência de fervura é a temperatura na estufa de cura. Porém, não foi considerada neste experimento inicial devido à dificuldade de controle no processo em meio à produção diária. A **Tabela 2** apresenta a matriz utilizada como base para selecionar os níveis de cada fator em cada tratamento/rodada do experimento.

Tabela 2 - Níveis dos fatores em cada rodada experimental

Tratamento	A	B	C	D	E	F
1	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	+	+	+
3	-	-	+	-	+	+
4	-	-	+	+	-	-
5	-	+	-	-	+	-
6	-	+	-	+	-	+
7	-	+	+	-	-	+
8	-	+	+	+	+	-
9	+	-	-	-	-	+
10	+	-	-	+	+	-
11	+	-	+	-	+	-
12	+	-	+	+	-	+
13	+	+	-	-	+	+
14	+	+	-	+	-	-
15	+	+	+	-	-	-
16	+	+	+	+	+	+

Fonte: O autor (2020).

Outras variáveis foram fixadas com o objetivo de reduzir ruídos experimentais indesejáveis, a saber:

- Tinta de acabamento – Amarelo com base de PU (poliuretano): tinta selecionada para avaliação, pois é a que mais apresenta defeitos de fervura;
- Velocidade de passagem na estufa de cura: mantida a mesma velocidade de passagem do processo normal;
- Presença de retardador de secagem: sem, conforme processo normal;
- Temperatura na estufa de cura: mantida temperatura programada conforme operação normal;
- Tipo de solvente: mantido o solvente padrão do processo.

Independentemente do controle tomado nas variáveis já levantadas, ainda pode haver um ruído experimental considerável, pois há inúmeras etapas do processo de execução do experimento que podem apresentar diferentes variações difíceis de serem controladas, principalmente em um ambiente fabril, desde a preparação da tinta até o manuseio dos corpos de prova, setup de equipamentos e aplicação de pintura. Por esse motivo, foi utilizada a estratégia de réplica, buscando possibilitar a estimativa de cálculo desses ruídos. Assim, foram definidos três corpos de prova por combinação de fatores da árvore de amostragem. Como cada tratamento (combinação de fatores) teve três corpos de prova, tivemos um total de 48 corpos de prova avaliados.

5.1.2 Resultados

Foi possível reproduzir a falha. Inclusive, foi possível separar a intensidade de fervura em diferentes níveis para melhorar a análise do experimento. A **Figura 3** e a **Figura 4** ilustram os resultados.

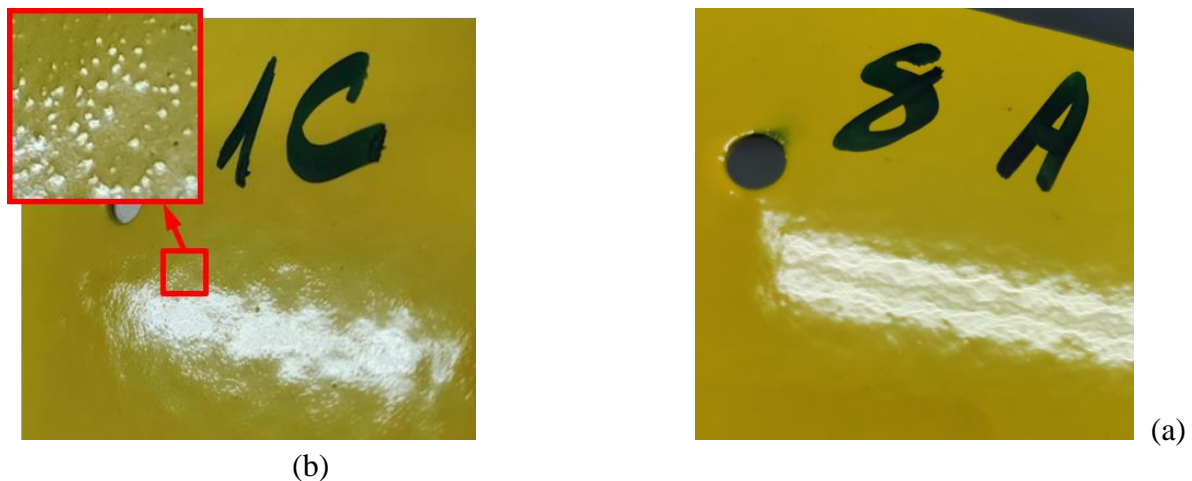


Figura 3 - Corpos de prova com (a) e sem (b) fervura
Fonte: O autor (2020).

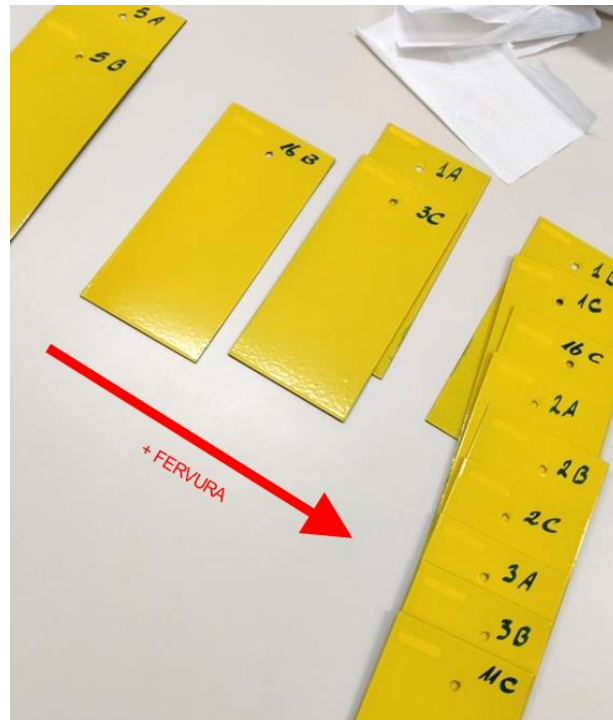


Figura 4 - Corpos de prova separados em níveis de fervura apresentados
Fonte: O autor (2020).

Foram determinados níveis de incidência do defeito de fervura em cada corpo de prova com o objetivo de quantificar a variável-resposta, possibilitando o cálculo estatístico da contribuição de cada fator para resultar no defeito. Os níveis foram determinados como 1, 3, 5, 7 e 10; sendo 1 dado para corpos de prova que não apresentaram fervura e 10 aos corpos de prova com alta incidência de fervura.

A **Figura 5** representa graficamente os níveis de incidência de fervura definidos nos três corpos de prova de cada tratamento (combinação de fatores).

Para iniciar a avaliação estatística, devem ser selecionados os graus de liberdade corretos para a resolução adotada ao experimento no momento do seu planejamento.

A **Tabela 3** apresenta os graus de liberdade selecionados para o experimento que foi planejado. Como é um experimento de 16 tratamentos, apenas é possível quantificar os efeitos de 15 graus de liberdade. Neste caso, os graus de liberdade em cada linha da matriz de confundimentos representam os graus de liberdade que estão confundidos, isto é, sendo contabilizados como um só. Geralmente nos confundimentos, apenas um dos graus de liberdade envolvidos é de fato significativo. Para selecionarmos o grau de liberdade correto na análise, é utilizado o princípio da dispersão, em que interações de menor ordem estão mais propensas a ter efeito na variável resposta, bem como a significância estatística dos fatores

das interações envolvidas, e ainda uma interpretação prática/física das interações, conforme sugere Montgomery (2012).

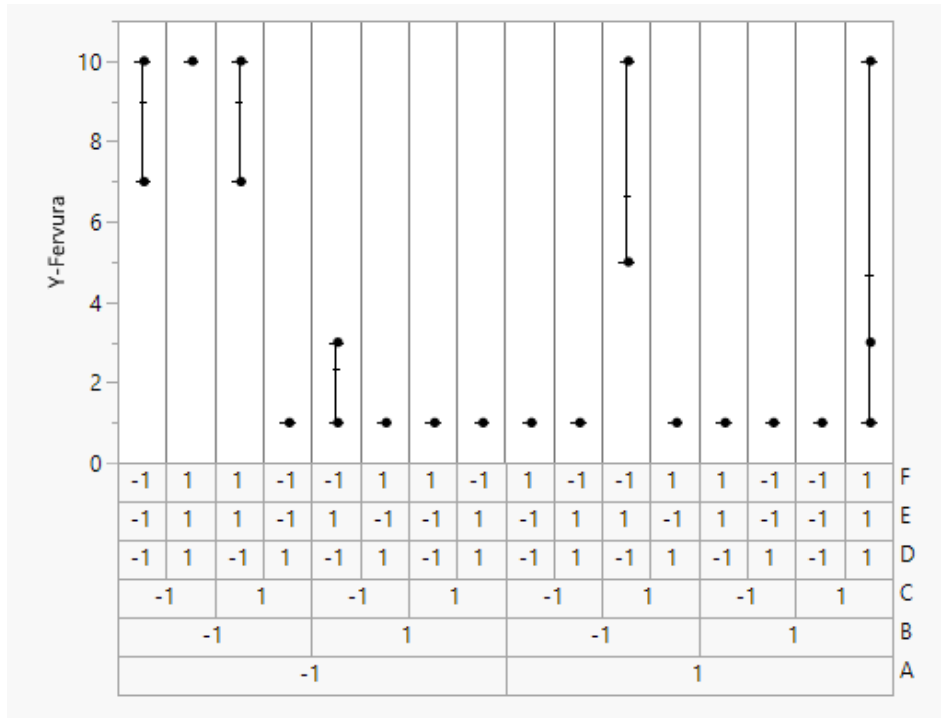


Figura 5 - Gráfico de variabilidade dos resultados
Fonte: O autor (2020).

Tabela 3 - Matriz de confundimento do Experimento I
Matriz ou Estrutura de confundimento

AF = BE = CD
AE = BF
BD = CE
AD = CF
BC = DE
AC = DF
AB = EF
F = ABE = ACD
E = ABF = BCD
ABD = ACE = BCF = DEF
D = ACF = BCE
ABC = ADE = BDF = CEF
C = ADF = BDE
B = AEF = CDE
A = BEF = CDF

Fonte: O autor (2020).

Conforme citado no item 3.3, é necessário avaliar se há variância constante nos resultados. A **Figura 6** mostra o desvio padrão em cada resultado, sendo possível perceber

que a variância (matematicamente o quadrado do desvio padrão) não é constante nos resultados entre os tratamentos avaliados.

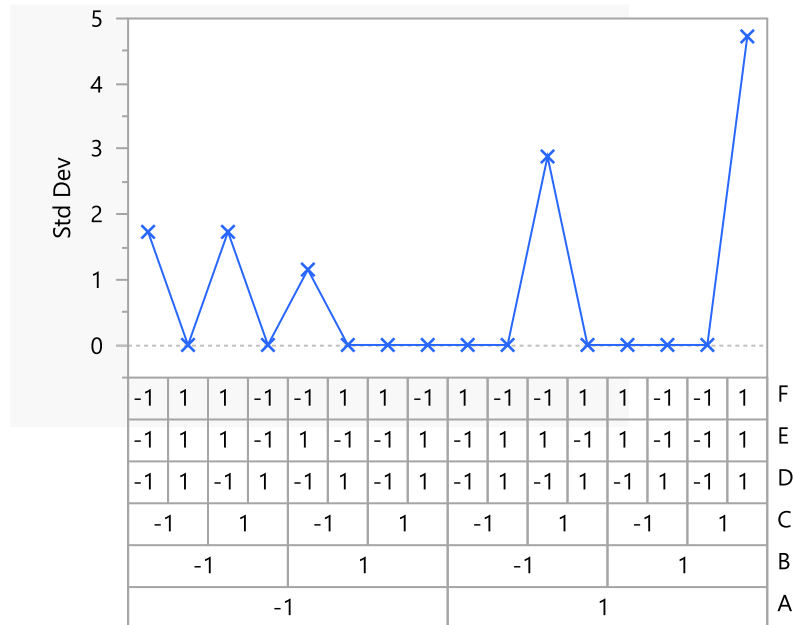


Figura 6 - Desvio padrão de cada tratamento
Fonte: O autor (2020).

Desse modo, torna-se necessária a transformação de dados conforme 3.3.1. A estimativa do λ (**Figura 7**) pelo *software JMP®* para a transformação de dados utilizada gera automaticamente novos dados para análise. A partir deste ponto nas análises seguintes, são utilizados os dados transformados.

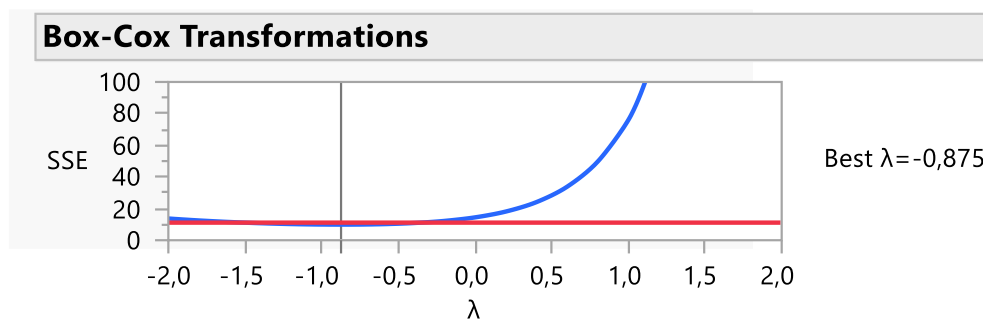


Figura 7 - Transformação Box-Cox: λ calculado para a melhor transformação de dados
Fonte: O autor (2020).

O cálculo de ANOVA para o experimento (**Figura 8**) mostra que a variação gerada pelo modelo (*Model*) é significativamente maior do que a variação gerada pelos ruídos experimentais (*Error*). Isto quer dizer que as réplicas realizadas tiveram um resultado consistente entre si, com relativamente pouca variação, validando a continuidade da análise.

Analysis of Variance				
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	15	93,74824	6,24988	20,2643
Error	32	9,86941	0,30842	Prob > F
C. Total	47	103,61765		<,0001 *

Figura 8 - ANOVA
Fonte: O autor (2020).

Deste modo, é prosseguida a análise utilizando a ferramenta *Fit Model*, selecionando os graus de liberdade à esquerda na matriz de confundimentos (**Tabela 3**). Esta ferramenta faz toda a análise dos dados desde o cálculo dos efeitos de cada grau de liberdade até a significância estatística de cada um deles, por meio do teste t.

A **Figura 9** demonstra os resultados obtidos nas rotinas de cálculo. Vemos que 11 dos 15 graus de liberdade analisados mostraram-se estatisticamente significativos no experimento. A coluna *Prob>|t|* refere-se a testes t aplicados em cada grau de liberdade, destacando aqueles significativos considerando alfa = 0,05. Além do fato de termos consistência nos resultados, isto se deve também pela análise ter sido feita com dados discretizados.

Term	Estimate	Std Error	t Ratio		Prob> t
E	0,6182611	0,080159	7,71		<,0001 *
A*C	0,6182611	0,080159	7,71		<,0001 *
B	-0,591216	0,080159	-7,38		<,0001 *
A*B	0,4477116	0,080159	5,59		<,0001 *
B*D	0,4119772	0,080159	5,14		<,0001 *
A	-0,407701	0,080159	-5,09		<,0001 *
D	-0,371967	0,080159	-4,64		<,0001 *
A*D	0,2284625	0,080159	2,85		0,0076 *
A*B*D	0,2084219	0,080159	2,60		0,0140 *
A*F	-0,181377	0,080159	-2,26		0,0306 *
A*B*C	-0,181377	0,080159	-2,26		0,0306 *
F	0,0378723	0,080159	0,47		0,6398
B*C	0,0378723	0,080159	0,47		0,6398
C	0,0021379	0,080159	0,03		0,9789
A*E	0,0021379	0,080159	0,03		0,9789

Figura 9 - Resultados de cada grau de liberdade
Fonte: O autor (2020).

A significância estatística de muitos graus de liberdade sugere uma análise para avaliar se os seus efeitos seguem o Princípio de Pareto, isto é, se apenas alguns deles são responsáveis por grande parte da variação no processo (CAMPOS, 2014). A **Figura 10** apresenta esta análise.

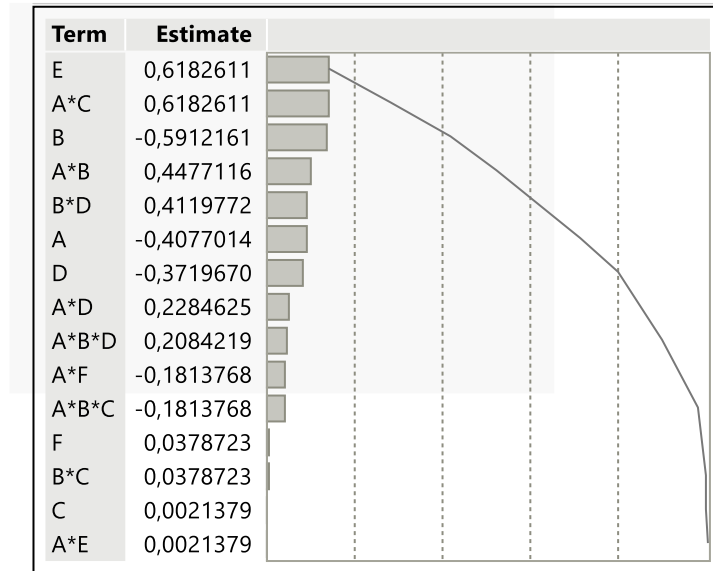


Figura 10 - Gráfico de Pareto da influência dos graus de liberdade sobre o resultado
Fonte: O autor (2020).

O gráfico de Pareto mostra que não houve graus de liberdade que se destacaram para podermos afirmar com clareza ainda se há algum ou alguns deles que podem na prática determinar os resultados com maior precisão. Neste ponto da análise, estamos correndo risco beta, isto é, os resultados podem estar negligenciando graus de liberdade realmente significativos.

Desse modo, iremos realizar uma análise maior dos resultados dos primeiros graus de liberdade listados no Pareto. O fator E foi aparentemente o mais significativo, enquanto os fatores A e B aparecem nos 5 seguintes, mesmo que em interações de segunda ordem.

O fator E avaliado teve o objetivo de aplicar sobre os corpos de prova diferentes níveis de espessura de película seca (EPS) da tinta de acabamento, buscando comparar esta característica à incidência de fervera. Da experiência no processo, conhecemos que há dificuldade em controlar a espessura de camada da tinta aplicada, principalmente por se tratar de uma aplicação manual com pistola, onde não há controles como velocidade e distância de aplicação, pressão exercida na pistola, entre outras. Assim, foram medidas as espessuras de película seca de todos os corpos de prova e relacionadas com os níveis do fator E estudado. Foi verificada a normalização dos resultados e realizado teste t, o qual mostrou que há diferença na média de EPS entre os níveis (-) e (+) do fator E.

Para avaliar a diferença entre as médias, devemos realizar um teste t (MONTGOMERY, 2012). Um dos critérios para este é que os dados possam ser representados por curvas normais, o que pode ser confirmado pelo teste de *Anderson-Darling* (ANDERSON; DARLING, 1954). Os resultados do teste tanto para os níveis (-) e (+) de E

mostrou *p-values* entre 0,3 e 0,5. Isto quer dizer que podemos considerar a hipótese nula, isto é, que os dados seguem a distribuição comparada. Neste caso, a normal.

O teste t demonstrou que as médias podem ser matematicamente consideradas diferentes conforme demonstrado na **Figura 11**, o que validou a análise dos resultados considerando o fator E até então.

Os dados de E(-) e E(+) para a EPS foram então comparados conforme a **Figura 12**. A partir deste gráfico conclui-se que, apesar de haver significância estatística para concluirmos que E(-) e E(+) são matematicamente diferentes, a ineficácia do controle no experimento resultou em uma sobreposição grande dos resultados. Na prática, um controle maior da espessura de camada poderia resultar em um maior efeito, podendo aumentar a influência do fator E no Pareto apresentado na **Figura 10**.

De maneira prática, foi comparada a EPS com a incidência de fervera determinada pelo inspetor nos corpos de prova, o que nos leva à **Figura 13**. O gráfico mostra uma linha de corte a partir de 140 μm^1 , em que praticamente todos os corpos de prova tiveram uma incidência de fervera acentuada.

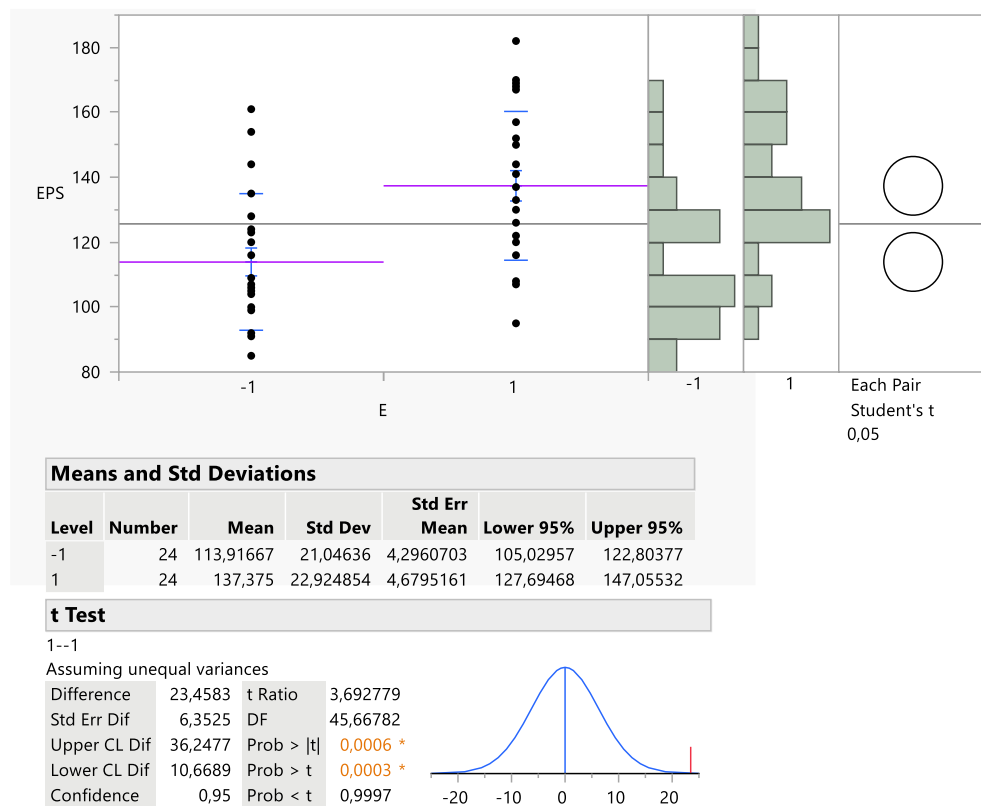


Figura 11 - Dados comparativos de E(-) e E(+) e teste t de comparação de média
Fonte: O autor (2020).

¹ A EPS nestes corpos de prova consiste na medição de toda a película de tinta seca, tanto a tinta a pó de fundo, quanto à tinta de acabamento, a qual é o objeto de estudo deste trabalho.

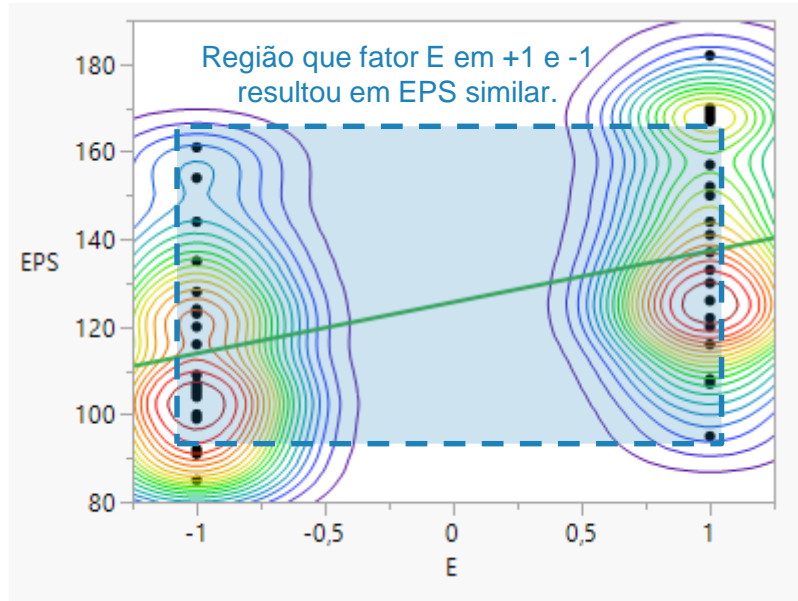


Figura 12 - Espessura de película seca obtida em relação aos níveis do fator E
 Fonte: O autor (2020).

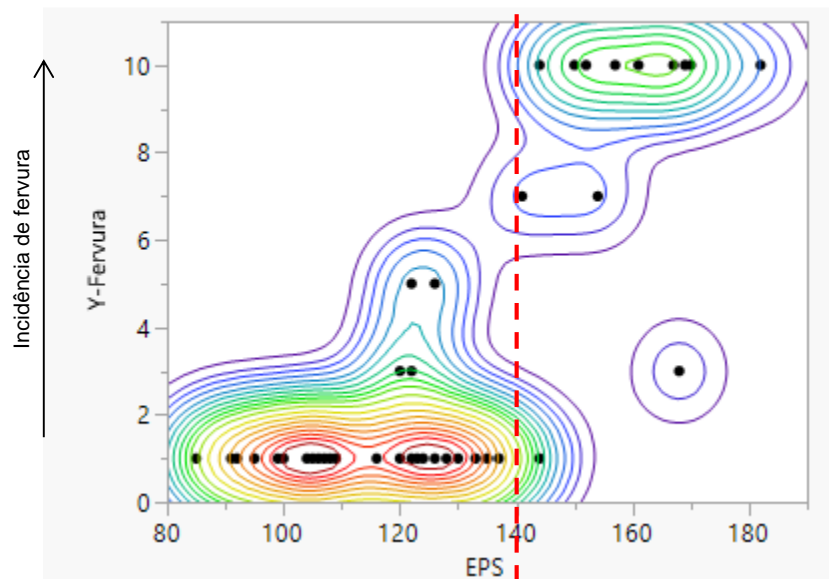


Figura 13 - Incidência de fervura em relação à espessura de película seca (EPS) medida nos corpos de prova
 Fonte: O autor (2020).

Deve-se considerar, contudo, que os corpos de prova que não apresentaram fervura não tiveram cobertura suficiente da tinta, isto é, a camada da tinta de acabamento (amarela) possui regiões em que é possível ver a tinta de fundo, neste caso, preta. Comparando com os valores especificados de espessura da tinta de fundo e acabamento para o processo, o total de 140 μm ainda estaria dentro dos limites de especificação, o que significa que para garantir uma boa cobertura da tinta, é necessário atingir uma espessura de película maior do que a máxima especificada, que acaba resultando em fervura.

O segundo grau de liberdade mais significativo foi AC. De acordo com a matriz de confundimento (**Tabela 3**), a interação AC se confunde com a interação DF. Como ambas são de segunda ordem, é importante uma avaliação física de uma eventual interação dos fatores relacionados. A e C são respectivamente quantidade de catalisador na mistura da tinta e tempo entre preparação e aplicação, enquanto D e F são respectivamente passagem por estufa de pré-aquecimento e tempo de *flash-off*. Isoladamente, os fatores das duas interações tiveram influência próximas na incidência de fervura (ver posições no gráfico de Pareto da **Figura 10 - Gráfico de Pareto da influência dos graus de liberdade sobre o resultado**). A segunda interação (DF) é a que mais faz sentido fisicamente estar relacionada.

A **Figura 14** ilustra como os níveis dos fatores na interação DF influenciam nos resultados. Quando o fator F estiver no nível +1 (*flash-off* de 20 min), os níveis de D terão pouca influência na incidência de fervura. Por outro lado, quando F for -1 (*flash-off* de 5 min) e D for +1 (com passagem na estufa de pré-aquecimento), a interação resultará em uma menor incidência de fervura.

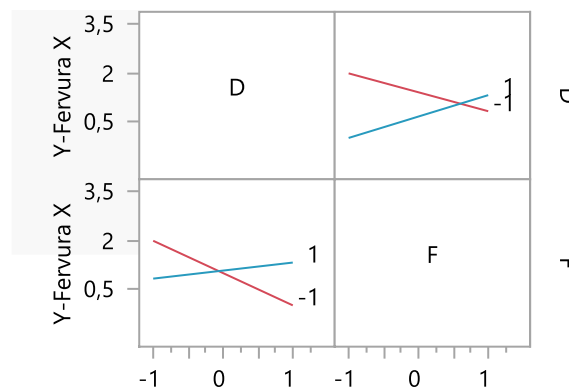


Figura 14 - Análise da interação DF
Fonte: O autor (2020).

Em relação ao fator B, seu efeito ($= 2 * Estimate$) mostrado na **Figura 9** foi negativo, o que na prática quer dizer que quando houver maior quantidade de solvente na tinta (B+) resultará em uma menor incidência de fervura. Este resultado de certo modo não condiz muito com a teoria da física da falha, que sugere que a fervura é causada por vazios deixados pelo solvente, o que neste caso mais solvente deveria, ou poderia, resultar em maior incidência de fervura. Em uma análise prática da influência do fator B à Espessura de Película Seca (EPS) atingida, mostrada na **Figura 15**, percebemos que na verdade o fator B contribuiu para resultar em uma menor espessura de película de tinta, o que de fato contribuiu para uma menor incidência de fervura.

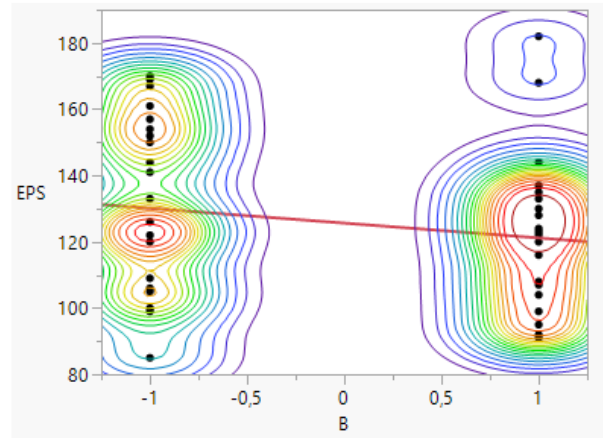


Figura 15 - Relação entre o fator B e a EPS medida
Fonte: O autor (2020).

Para entender melhor como uma maior quantidade de solvente resultou em uma menor EPS, devemos observar que em um certo volume de tinta “X”, poderia haver menor (B-) ou maior (B+) quantidade de solvente, respectivamente com maior ou menor volume da tinta per se. Desse modo, o solvente irá evaporar e resultar em uma menor EPS. Pode-se assim concluir que a quantidade de solvente influenciou indiretamente na incidência de fervura.

Quanto aos demais graus de liberdade, apesar de alguns deles apresentarem significância estatística, podemos considerar que de maneira prática não influenciam de forma considerável a variável-resposta monitorada, isto é, tiveram pouco efeito.

5.1.3 Conclusões para os fatores avaliados

Foi possível tomar as seguintes conclusões para os fatores avaliados:

- A quantidade de passadas de tinta nos corpos de prova (fator E) foi estatisticamente significativa para a incidência de fervura nos corpos de prova avaliados. Verificamos que se o controle tivesse sido sobre a EPS, o efeito poderia ter sido mais significativo;
- A quantidade de catalisador (fator A) e a quantidade de solvente (fator B) tiveram significância estatística identificada, mas pouco efeito para a incidência de fervura na prática. Foi verificado ainda que o fator B teve relação direta com a EPS atingida, com efeito indireto na incidência de fervura;
- A passagem dos corpos de prova pela estufa de pré-aquecimento (fator D) apresentou significância estatística, porém teve pouco efeito para a redução da fervura, apesar de ser relevante para reduzir outros defeitos de pintura;

- O tempo entre a preparação e a aplicação da tinta (fator C) e o tempo de *flash-off* (fator F) não foram estatisticamente significativos para a incidência de fervura.

No experimento I, a falha foi reproduzida e alguns dos fatores estudados puderam ser desconsiderados para experimentos seguintes, cumprindo os objetivos propostos.

5.2 SEGUNDO EXPERIMENTO

5.2.1 Planejamento

Concluído o fatorial fracionado, foi possível com suas conclusões retirar algumas das variáveis do estudo. Adicionalmente, foram tomadas as seguintes tratativas para o experimento seguinte:

- Comparar comportamento da cor amarela (objeto de estudo até então) com a cor mais comum do processo (azul);
- Medir a EPS tinta de fundo antes de pintar cada corpo de prova, a fim de se avaliar a EPS somente da camada de acabamento;
- Avaliar a temperatura de cura na estufa.

Adicionalmente, devido à dificuldade no controle de espessura de camada no experimento 1, foi proposto neste segundo experimento um maior número de corpos de prova por tratamento (réplicas), aumentando de 3 para 6, com o objetivo de proporcionar uma variação maior na espessura de camada que possa ser analisada em cada tratamento.

O fator desejado a ser estudado é o aumento da temperatura dos corpos de prova ao longo do tempo. O objetivo é avaliar a influência de uma redução na rampa de aceleração da temperatura no início do processo, com o objetivo de retardar brevemente a cura da tinta, buscando facilitar a evaporação do solvente evitando a formação de microbolhas (fervura). Para avaliar esta condição, foi utilizada a estratégia de restrição (bloco), conforme orienta Montgomery (2012). O bloco nesse caso foi chamado de “Condição de cura”, tendo como características a redução da temperatura na primeira resistência de aquecimento da estufa de cura e a utilização da estufa de pré-aquecimento (utilizada no experimento 1 como fator D) após a pintura do motor, buscando submeter o motor a uma temperatura menor do que a encontrada dentro da estufa. O bloco *Condição de cura* foi avaliado em 4 situações diferentes, variando tanto a temperatura máxima para a primeira bateria de resistências de aquecimento

da estufa (T_R1), como a passagem (ou não) pela estufa de pré-aquecimento (que atinge aprox. 40°C) após a pintura.

A **Tabela 4** a seguir mostra os parâmetros avaliados neste experimento.

Tabela 4 - Fatores do experimento II	
Fator	Nível
Condição de Cura	I - T_R1 menor / sem passagem
	II - T_R1 normal / sem passagem
	III - T_R1 menor / com passagem
	IV - T_R1 normal / com passagem
Cor	Azul
	Amarela

Fonte: O autor (2020).

5.2.2 Resultados

Onde a fervura foi classificada como 3 houve apenas um nível de fervura considerado ameno em uma região pontual do corpo de prova avaliado, enquanto as classificações de 7 e 10 já seriam consideradas peças rejeitadas no processo. A classificação foi dada aos corpos de prova que não apresentaram nenhum tipo de fervura.

Inicialmente plotamos os dados obtidos em cada tratamento **Figura 16** a fim de avaliar de forma prática os resultados obtidos.

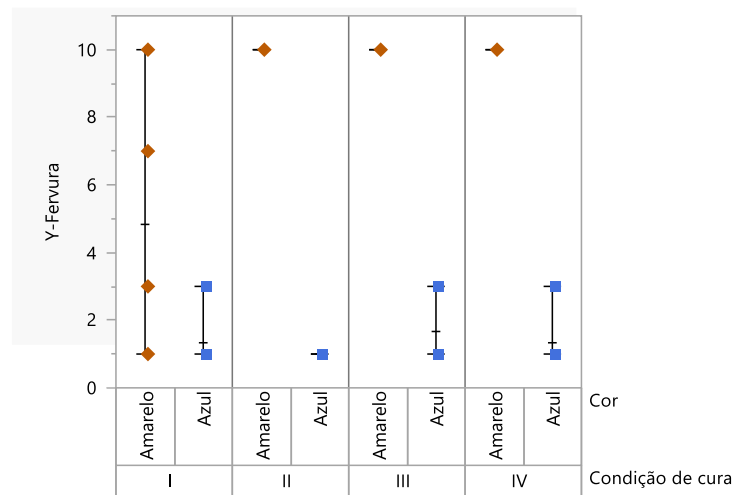


Figura 16 - Incidência de fervura em cada tratamento
Fonte: O autor (2020).

A **Figura 16** mostra que os corpos de prova de cor azul praticamente não apresentaram fervura, enquanto os corpos de prova na cor amarela tiveram alta probabilidade de incidência de fervura, e somente não apresentaram fervura na condição de cura I.

Devido à relação da fervura com a espessura de película seca do corpo de prova, a **Figura 17** foi elaborada com o objetivo de compararmos novamente a EPS com a fervura. Nesta, percebemos que os corpos de prova na cor amarela estão todos com EPS acima dos corpos de prova na cor azul.

Na **Figura 18**, vemos que os corpos de prova os dois corpos de prova da cor amarela que não apresentaram fervura estão com a espessura de camada dentro do limite especificado. Porém, na prática, a camada de tinta não foi suficiente para fornecer uma boa cobertura.

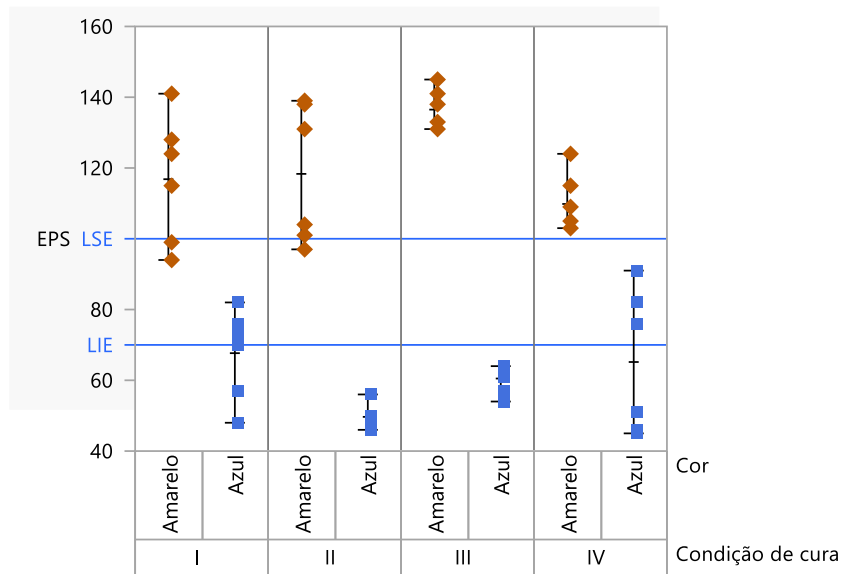


Figura 17 - Espessura de película seca (EPS) atingida em cada tratamento
Fonte: O autor (2020).

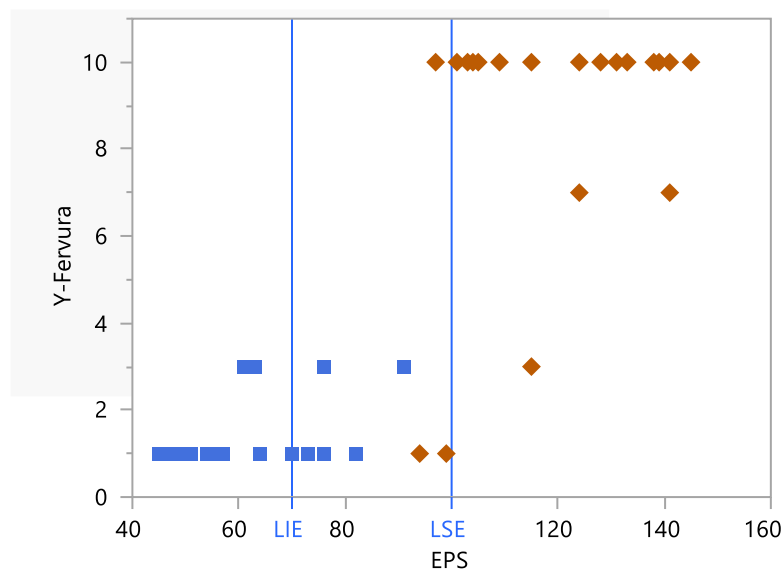


Figura 18 - Fervura x EPS
Fonte: O autor (2020).

Abaixo resumo dos resultados para cada variável-resposta avaliada.

- Espessura de camada (somente PU: mín. 70 e máx. 100 μm):
 - Peças azuis: de 45 a 91 μm ;
 - Peças amarelas: de 94 a 145 μm ;
- Cobertura:
 - Peças azuis: cobertura ok a partir de 60 μm ;
 - Peças amarelas: cobertura ok somente a partir de 110 μm . Cabe observar que em todas as peças amarelas que apresentaram boa cobertura, apresentaram também fervura;
- Fervura:
 - Peças azuis: somente 4 corpos de prova apresentaram pequenos pontos com fervura;
 - Peças amarelas: somente 2 corpos de prova não apresentaram fervura, porém apresentaram falta de cobertura.

5.2.3 Conclusões

Neste segundo experimento foi possível concluir que, seguindo o processo normal atual, buscando atingir uma camada suficiente para haver cobertura, não é possível produzir peças de chapa de aço sem o defeito de fervura. As alternativas propostas no fator *Condições de cura* não foram suficientes para amenizar os efeitos da espessura de camada nos corpos de prova de cor amarela.

Adicionalmente, antes de ser iniciado o segundo experimento, foi realizada uma avaliação da cura da tinta em relação à temperatura e tempo de passagem em estufa de cura. Depois de realizada uma análise termográfica² da estufa de cura, foi solicitada uma análise em laboratório da tinta desejada para avaliar se há potencial para redução da temperatura na estufa. A conclusão preliminar foi que o produto sai da estufa com o mínimo de cura aceitável, não havendo margem para reduzir a temperatura de cura ou ciclo do processo atual.

Desse modo, concluímos que com o tempo de ciclo atual no processo, não é possível reduzir de maneira contundente a incidência de fervura nos componentes de chapa de aço.

² A análise termográfica realizada na fábrica em questão consiste em monitorar a temperatura de um objeto de estudo ao longo da estufa de cura por meio de sensores de temperatura, buscando identificar as condições de aumento e redução de temperatura ao longo do ciclo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a metodologia do experimento fatorial fracionado, é possível reduzir consideravelmente o número de amostras em relação a um experimento fatorial completo, sem perder a qualidade nas análises iniciais. Com esta abordagem inicial, e seguindo um método sequencial de estudo, foi possível realizar outro experimento com mais foco nos fatores mais significativos.

Dos fatores considerados críticos inicialmente no processo, apenas a espessura de película de tinta foi possível de ser identificada como crítica para a ocorrência do defeito de fervura. Alguns fatores não tiveram significância estatística verificada e outros tiveram relação direta com a espessura de película verificada, contribuindo com a fervura de maneira indireta.

Diante das dificuldades em manipular o processo de produção normal e da verificada limitação no processo atual para garantir uma cura aceitável do componente avaliado, não foi possível simular uma condição de temperatura para que houvesse cura de tinta e não ocorrência de fervura com a tinta que é objeto de estudo deste trabalho.

Desse modo, é sugerido neste momento de modo paliativo que os componentes na cor amarela avaliada sejam pintados com duas demãos, passando duas vezes pela estufa de cura. Adicionalmente, o processo de fabricação da tinta amarela deve ser avaliado para garantir maior cobertura sobre o substrato – atualmente há diferenças em relação ao processo de fabricação da tinta amarela (e cores similares) e a azul que podem estar prejudicando esta característica.

Com a análise do processo e a identificação dos principais fatores relacionados aos defeitos de fervura, os objetivos deste trabalho foram alcançados. Adicionalmente, foram sugeridas ações para atuar na amenização do problema.

Sugere-se ainda um aprofundamento maior sobre a influência da temperatura, possivelmente por meio de um experimento controlado em laboratório, a fim de definir ações para o processo de cura de tinta na área especial de pintura da fábrica.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, T. W.; DARLIN, D. A. A Test of Goodness of Fit. **Journal of the American Statistical Association**, v. 49, n. 268, p.765-769, 1954.

CAMPOS, V. F. **TQC: Controle da Qualidade Total** (no estilo japonês). 9.ed. São Paulo: Falconi, 2014.

HAZELWOOD, St. **Preventing Solvent Pop**. Products Finishing, out. 1998. Disponível em: <<https://www.pfonline.com/articles/preventing-solvent-pop>>. Acesso em: 10 mar. 2020.

JASSBI, J.; ALBORZI, M.; GHORESHI, F. Car paint thickness control using artificial neural network and regression method. **Journal of Industrial Engineering International**, v. 7, n. 14, p.1-6, 2011. ISSN: 1735-5702.

MCGINNESS, J. D. **Exterior Topcoat Applications of Two-Component Polyurethanes**. SAE Technical Paper Series, mar. 1988. In: International Congress and Exposition.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8.ed. Arizona: John Wiley & Sons, Inc., 2012.

OSBORNE, J. W. Improving your data transformations: Applying the Box-Cox transformation. **Practical Assessment, Research and Evaluation**, v. 15, n. 12, out. 2010. ISSN: 1531-7714.

PRENDI, L. et al. Implementing DOE to study the effect of paint application parameters, film build, and dehydration temperature on solvent pop. **Journal of Coatings Technology and Research**, v. 5, p.45-56, mar. 2008.

REIS, E. A.; REIS, I. A. **Análise Descritiva de Dados**. 1.ed. Belo Horizonte: Departamento de Estatística da UFMG, 2002. Disponível em: <http://www.est.ufmg.br/portal/arquivos/rts/rt_e0202.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2020.

STANDOX. **Identifying and eliminating paint defects**. Standothek. 24 p. Disponível em: <https://www.stadox.com/content/dam/AP/Standox/HQ/Public/Documents/English/Standotheks/THK_Paint_Defects_GB.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2020.