

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto De Ciências Exatas
Especialização em Estatística

Débora Esteves Rodrigues

**INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE ACABAMENTO NA NUANÇA DA COR EM
TECIDOS: uma análise através do planejamento de experimentos**

Belo Horizonte
2014

Débora Esteves Rodrigues

**INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE ACABAMENTO NA NUANÇA DA
COR EM TECIDOS: uma análise através do planejamento de
experimentos**

Versão Final

Monografia de especialização apresentada ao Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Estatística, da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Estatística.

Professor Orientador: Dr. Roberto da Costa Quinino

2022, Débora Esteves Rodrigues.
Todos os direitos reservados

Rodrigues, Débora Esteves.

R696i Influência do processo de acabamento na nuança da cor em tecidos: uma análise através do planejamento de experimentos [manuscrito] / Débora Esteves Rodrigues. — 2022.
60 f. il.

Orientador: Roberto da Costa Quinino.
Monografia (especialização) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Estatística.
Referências:47.

1. Estatística. 2. Colorimetria. 2. Indústria têxtil 3. Planejamento experimental. I. Quinino, Roberto da Costa. Gerais, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Estatística .III.Título.

CDU 519.2 (043)

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Belkiz Inez Rezende Costa CRB 6/1510 Universidade Federal de Minas Gerais - ICEX



Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Estatística
Programa de Pós-Graduação / Especialização
Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha
31270-901 – Belo Horizonte – MG

E-mail: pgest@ufmg.br
Tel: 3409-5923 – FAX: 3409-5924

ATA DO 117º. TRABALHO DE FIM DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTATÍSTICA DE DÉBORA ESTEVES RODRIGUES.

Aos vinte e oito dias do mês de agosto de 2014, às 09:00 horas, na Sala 2076 do Instituto de Ciências Exatas, reuniram-se os professores abaixo relacionados, formando a Comissão Examinadora homologada pela Comissão do Curso de Especialização em Estatística, para julgar a apresentação do trabalho de fim de curso da aluna **Débora Esteves Rodrigues**, intitulado: *"Influência do Processo de Acabamento na Nuança da Cor em Tecidos Uma Análise Através do Planejamento de Experimentos"*, como requisito para obtenção do Grau de Especialista em Estatística. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, Professor Roberto da Costa Quinino – Orientador, após dar conhecimento aos presentes do teor das normas regulamentares, passou a palavra à candidata para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores com a respectiva defesa da candidata. Após a defesa, os membros da banca examinadora reuniram-se sem a presença da candidata e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Foi atribuída a seguinte indicação: a candidata foi considerada Aprovada condicional às modificações sugeridas pela banca examinadora no prazo de 30 dias a partir da data de hoje por unanimidade. O resultado final foi comunicado publicamente à candidata pelo Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente Ata, que será assinada por todos os membros participantes da banca examinadora. Belo Horizonte, 28 de agosto de 2022.

Prof. Roberto da Costa Quinino (Orientador)
Departamento de Estatística / UFMG

Prof. Emilio Suyama
Departamento de Estatística / UFMG

Prof. Anderson Laício Galindo Trindade
PRO/UFMG




Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Estatística
Programa de Pós-Graduação / Especialização
Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha
31270-901 – Belo Horizonte – MG

E-mail: pgest@ufmg.br
Tel: 3409-5923 – FAX: 3409-5924

DECLARAÇÃO DE CUMPRIMENTO DE REQUISITOS PARA CONCLUSÃO DO CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTATÍSTICA.

Declaro para os devidos fins que Débora Esteves Rodrigues, número de registro 2012699973, cumpriu todos os requisitos necessários para conclusão do curso de Especialização em Estatística. E que como seu orientador, recebi e aprovo a versão final. O trabalho foi apresentado no dia 28 de agosto de 2014 com o título “Influência do Processo de Acabamento na Nuança da Cor em Tecidos: Uma Análise Através do Planejamento de Experimentos”.

Belo Horizonte, 01 de novembro de 2022


Prof. Roberto da Costa Quinino
Coordenador do curso de
Especialização em Estatística
Departamento de Estatística / UFMG

Roberto da
Costa
Quinino:808712
91720

Assinado de forma
digital por Roberto da
Costa
Quinino:80871291720
Data: 2022.11.01
15:31:03 -03'00'

Resumo

A alteração de cor em tecidos após a etapa de acabamento, no beneficiamento têxtil, é uma importante variável a ser analisada, tendo como objetivo a uniformidade da cor e atendimento a padrões pré-estabelecidos, visando à manutenção da qualidade final do tecido. Tem-se como principal hipótese, que os produtos químicos utilizados no acabamento e a temperatura utilizada na reação são capazes de influenciar na nuance da cor, a partir das quantidades de utilização indicadas por fornecedores. Para verificar se existe a influência do processo de acabamento no resultado de nuance da cor do tecido, foi selecionada a ferramenta estatística Planejamento de Experimentos. Com essa ferramenta é possível avaliar se os fatores identificados, dentro da faixa de variação indicada, – produtos químicos e temperatura – geram alteração significativa na variável resposta – nuance da cor. Todas as etapas realizadas no planejamento de experimentos são apresentadas, assim como as observações pertinentes ao estudo e as conclusões obtidas.

Palavras-chave: Alteração de cor. Indústria têxtil. Planejamento de experimentos.

Abstract

The color change in fabrics after the finishing step in textile processing, is an important variable to be analyzed, in order to achieve the color uniformity and to comply pre-established standards, thus maintaining the quality of the final fabric. It was determined as main hypothesis, that the chemicals used in finishing and reaction temperature, they are able to influence the nuance of color, using the amounts indicated by suppliers. To check the influence of the finishing process on the result of the nuance of color, has been selected the statistical tool "Design of Experiments". With this tool it is possible to assess whether the factors identified within the indicated range of variation - chemicals and temperature - can generate significant change in the response variable - nuance of color. All steps performed in the design of experiments are presented, as well as relevant study observations and findings.

Keywords: Color change. Textile Industry. Design of Experiments.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Modelo geral de um processo ou sistema	14
FIGURA 2 – Modelo do Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados	19
FIGURA 3 – Modelo de gráficos de análise de resíduos	20
FIGURA 4 – Sistema 3D das cores	23
FIGURA 5 – Resultados de nuança da cor – Tecido misto Algodão / Poliéster	31
FIGURA 6 – Modelo geral do processo de acabamento	32
FIGURA 7 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados – DL	39
FIGURA 8 – Análise dos resíduos - DL	40
FIGURA 9 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados – DC	42
FIGURA 10 – Análise dos resíduos – DC.....	42
FIGURA 11 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados – Dh.....	44
FIGURA 12 – Análise dos resíduos – Dh	44

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Receita do banho de acabamento	31
QUADRO 2 – Determinação dos níveis dos fatores	32
QUADRO 3 – Matriz de Planejamento	34
QUADRO 4 – Resultados das medições de nuança da cor	37
QUADRO 5 – Avaliação dos parâmetros do modelo de DL	38
QUADRO 6 – Modelo para a variável DL.....	40
QUADRO 7 – Avaliação dos parâmetros do modelo de DC	41
QUADRO 8 – Avaliação dos parâmetros do modelo de Dh.....	43
QUADRO 9 – Modelo para a variável Dh	45
QUADRO 10 – Apresentação dos dados – Variáveis <i>dummies</i>	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS.....	14
2.1	Experimentos Fatoriais.....	15
2.1.1	Experimentos Fatoriais 2k	15
2.1.2	Adição de pontos centrais	16
2.1.3	Avaliação dos resultados – Modelo de regressão linear ¹	16
2.1.3.1	Análise da significância do modelo - Método dos mínimos quadrados	17
2.1.4	Avaliação dos resultados – Análise gráfica	19
2.1.4.1	Gráfico de Pareto dos Efeitos padronizados	19
2.1.4.2	Gráficos de resíduos ²	20
3	A COR NA INDÚSTRIA TÊXTIL.....	22
3.1	Conceito de cor e colorimetria	22
3.2	Características das cores.....	22
3.3	Instrumentos para medição de cores	23
3.4	Indicações para um melhor controle de cor	24
4	PROBLEMA, PROPOSTA, OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA	26
4.1	Problema.....	26
4.2	Proposta.....	27
4.3	Objetivos	27
4.4	Justificativa.....	27
5	METODOLOGIA.....	28
5.1	Local de realização do trabalho.....	28
5.2	Escolha da amostra.....	28
5.3	Coleta de dados	28
5.4	Método de análise.....	29
6	DESENVOLVIMENTO.....	30
6.1	Reconhecimento e confirmação do problema	30
6.2	Escolha dos fatores, níveis e limites.....	31
6.3	Seleção da variável resposta.....	32
6.4	Escolha do planejamento experimental.....	33
6.5	Realização do experimento	35
7	RESULTADOS OBTIDOS.....	36
7.1	Análise do modelo de Y_1 – DL	38
7.2	Análise do modelo de Y_2 – DC	41

7.3	Análise do modelo de $Y_3 - Dh$	43
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
	REFERÊNCIAS	47
	ANEXO A – Roteiro de realização da análise estatística através do <i>software Minitab</i>	48
	APÊNDICE A – Etapas para a efetuação do cálculo do p-valor através do <i>software Excel</i>	56

1 INTRODUÇÃO

A principal característica responsável pelo alcance de sucesso de uma organização é a qualidade oferecida em seus produtos e serviços. Por isso é imprescindível que métodos e ferramentas de controle e avaliação da qualidade sejam adotados como estratégia organizacional.

A indústria têxtil apresenta alto índice de complexidade da qualidade de seus produtos, por conter diversos parâmetros de controle para serem avaliados, além de várias características que compõem a qualidade intrínseca dos produtos.

Uma das características avaliadas é a cor do tecido. É preciso que o tecido apresente uniformidade na cor, adequação conforme padrão pré-estabelecido, durabilidade, representada por solidez a lavagens, à luz e ao suor, e também reprodutibilidade.

Várias atividades de controle são estabelecidas em cada etapa do processo produtivo, buscando-se elevar a qualidade do tecido em relação à cor. Entretanto, variações durante o processo são observadas e suas causas devem ser identificadas, com o objetivo de reduzir e eliminar sua ocorrência.

A variabilidade observada no estudo em questão é a alteração de cor ocorrida após o processo de acabamento do tecido. Neste processo são aplicados produtos químicos capazes de proporcionar melhoria no toque e aparência do tecido, como resinas, amaciantes e lubrificantes. A reação desses produtos ocorre a partir da umectação das fibras e do contato com temperatura.

A partir da identificação da alteração de cor do tecido após acabamento, foi levantada a hipótese de que o processo de acabamento seria o principal fator de influência. Para isso, foi necessário avaliar se as quantidades de utilização dos produtos, indicadas por fornecedores, estariam afetando o resultado da cor. Com o problema identificado, surgiu a necessidade de testar a hipótese levantada e comprovar sua autenticidade.

Para avaliar a influência dos fatores observados, produtos químicos e temperatura do acabamento, sobre a variável de interesse, nuança da cor, foi selecionada a ferramenta estatística Planejamento de Experimentos. De acordo com MONTGOMERY (2001, p. 11) o planejamento estatístico de experimentos promove, a partir da correta análise dos dados, conclusões válidas e objetivas para resolução do problema identificado.

Neste trabalho são apresentadas as etapas de identificação dos possíveis fatores de influência sobre a variável resposta e a determinação dos níveis de cada fator, coleta e análise dos dados, principais observações e o resultado final, com as conclusões obtidas.

2 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

A resolução de problemas em um ambiente produtivo é uma atividade que deve ser acompanhada por correta análise de dados e experimentação, para subsidiar a tomada de decisão. A utilização de técnicas estatísticas é a maneira mais eficaz de solução de problemas produtivos, além de auxiliar na melhoria do desempenho do processo.

O Planejamento de Experimentos, do inglês *Design of Experiments* (DOE) é uma técnica estatística amplamente utilizada por pesquisadores das mais diversas áreas, por possibilitar o conhecimento das variáveis determinantes para alcance de sucesso para o problema estudado.

Um processo ou sistema é composto por variáveis de entrada, que sofrem influência de fatores diversos, resultando em variáveis resposta, como pode ser visualizado na FIGURA 1. A demanda da realização do experimento surge da necessidade de se descobrir como a resposta obtida depende da atuação dos fatores sobre as variáveis de entrada (NETO, SCARMINIO, BRUNS, 2001, p. 83).

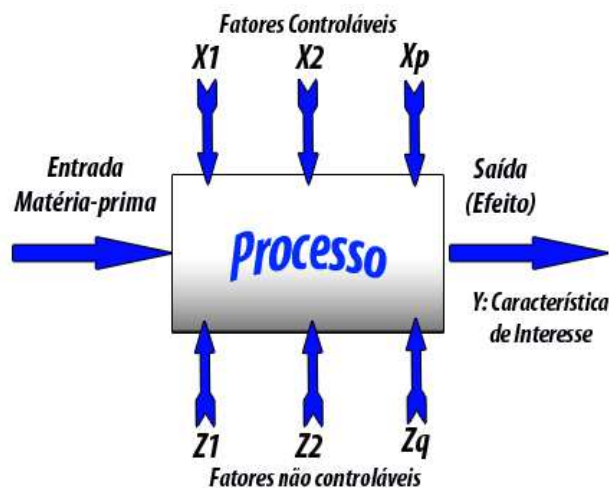


FIGURA 1 – Modelo geral de um processo ou sistema
Fonte: PORTAL ACTION, 2013

A aplicação do DOE deve ser fundamentada no conhecimento do problema e na correta análise dos dados. Segundo MONTGOMERY (2001, p. 13) todos os envolvidos no experimento devem possuir a definição exata do que está sendo estudado, como os dados serão coletados e como os dados serão analisados. Para isso, MONTGOMERY (2001, p.14) define os passos básicos para a realização do DOE:

1. Reconhecimento e confirmação do problema;
2. Escolha dos fatores, níveis e limites;
3. Seleção da variável resposta;
4. Escolha do planejamento experimental;
5. Realização do experimento;
6. Realização da análise estatística dos dados;
7. Conclusões e recomendações.

2.1 Experimentos Fatoriais

Quando há a necessidade de se analisar vários fatores em um experimento, utiliza-se a técnica do experimento fatorial. De acordo com MONTGOMERY e RUNGER (2009, p. 332), a partir do experimento fatorial é possível avaliar a influência de todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores sobre a variável resposta. A utilização desta técnica permite a identificação de interações entre os fatores. (MONTGOMERY e RUNGER, 2009, p. 333).

O efeito de um fator é definido como a variação na resposta, produzida pela alteração dos níveis do fator. Os níveis são valores próprios do fator, determinados como mínimo e máximo (MONTGOMERY, 2001, p. 170).

2.1.1 Experimentos Fatoriais 2^k

Um experimento planejado do tipo 2^k é amplamente utilizado na fase inicial de uma pesquisa, quando vários fatores precisam ser avaliados. A base de sua utilização é considerar os k fatores, cada um com somente dois níveis, gerando uma réplica completa com todas as combinações possíveis dos fatores através de 2^k observações no experimento. (MONTGOMERY e RUNGER, 2009, p.343).

Para realizar a análise estatística de um planejamento experimental 2^k , MONTGOMERY (2001, p. 242) indica os passos a serem seguidos:

1. Estimar os efeitos dos fatores;

2. Formar o modelo inicial;
3. Realizar a análise estatística;
4. Ajustar o modelo;
5. Analisar os resíduos;
6. Interpretar os resultados.

2.1.2 Adição de pontos centrais

A utilização de dois níveis para os fatores no DOE considera a suposição de linearidade nos efeitos dos fatores, mas para obter proteção contra curvatura, adicionam-se pontos centrais ao planejamento 2^k . Os pontos centrais não repercutem nas estimativas usuais dos efeitos. (MONTGOMERY e RUNGER, 2009, p. 352)

2.1.3 Avaliação dos resultados – Modelo de regressão linear¹

Em muitos problemas existem duas ou mais variáveis que são relacionadas, e é de interesse modelar e explorar essa relação. O relacionamento das variáveis é caracterizado por um modelo matemático chamado de modelo de regressão.

Existe forte interação entre DOE e análise de regressão. É importante expressar os resultados de um experimento quantitativamente, em termos de um modelo empírico, para facilitar o entendimento, a interpretação e a implementação dos resultados.

O foco é ajustar modelos de regressão linear. Em geral, a variável resposta y pode ser relacionada a k variáveis preditoras ou regressoras. O modelo

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon$$

é chamado *Modelo de regressão linear múltipla* com k variáveis preditoras. Esse modelo descreve um hiperplano em um espaço k -dimensional de variáveis preditoras (x_j). Os parâmetros β_j , $j = 0, 1, \dots, k$, são chamados de coeficiente de regressão. O parâmetro β_j representa a variação esperada na resposta y por unidade variada em x_j quando todas as outras variáveis independentes x_i ($i \neq j$) permanecem constantes.

São utilizados métodos para estimação dos parâmetros de modelos de regressão linear múltipla. Eles são frequentemente chamados de ajuste do modelo. Métodos para teste de hipótese para esses modelos bem como para avaliar a adequação do ajuste do modelo são utilizados nesta etapa de análise.

2.1.3.1 Análise da significância do modelo - Método dos mínimos quadrados

O método dos quadrados mínimos é tipicamente utilizado para estimar o coeficiente de regressão em um modelo de regressão linear múltipla. Este método identifica o parâmetro β na equação pelo qual a soma dos quadrados dos erros é minimizada. Os coeficientes de regressão são intimamente conectados aos efeitos estimados que seriam obtidos em uma análise comum de um planejamento 2^k .

Em problemas de regressão linear múltipla, testes de hipóteses sobre os parâmetros do modelo são úteis na medição de significância do modelo. Esse procedimento exige que os erros ϵ_j no modelo sejam normalmente e independentemente distribuídos e pertençam à distribuição Normal padrão, com média 0 e variância σ^2 .

O teste de significância da regressão é um teste para determinar se existe uma relação linear entre a variável resposta y e o grupo de variáveis preditoras x_1, x_2, \dots, x_k . As hipóteses utilizadas neste caso são:

$$\begin{cases} H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \\ H_1 : \text{Pelo menos um } \beta_k \neq 0. \end{cases}$$

Se H_0 for rejeitado significa que pelo menos uma das variáveis preditoras contribuem significativamente com o modelo. Alternativamente, pode-se usar o p-valor juntamente com o teste de hipóteses e, assim, rejeitar H_0 se o p-valor relativo à estatística F_0 for menor que α . A

estatística de teste neste caso seria $F = \frac{R^2 / k}{(1 - R^2) / (n - k - 1)}$ que possui distribuição F com

parâmetros respectivamente k e $n - k - 1$. A variável $R^2 = \frac{V(\hat{Y})}{V(Y)}$ é o coeficiente de determinação.

Existe também o interesse em testar hipóteses de cada coeficiente de regressão. Tais testes seriam úteis para determinar o valor de cada variável no modelo de regressão. Por exemplo, o modelo pode ser mais efetivo com a inclusão de variáveis adicionais ou talvez com a exclusão de uma ou mais variáveis presentes no modelo.

As hipóteses para testar a significância de algum contraste de regressão, $j < k$, são:

$$\begin{cases} H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_j = 0 \\ H_1 : \text{Pelo menos um } \beta_j \neq 0. \end{cases}$$

Se H_0 não é rejeitada, então significa que o contraste pode ser excluído do modelo considerando a significância adotada. A estatística de teste neste caso seria

$$F = \frac{(R^2 - R_j^2) / j}{(1 - R^2) / (n - k - 1)}$$

que possui distribuição F com parâmetros respectivamente j e $n - k - 1$.

A variável R_j^2 é o coeficiente de determinação calculado assumindo a hipótese H_0 como verdadeira.

Pode-se também examinar diretamente a contribuição da regressão na soma dos quadrados de uma variável específica, dado que outras variáveis estão incluídas no modelo. Esse procedimento é a avaliação da significância geral do modelo, ou como é frequentemente chamado, método da soma extra de quadrados. Esse procedimento também pode ser usado para avaliar a contribuição de um grupo de variáveis preditoras para o modelo. Maiores detalhes podem ser obtidos em MONTGOMERY e RUNGER, 2009.

¹ Este tópico foi inteiramente referenciado em MONTGOMERY (2001, p. 392 a p. 412)

2.1.4 Avaliação dos resultados – Análise gráfica

A utilização de gráficos para efetuar análise dos resultados obtidos no planejamento de experimentos auxilia numa rápida e eficiente avaliação, pois permite identificação direta sobre a significância dos fatores analisados, além de proporcionar correta avaliação da validade do modelo estudado.

2.1.4.1 Gráfico de Pareto dos Efeitos padronizados

Este gráfico permite avaliar a importância de um efeito – fatores e interação entre eles – tem sobre o modelo analisado. “O gráfico exibe o valor absoluto dos efeitos e traça uma linha de referência no gráfico. Qualquer efeito que se estenda para além desta linha de referência é estatisticamente significativo.” (MINITAB 17, 2014). A FIGURA 2 ilustra o gráfico mencionado.

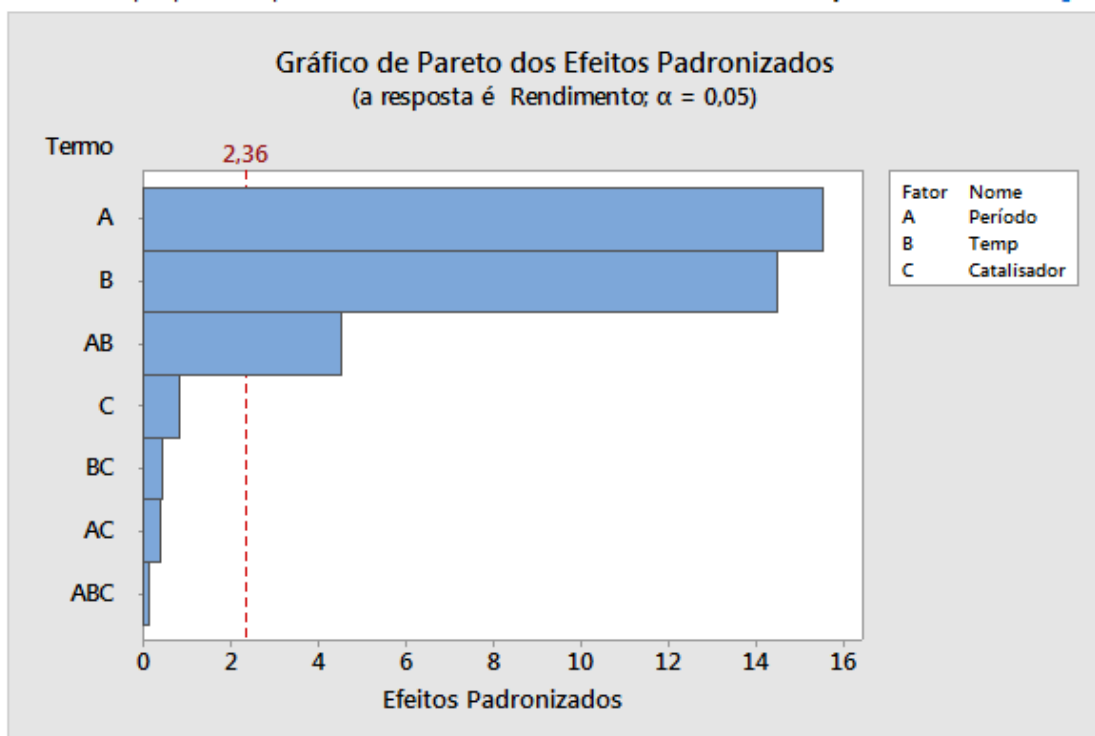


FIGURA 2 – Modelo do Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados
Fonte: MINITAB 17, 2013.

A linha de referência traçada no gráfico é determinada pelo Método de Lenth. O método de Lenth parte do princípio de que o modelo apresente apenas poucos efeitos dispersos, ou

seja, efeitos ativos (diferente de zero), representando efeitos significativamente não nulos do ponto de vista estatístico. (PORTAL ACTION, 2013).

Para definir o valor de referência para a linha traçada no gráfico, considera-se uma estimativa do erro-padrão dos efeitos analisados. Assim, a partir de cálculos específicos, define-se o valor da margem de erro, considerando-se o nível de significância adotado para a avaliação. (PORTAL ACTION, 2013).

2.1.4.2 Gráficos de resíduos²

Estes gráficos são usados para avaliar a adequação do ajuste do modelo de regressão. Esta avaliação permite verificar se as premissas de mínimos quadrados estão sendo atendidas. Neste caso, a regressão produzirá a estimativa de coeficientes dos parâmetros não tendenciosos e com variância mínima. Os gráficos utilizados nesta análise são visualizados na FIGURA 3.

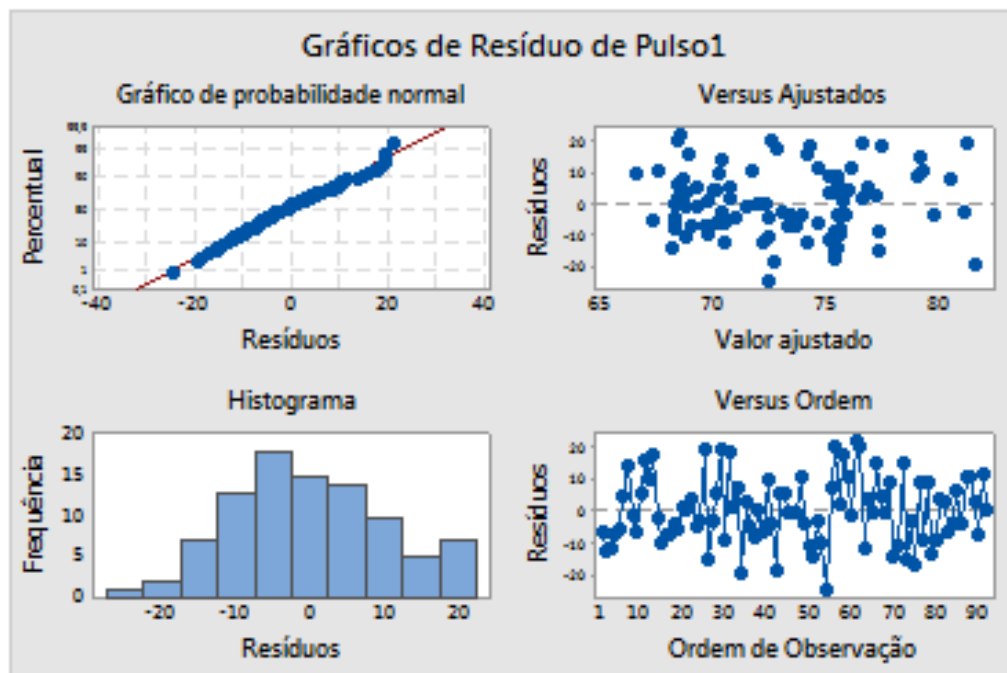


FIGURA 3 – Modelo de gráficos de análise de resíduos
Fonte: MINITAB 17, 2013

A avaliação de cada um dos gráficos permite a verificação de características importantes para validar o modelo de regressão. Abaixo segue a descrição sumária de cada um dos modelos apresentados.

- Gráfico de probabilidade Normal

Os resíduos são plotados neste gráfico, considerando as características da distribuição normal. Para serem considerados compatíveis com essa distribuição, os pontos devem permanecer em linha reta, caso contrário a suposição de normalidade é descartada, invalidando o modelo de regressão (testes relativos ao modelo de regressão).

- Histograma

Este gráfico mostra as características dos resíduos, incluindo valores típicos, dispersão e forma. “Uma lateral longa em um lado pode indicar uma distribuição tendenciosa. Se uma ou duas barras estiverem afastadas das outras, esses pontos podem ser *outliers*.”

- Resíduos versus valores ajustados

Verifica a aleatoriedade dos resíduos, considerando os dois lados a partir do ponto 0. Quando há um ponto afastado da maioria dos outros, pode ser considerado como *outlier*. A distribuição dos pontos não deve apresentar qualquer padrão conhecido, ou seja, devem ser homocedásticos – apresentar padrão regular de aleatoriedade. A suposição de variabilidade entre os resíduos não pode ser violada.

- Resíduos versus ordem dos dados

Os dados são plotados na ordem exata em que foram coletados. Deve-se verificar se há ocorrência de erros não aleatórios, principalmente relacionados ao tempo. A análise desse gráfico permite a verificação da condição de que os resíduos não estejam correlacionados entre si.

² Este tópico foi inteiramente referenciado em MINITAB 17 (2013)

3 A COR NA INDÚSTRIA TÊXTIL

Conhecer a cor e avaliá-la é de suma importância para que a empresa conquiste clientes e se torne competitiva no mercado. A cor é um requisito do produto que exige qualidade, por isso é importante adotar um sistema de avaliação capaz de controlar suas características, atendendo às normas de qualidade e às especificações dos consumidores.

3.1 Conceito de cor e colorimetria

“A colorimetria é a tecnologia utilizada em diversos setores industriais para o desenvolvimento do controle das cores do produto” (TECNOCOR, 2003, p. 1). Essa ciência estuda, a partir de conceitos sobre como o ser humano percebe e distingue as cores, a maneira de traduzir a visão humana através de códigos e números, por meio de medições realizadas por aparelhos eletrônicos (TECNOCOR, 2003, p. 1). O objetivo geral é transmitir a cor de maneira satisfatória e agradável para o observador (LADCHUMANANANDASIVAM, 2004, p. 45).

Entre várias definições existentes, pode-se definir cor como uma percepção subjetiva causada no cérebro, através de uma energia radiante transmitida aos olhos (SALEM, 2000-?, p.1). Essa transmissão ocorre da radiação eletromagnética, na faixa de onda visível de 380 a 780 Nanômetros (nm) (RÉGULA, 2004, p. 23).

3.2 Características das cores

As cores quando classificadas podem ser divididas em três elementos primários: tonalidade (*hue*), luminosidade (*value*) e saturação (*chroma*).

A tonalidade é o atributo pelo qual se identificam as cores, ou seja, o vermelho, azul, verde, amarelo e suas respectivas misturas. A luminosidade diferencia a cor entre clara e escura. A Saturação é o atributo que define a intensidade, distinguindo as cores por cores “vivas” ou cores “foscas” (TECNOCOR, 2003, p. 48).

Os três elementos – tonalidade, luminosidade e saturação – são as três características da cor, e podem ser visualizados em três dimensões como é mostrado na FIGURA 4. As tonalidades das cores encontram-se na parte exterior ao redor do eixo central, com a luminosidade formando o eixo vertical e a saturação o eixo horizontal a partir do centro. Se os três atributos fossem realmente combinados em um sistema tridimensional, eles apareceriam como um sólido de cor.

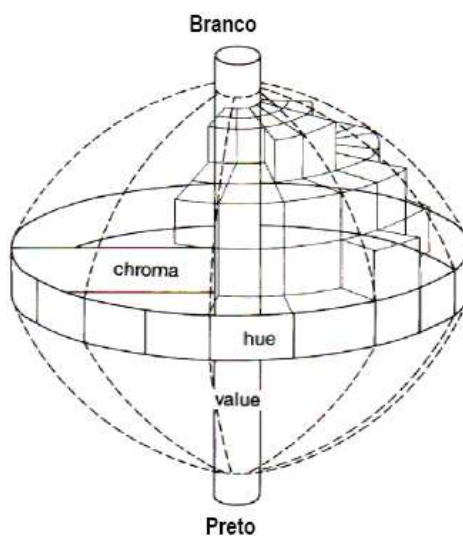


FIGURA 4 – Sistema 3D das cores
Fonte: LADCHUMANANANDASIVAM, 2004, p. 63.

3.3 Instrumentos para medição de cores

A cor está presente em todos os aspectos da vida. Por ser algo subjetivo, não há uma escala física para medi-la. Desse modo cada pessoa interpreta à sua maneira, influenciada por vários fatores, como idade, sensibilidade ocular, humor, fontes de luz, tamanho e textura do objeto e experiências individuais (TECNOCOR, 2003, p. 72).

A avaliação de cor constitui um fator importante para a manutenção da qualidade de produtos já fabricados e para o desenvolvimento de novos. Esse aspecto é determinante na aceitação dos consumidores, que estão cada vez mais exigentes.

Sendo assim, criou-se um instrumento que permite a expressão precisa das cores e a comparação entre elas, o colorímetro (TECNOCOR, 2003, p. 72). Os colorímetros usam sensores que simulam o modo como o olho humano vê a cor e quantificam as diferenças de cor entre um padrão e a amostra. Para isso, são utilizadas as mesmas fontes de luz, para que as

condições de mensuração nunca mudem. Quando uma cor é classificada ela é expressa em termos de nuança, brilho e saturação. Ao se criar escala para esses três fatores torna-se possível medir a cor numericamente (TECNOCOR, 2003, p. 72).

Os dois instrumentos de medição de cores mais utilizados na indústria são o espectrofotômetro e o colorímetro.

“O espectrofotômetro é um equipamento que mede a transmitância e refletância de uma superfície ou amostra em função do comprimento de onda, podendo ser usado também para formulação de receitas quando associado a um *software* próprio” (RÉGULA, 2004, p. 28). Ele fornece o comprimento de onda de cada unidade da energia radiante de todo espectro visível e os dados da energia espectral são usados, através dos princípios dos sistemas padronizados de medição de cor, para calcular os valores de nuança, brilho e saturação de uma cor (TECNOCOR, 2003, p. 72).

Por outro lado, os colorímetros só dão o valor médio da energia radiante de cada cor primária. Não são precisos como os espectrofotômetros em grande parte dos usos, mas, suficientemente úteis para acerto de cores gerais, onde pequenas variações de cores são aceitas. Os colorímetros são bastante utilizados em uma extensa faixa de uso para determinar cores, e são normalmente montados em operação de controle contínuo ou intermitente da produção (TECNOCOR, 2003, p. 73).

3.4 Indicações para um melhor controle de cor

Para que os resultados positivos da avaliação de cor sejam alcançados, é preciso – conforme descrito no manual de colorimetria da Tecnocor (2003, p. 109) – que se tomem os seguintes cuidados durante as atividades relacionadas à avaliação de cor.

1. Deve-se estabelecer um padrão de cor confiável, uniformes e representativos, de modo a não permitir inconsistências na especificação da cor.
2. É importante conhecer os desvios de cor do processo produtivo, e a partir dessas informações, discutir com todos os envolvidos sobre suas limitações e como melhorar o range de aprovação.

3. As avaliações visuais sempre devem ser feitas com iluminação padronizada, adotando a utilização de cabines apropriadas, ou pelo menos lâmpadas com vida útil controlada.
4. É necessário se atentar aos cuidados que devem ser tomados em relação à manipulação dos padrões, guardando-os em lugares secos, escuros e frios, para que não sejam danificados.
5. As medições instrumentais devem ser bem avaliadas e compreendidas, realizadas por operadores e/ou técnicos que conheçam os conceitos das linguagens colorimétricas e saibam interpretá-las.
6. Deve-se criar uma tolerância real para cada cor, representando o que pode ser produzido consistentemente em grandes quantidades. É importante ressaltar que deve-se evitar uma rigidez maior nos limites de tolerância do que os estabelecidos pelo cliente a ser atendido.
7. Os instrumentos de medição devem ser calibrados diariamente e mantidos em perfeitas condições.
8. É importante distinguir o que é cor e o que é aparência. Cor é somente um aspecto da aparência de um produto, enquanto a aparência também inclui brilho, textura e fundo.
9. As equipes devem ser treinadas e avaliadas, melhorando as habilidades no gerenciamento de cores.
10. É importante, também, padronizar o método de coleta de amostras e a maneira de utilização e apresentação das mesmas.

4 PROBLEMA, PROPOSTA, OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

A exigência de mercado e alta competitividade existente, fez com que as empresas concentrassem esforços para manter a qualidade de seus produtos, melhorando o atendimento ao cliente, além de criar estratégias inovadoras, para apresentar diferencial competitivo.

O produto deve apresentar integridade de suas características. O cliente busca encontrar a qualidade especificada e, se possível, melhorias que surpreendam suas expectativas. Para isso, é essencial que a empresa mantenha um rígido controle de qualidade implementado em sua organização, com definição de parâmetros de acompanhamento e atendimento dos requisitos.

Este tópico apresenta a descrição do problema a ser estudado e avaliado neste trabalho, a proposta de resolução do mesmo, a definição dos objetivos e a justificativa para a elaboração do trabalho.

4.1 Problema

A cor é uma característica crítica da qualidade em tecidos. Esta característica é, geralmente, especificada pelo cliente ou selecionada em cartela definida pela empresa. O cliente exige, além da uniformidade da cor em todo o lote comercializado, que a cor esteja adequada conforme padrão estabelecido, que ela apresente elevada durabilidade, representada por solidez a lavagens, à luz e ao suor, e que apresente reprodutibilidade a cada compra efetuada.

Após receber a cor no processo de tingimento, o tecido segue para a etapa de acabamento, pelo qual recebe o tratamento com produtos químicos e reação com temperatura, para melhorar o toque, estabilidade dimensional, evitar o aparecimento de defeitos após a peça confeccionada. Após essa etapa são realizados os ensaios de avaliação da cor, através da medição de nuance, que é a comparação entre a cor obtida no tecido e o padrão colorimétrico definido previamente.

A partir do acompanhamento dos resultados, foi verificado que os resultados de nuance da cor obtidos nas medições do tecido acabado apresentavam-se diferentes do padrão de aprovação da cor. Admitiu-se, portanto, a hipótese de que o processo de acabamento seria o principal fator de influência nos resultados colorimétricos.

4.2 Proposta

Avaliar a interferência dos produtos de acabamento, juntamente com a temperatura, sobre o resultado da cor do tecido, através da aplicação da técnica estatística DOE.

4.3 Objetivos

Objetivo Geral:

- Identificar, através do DOE, se as quantidades indicadas por fornecedores para utilização dos produtos de acabamento, juntamente com a temperatura ideal, interferem no resultado de nuança da cor do tecido.

Objetivos Específicos:

- Identificar o principal fator de influência no resultado da cor;
- Propor soluções para minimizar a alteração de cor;
- Conhecer o comportamento da cor em função da aplicação do acabamento.

4.4 Justificativa

Ao identificar se as quantidades indicadas para a utilização dos produtos de acabamento influenciam nos resultados de nuança da cor, será gerado o conhecimento sobre a característica dos produtos e o comportamento do tecido obtido na etapa de acabamento.

Com esse conhecimento, é possível nortear a pesquisa sobre as principais causas de reprovação da nuança da cor em tecidos acabados, e assim propor ações para minimizar a reprovação da cor no tecido.

5 METODOLOGIA

A utilização de métodos é atividade essencial para a execução dos objetivos de uma pesquisa científica. Metodologias planejadas e eficazes garantem confiabilidade dos resultados e correta tomada de decisão.

A pesquisa realizada no projeto em questão é de natureza aplicada, pois busca gerar conhecimento e solucionar problemas específicos de um processo. Possui objetivo explicativo, cujo principal interesse é identificar os fatores influentes no problema identificado.

O trabalho é desenvolvido a partir de uma pesquisa experimental, em laboratório, onde é efetuada a coleta dos dados e a realização de experimentos para avaliar as hipóteses pré-estabelecidas. A pesquisa tem por objetivo analisar um problema de processo e identificar as principais causas geradoras do problema em questão. Por ser uma pesquisa experimental, a abordagem principal do problema tem caráter quantitativo.

5.1 Local de realização do trabalho

O trabalho foi realizado em um laboratório de Indústria Têxtil, a partir da simulação de condições e parâmetros do processo produtivo.

5.2 Escolha da amostra

A seleção da amostra para realização da pesquisa teve base nos resultados de qualidade obtidos, considerando o histórico da empresa. Tratando-se do problema alteração de cor em tecidos acabados, o tecido misto de Algodão / Poliéster na cor cinza, é aquele que apresenta maior alteração de cor após o acabamento.

5.3 Coleta de dados

O levantamento de dados foi obtido a partir da atividade de experimentação. Primeiramente foram selecionadas as amostras do tecido tinto, sem acabamento. Em seguida, houve a

aplicação do experimento e efetuada medição de cor nas amostras. Os dados considerados na análise foram os resultados de nuança da cor.

5.4 Método de análise

Para realizar a análise dos dados, de maneira confiável e eficiente, foi selecionada a ferramenta estatística DOE. Esta ferramenta permite a execução de atividades experimentais de maneira economicamente viável, estudo simultâneo das variáveis identificadas, identificação das variáveis significativas no problema estudado, relação entre as variáveis e a resposta, apresentação dos resultados de maneira quantitativa.

6 DESENVOLVIMENTO

Buscando conhecer o comportamento da cor após o processo de acabamento, e identificar se as quantidades determinadas para utilização dos produtos químicos e a temperatura interferem no resultado de nuance da cor, foi selecionada a técnica estatística DOE para execução do trabalho.

Neste tópico são apresentadas todas as atividades desenvolvidas em busca da resolução do problema apresentado. São seguidos os passos indicados na literatura para execução do DOE.

6.1 Reconhecimento e confirmação do problema

De acordo com os resultados históricos obtidos, foi selecionado o tecido misto de Algodão / Poliéster, na cor cinza, que apresentou maior índice de variação da nuance da cor.

O tecido é processado no acabamento, onde são aplicados produtos químicos, que em reação com a temperatura, proporcionam característica de toque, maciez e estabilidade ao tecido. Após esse processo, a nuance é medida e verifica-se elevado índice de reprovação nos resultados de nuance da cor obtidos.

AFIGURA5 apresenta o gráfico com os índices dos resultados de nuance da cor obtidos para o tecido misto de Algodão / Poliéster, no período produtivo de 2013. Verifica-se que apenas 20% do que foi produzido foi aprovado. Os índices “Fora de faixa” e “Fora de tabela” representam reprovações, sendo o primeiro referente às reprovações possíveis de serem alocadas em algum pedido e o segundo referente às reprovações diretas.

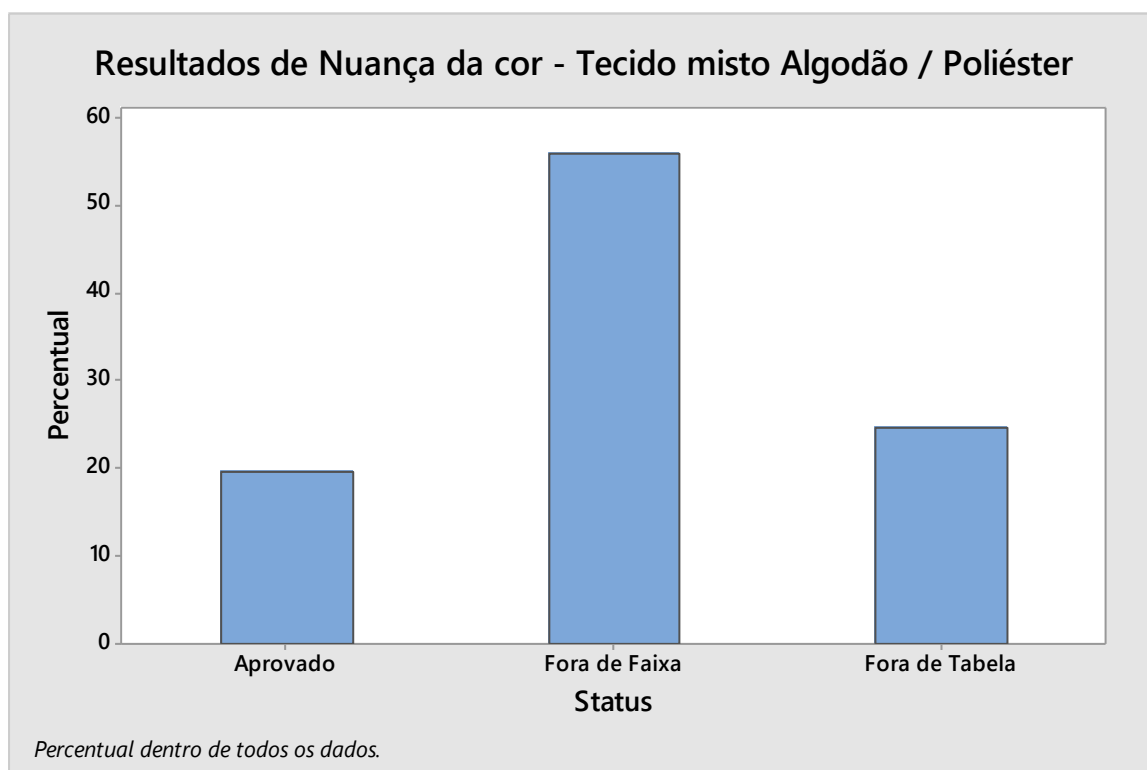


FIGURA 5 – Resultados de nuança da cor – Tecido misto Algodão / Poliéster
Fonte: Dados da empresa, 2013

6.2 Escolha dos fatores, níveis e limites

A partir da geração da hipótese de que o acabamento influencia nos resultados de nuança da cor dos tecidos, foi necessário avaliar o processo de acabamento e os fatores envolvidos.

No processo de acabamento, ocorre a umectação do tecido no banho, seguindo-se a receita informada no QUADRO 1. Os nomes dos produtos foram preservados, em conformidade com a política de privacidade da empresa. Em seguida o tecido entra na estufa de secagem à temperatura de 180 °C e estará seco na saída da máquina.

PRODUTO	QUANTIDADE (g/l)
Produto A	75
Produto B	10
Produto C	20

QUADRO 1 – Receita do banho de acabamento
Fonte: Adaptado do sistema utilizado pela empresa

Após o conhecimento da etapa de acabamento, foram selecionados os fatores para análise: produtos químicos –A, B e C – e temperatura.

Para a execução do DOE, devem ser selecionados dois níveis para cada fator, além da indicação do ponto central, para evitar o efeito quadrático possivelmente gerado entre os níveis determinados. A determinação dos valores dos níveis de cada fator foi baseada na indicação técnica de utilização dos produtos, juntamente com a temperatura, considerando o objetivo de sua aplicação. Foram levantados os valores mínimo e máximo de cada fator, possíveis de serem utilizados, sem que o objetivo de sua aplicação seja alterado, conforme indicação do fornecedor. Assim, pode-se avaliar, dentro da faixa de quantidade indicada para cada fator, se há alteração da nuança da cor. O QUADRO 2 apresenta a determinação dos níveis de cada fator.

FATORES	NÍVEIS		PONTO CENTRAL
	MÍNIMO	MÁXIMO	
Produto A (g/l)	50,0	75,0	62,5
Produto B (g/l)	5,0	10,0	7,5
Produto C (g/l)	10,0	30,0	20,0
Temperatura (°C)	170	190	180

QUADRO 2 – Determinação dos níveis dos fatores

Fonte: Dados da empresa

6.3 Seleção da variável resposta

A FIGURA 6 apresenta o esquema do processo analisado, com o objetivo de identificar a variável resposta.

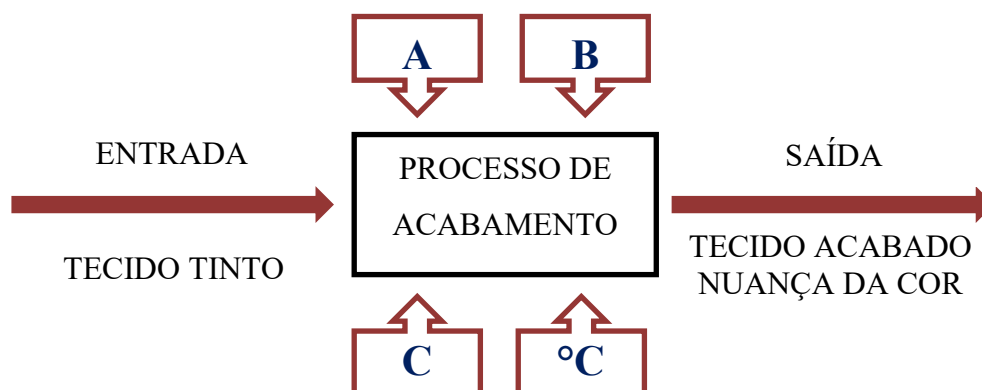


FIGURA 6 – Modelo geral do processo de acabamento

Fonte: Adaptado de dados da empresa

Para a entrada considera-se o tecido tinto, sem acabamento. Para a saída foram considerados os valores de nuança da cor medidos no tecido acabado. A variável resposta foi definida como os resultados de nuança da cor medidos no tecido acabado.

A nuança é a representação numérica da cor, e pode ser medida através do aparelho espectrofotômetro. Ela é composta pelas três características da cor – luminosidade, saturação e tonalidade. A medição é realizada através da comparação entre a cor obtida e o padrão pré-estabelecido, através da medição do comprimento de onda transmitido pela cor. A diferença entre o comprimento de onda e as coordenadas padrão do espaço colorimétrico é o resultado numérico informado pelo aparelho. Assim, as três características da cor são representadas numericamente com o resultado da variação entre o resultado obtido e o padrão, por isso são identificadas por deltas – Delta L (luminosidade), DC (saturação) e Dh (tonalidade).

Assim a variável resposta será definida por três componentes, representados por DL, DC e Dh.

6.4 Escolha do planejamento experimental

O experimento foi realizado da forma fatorial 2^k , considerando $k = 4$. Assim, foram realizadas 16 medições, a partir da combinação entre os níveis dos fatores e mais um ponto central. Foram definidas 4 réplicas para o experimento. Os produtos foram preparados no dia de execução do ensaio e a execução foi realizada por um mesmo operador de forma aleatorizada.

A partir dessas definições foi elaborada a matriz de planejamento dos ensaios. Para elaborar a matriz, de forma aleatorizada, foi utilizado o *software Minitab*. O QUADRO 3 apresenta os dados da Matriz de Planejamento.

Ordem Matriz de Planejamento			Valores utilizados no experimento			
Ordem Aleatória	Ordem numérica	Ponto central	Produto A	Produto B	Produto C	Temperatura
9	1	1	50	5	10	190
16	2	1	75	10	30	190
11	3	1	50	10	10	190
8	4	1	75	10	30	170
1	5	1	50	5	10	170
2	6	1	75	5	10	170
10	7	1	75	5	10	190
4	8	1	75	10	10	170
12	9	1	75	10	10	190
6	10	1	75	5	30	170
17	11	0	62,5	7,5	20	180
13	12	1	50	5	30	190
15	13	1	50	10	30	190
5	14	1	50	5	30	170
14	15	1	75	5	30	190
3	16	1	50	10	10	170
7	17	1	50	10	30	170
37	18	1	50	10	10	170
41	19	1	50	10	30	170
39	20	1	50	5	30	170
35	21	1	50	5	10	170
51	22	0	62,5	7,5	20	180
40	23	1	75	5	30	170
48	24	1	75	5	30	190
49	25	1	50	10	30	190
47	26	1	50	5	30	190
38	27	1	75	10	10	170
45	28	1	50	10	10	190
36	29	1	75	5	10	170
44	30	1	75	5	10	190
42	31	1	75	10	30	170
46	32	1	75	10	10	190
50	33	1	75	10	30	190
43	34	1	50	5	10	190
66	35	1	50	10	30	190
53	36	1	75	5	10	170
59	37	1	75	10	30	170
60	38	1	50	5	10	190
52	39	1	50	5	10	170
68	40	0	62,5	7,5	20	180
67	41	1	75	10	30	190
55	42	1	75	10	10	170
54	43	1	50	10	10	170
61	44	1	75	5	10	190
63	45	1	75	10	10	190
56	46	1	50	5	30	170
65	47	1	75	5	30	190
64	48	1	50	5	30	190
62	49	1	50	10	10	190
58	50	1	50	10	30	170
57	51	1	75	5	30	170
27	52	1	75	5	10	190
32	53	1	50	10	30	190
28	54	1	50	10	10	190
20	55	1	50	10	10	170
29	56	1	75	10	10	190
30	57	1	50	5	30	190
21	58	1	75	10	10	170
23	59	1	75	5	30	170
31	60	1	75	5	30	190
18	61	1	50	5	10	170
24	62	1	50	10	30	170
25	63	1	75	10	30	170
19	64	1	75	5	10	170
22	65	1	50	5	30	170
33	66	1	75	10	30	190
34	67	0	62,5	7,5	20	180
26	68	1	50	5	10	190

QUADRO 3 – Matriz de Planejamento

Fonte: Minitab

6.5 Realização do experimento

O experimento foi realizado em escala de laboratório, utilizando protótipos dos equipamentos de produção. A aplicação do banho de acabamento foi realizada em *foulard* e a secagem foi realizada em uma estufa.

Para a realização de cada medição, foi necessária uma amostra de 30x20 cm. Para completar o experimento, foram necessários, aproximadamente, 3 metros lineares de tecido. Com a separação do tecido de forma contínua foi possível minimizar a dispersão entre as amostras.

Foram separadas as amostras e numeradas de acordo com cada medição. A sequência de realização dos experimentos em cada amostra foi:

1. Preparação das receitas contendo os três produtos;
2. Aplicação da receita em *foulard*;
3. Secagem da amostra em Rama conforme temperatura determinada;
4. Acondicionamento das amostras para climatização;
5. Medição das amostras após aplicação do acabamento;
6. Registro dos resultados.

Após obtenção dos dados de todo o experimento, a avaliação foi realizada, utilizando o *software Minitab*.

7 RESULTADOS OBTIDOS

No QUADRO 4 são apresentados os resultados obtidos em cada medição. A partir dos resultados apresentados nas colunas “Medições do tecido após acabamento” foi realizada a análise estatística, através do *software Minitab*.

Como definido anteriormente, foram consideradas três variáveis resposta, sendo:

- $Y_1 = DL$
- $Y_2 = DC$
- $Y_3 = Dh$

Cada variável resposta foi analisada separadamente, por representarem diferentes características da nuance da cor. A análise foi realizada a partir do módulo “Planejamento de Experimentos” do *Minitab*. Assim, o *software* fornece a análise dos dados, considerando-os em um modelo de regressão. Há a realização do teste de hipóteses, considerando como hipótese nula a igualdade entre os parâmetros do modelo, e a hipótese alternativa considera que pelo menos um dos parâmetros é diferente. Assume-se $\alpha = 0,05$. Os parâmetros considerados são definidos por: fatores determinados no DOE, possíveis interações entre os fatores e o ponto central.

O roteiro para a realização da análise estatística dos dados, através do módulo “Planejamento de experimentos” do *software Minitab*, é apresentado no ANEXO A, através da indicação do passo-a-passo e ilustração das janelas utilizadas.

Ordem Matriz de Planejamento			Valores utilizados no experimento				Medição Tecido após acabamento		
Ordem Aleatória	Ordem numérica	Ponto central	Produto A	Produto B	Produto C	Temperatura	DL	DC	Dh
9	1	1	50	5	10	190	-0,49	-0,74	0,61
16	2	1	75	10	30	190	-0,59	-1,00	0,47
11	3	1	50	10	10	190	-0,34	-0,91	0,32
8	4	1	75	10	30	170	-0,49	-0,78	0,62
1	5	1	50	5	10	170	-0,43	-0,73	0,60
2	6	1	75	5	10	170	-0,77	-0,86	0,47
10	7	1	75	5	10	190	-0,66	-0,83	0,56
4	8	1	75	10	10	170	-0,41	-0,93	0,33
12	9	1	75	10	10	190	-0,79	-1,03	0,46
6	10	1	75	5	30	170	-0,74	-0,85	0,39
17	11	0	62,5	7,5	20	180	-0,84	-0,88	0,49
13	12	1	50	5	30	190	-0,65	-0,98	0,61
15	13	1	50	10	30	190	-0,60	-0,90	0,58
5	14	1	50	5	30	170	-0,23	-0,79	0,44
14	15	1	75	5	30	190	-0,61	-0,95	0,51
3	16	1	50	10	10	170	-0,81	-0,92	0,34
7	17	1	50	10	30	170	-0,74	-0,85	0,39
37	18	1	50	10	10	170	-0,40	-0,89	0,49
41	19	1	50	10	30	170	-0,72	-0,88	0,53
39	20	1	50	5	30	170	-0,49	-0,90	0,46
35	21	1	50	5	10	170	-0,78	-0,99	0,46
51	22	0	62,5	7,5	20	180	-0,67	-0,80	0,65
40	23	1	75	5	30	170	-0,68	-0,83	0,63
48	24	1	75	5	30	190	-0,92	-0,87	0,66
49	25	1	50	10	30	190	-0,42	-0,81	0,68
47	26	1	50	5	30	190	-0,62	-0,78	0,64
38	27	1	75	10	10	170	-0,58	-0,89	0,39
45	28	1	50	10	10	190	-0,63	-0,81	0,52
36	29	1	75	5	10	170	-0,20	-0,72	0,55
44	30	1	75	5	10	190	-0,69	-0,87	0,54
42	31	1	75	10	30	170	-0,84	-0,87	0,62
46	32	1	75	10	10	190	-0,90	-0,75	0,79
50	33	1	75	10	30	190	-0,86	-0,87	0,72
43	34	1	50	5	10	190	-0,53	-0,58	0,82
66	35	1	50	10	30	190	-0,64	-0,76	0,56
53	36	1	75	5	10	170	-0,95	-0,93	0,47
59	37	1	75	10	30	170	-0,90	-0,81	0,59
60	38	1	50	5	10	190	-0,76	-0,88	0,48
52	39	1	50	5	10	170	-0,62	-0,91	0,44
68	40	0	62,5	7,5	20	180	-0,81	-0,84	0,57
67	41	1	75	10	30	190	-0,88	-0,76	0,64
55	42	1	75	10	10	170	-0,91	-0,96	0,35
54	43	1	50	10	10	170	-0,61	-0,86	0,50
61	44	1	75	5	10	190	-0,80	-0,82	0,55
63	45	1	75	10	10	190	-0,98	-0,76	0,75
56	46	1	50	5	30	170	-0,76	-0,94	0,50
65	47	1	75	5	30	190	-0,87	-0,85	0,66
64	48	1	50	5	30	190	-0,63	-0,80	0,67
62	49	1	50	10	10	190	-0,70	-0,74	0,64
58	50	1	50	10	30	170	-0,45	-0,77	0,44
57	51	1	75	5	30	170	-0,73	-0,88	0,55
27	52	1	75	5	10	190	-0,83	-0,81	0,63
32	53	1	50	10	30	190	-0,44	-0,69	0,59
28	54	1	50	10	10	190	-0,66	-0,78	0,57
20	55	1	50	10	10	170	-0,32	-0,67	0,43
29	56	1	75	10	10	190	-0,72	-0,77	0,68
30	57	1	50	5	30	190	-0,47	-0,73	0,68
21	58	1	75	10	10	170	-0,53	-0,70	0,42
23	59	1	75	5	30	170	-0,85	-0,80	0,60
31	60	1	75	5	30	190	-0,77	-0,76	0,67
18	61	1	50	5	10	170	-0,31	-0,74	0,55
24	62	1	50	10	30	170	-0,84	-0,79	0,37
25	63	1	75	10	30	170	-0,95	-0,86	0,48
19	64	1	75	5	10	170	-0,74	-0,69	0,55
22	65	1	50	5	30	170	-0,21	-0,80	0,42
33	66	1	75	10	30	190	-0,87	-0,79	0,56
34	67	0	62,5	7,5	20	180	-0,97	-0,76	0,64
26	68	1	50	5	10	190	-0,80	-0,85	0,51

QUADRO 4 – Resultados das medições de nuança da cor

Fonte: Dados da empresa

7.1 Análise do modelo de Y_1 – DL

Os resultados da análise do modelo de regressão para a variável resposta DL são apresentados no QUADRO 5.

Termo	Efeito	Coef	EP de Coef	Valor T	Valor-P
Constante		-0,6580	0,0221	-29,82	0,000
Produto A	-0,1847	-0,0923	0,0221	-4,18	0,000
Produto B	-0,0291	-0,0145	0,0221	-0,66	0,513
Produto C	-0,0253	-0,0127	0,0221	-0,57	0,569
Temperatura	-0,0666	-0,0333	0,0221	-1,51	0,138
Produto A*Produto B	0,0047	0,0023	0,0221	0,11	0,916
Produto A*Produto C	-0,0428	-0,0214	0,0221	-0,97	0,337
Produto A*Temperatura	-0,0253	-0,0127	0,0221	-0,57	0,569
Produto B*Produto C	-0,0334	-0,0167	0,0221	-0,76	0,452
Produto B*Temperatura	0,0341	0,0170	0,0221	0,77	0,444
Produto C*Temperatura	0,0528	0,0264	0,0221	1,20	0,237
Produto A*Produto B*Produto C	0,0316	0,0158	0,0221	0,72	0,478
Produto A*Produto B*Temperatura	-0,0647	-0,0323	0,0221	-1,47	0,149
Produto A*Produto C*Temperatura	0,0153	0,0077	0,0221	0,35	0,730
Produto B*Produto C*Temperatura	0,0584	0,0292	0,0221	1,32	0,191
Produto A*Produto B*Produto C*Temperatura	-0,0091	-0,0045	0,0221	-0,21	0,838
Pt Ct		-0,1645	0,0910	-1,81	0,076

QUADRO 5 – Avaliação dos parâmetros do modelo de DL

Fonte: *Software Minitab*

Para esta análise considera-se o p-valor de cada parâmetro para tomar a decisão do teste de hipóteses. Verifica-se que a hipótese nula (igualdade entre os parâmetros) é rejeitada, uma vez que obtém-se p-valor menor do que o α de 0,05, para pelo menos um parâmetro. Isso significa que pelo menos um dos parâmetros se diferencia no modelo, contribuindo significativamente para o resultado da variável resposta. Comparando este conceito com os valores apresentados no QUADRO 5, verifica-se que o Produto A é um parâmetro significativo para o modelo, ou seja, o efeito do Produto A interfere significativamente no resultado de DL.

Os cálculos realizados através do *software Minitab* seguem os conceitos definidos para análise de regressão. Para melhor compreensão dos cálculos necessários é detalhada a verificação da significância da interação entre o Produto B e Produto C (p-valor =0,452) no APÊNDICE A. Este será um exemplo de realização dos cálculos, sendo os demais testes similares. Isto permitirá ao leitor a realização dos cálculos mesmo sem o *software Minitab*, podendo utilizar apenas um *software* que realiza análise de regressão, como o *Microsoft Excel*, por exemplo.

O Gráfico de Pareto, gerado no *Minitab* e apresentado na FIGURA 7, ilustra a significância do fator Produto A para o resultado DL, uma vez que seu valor absoluto ultrapassa o limite de margem de erro do modelo considerado.

Na FIGURA 8 são apresentados os gráficos de análise dos resíduos do modelo, confirmando que o modelo é válido, por apresentar resíduos de comportamento normal, não são auto-correlacionados e são homocedásticos.

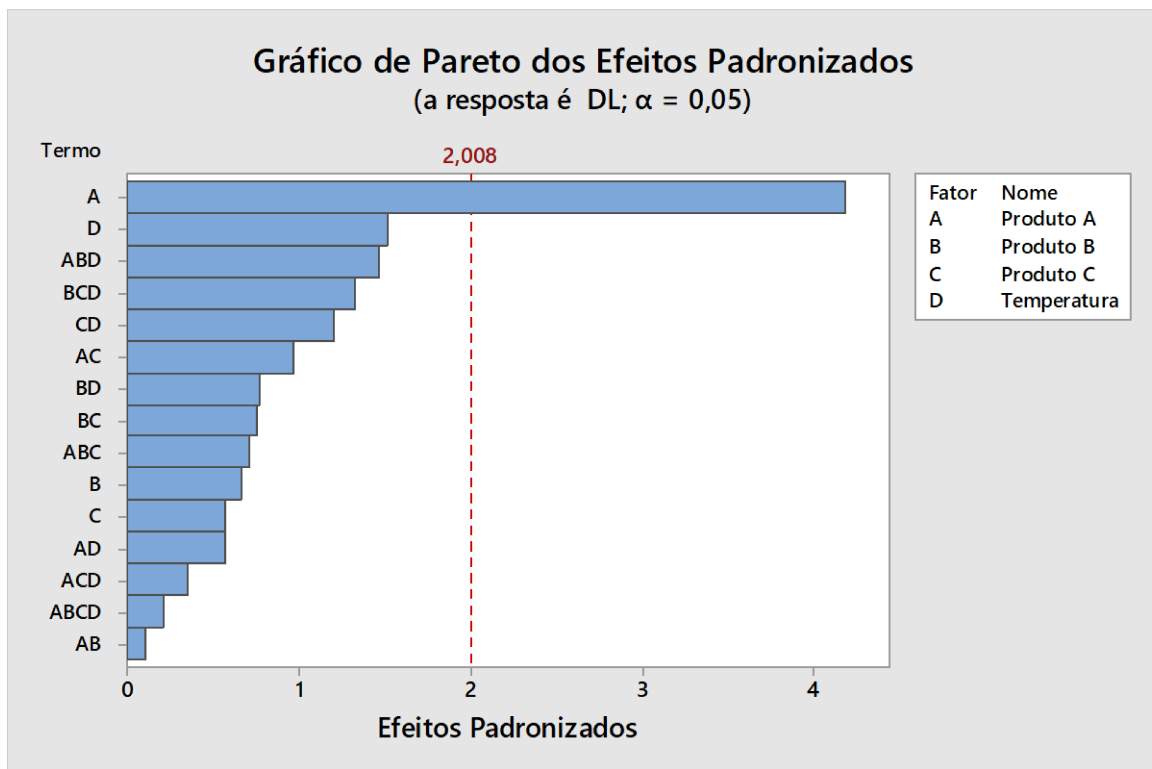


FIGURA 7 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados – DL
Fonte: *Software Minitab*

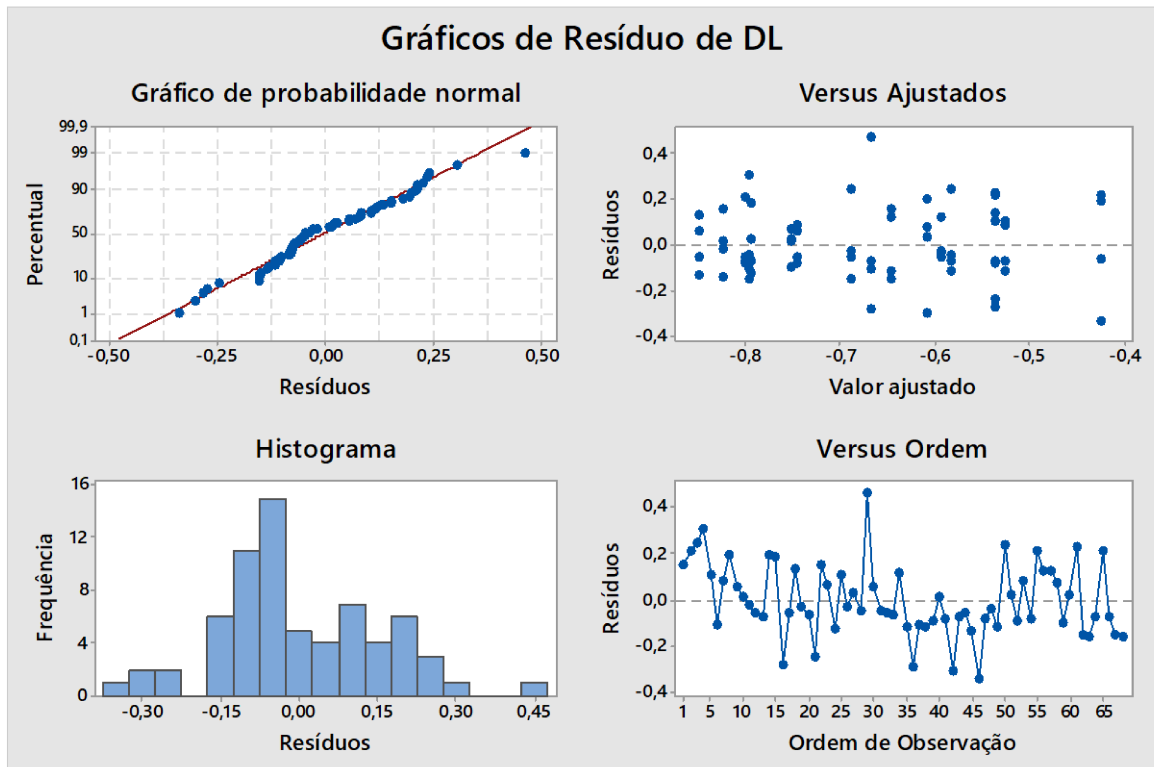


FIGURA 8 – Análise dos resíduos - DL

Fonte: *Software Minitab*

Assim, é possível definir o modelo ideal para a variável DL, considerando o parâmetro significativo Produto A. Esta informação é apresentada no QUADRO 6.

Sumário do Modelo						
	S	R2R2 (aj)	R2 (pred)			
	0,17310624	95%	22,64%	18,79%		
Coeficientes Codificados						
Termo	Efeito	Coef	EP de Coef	Valor T	Valor-P	VIF
Constante		-0,6580		0,0216-30,41	0,000	
Produto A	-0,1847	-0,0923		0,0216	-4,27	0,000
PtCt		-0,1645		0,0892	-1,84	0,070
Equação de Regressão em Unidades Não codificadas						
DL = -0,196 - 0,00739 Produto A - 0,1645 Pt Ct						

QUADRO 6 – Modelo para a variável DL

Fonte: *Software Minitab*

7.2 Análise do modelo de Y2 – DC

Os resultados obtidos na análise da variável resposta DC são apresentados no QUADRO 7.

Termo	Efeito	Coef	EP de Coef	Valor T	Valor-P
Constante		-0,8284	0,0117	-70,67	0,000
Produto A	-0,0212	-0,0106	0,0117	-0,91	0,369
Produto B	-0,0031	-0,0016	0,0117	-0,13	0,894
Produto C	-0,0119	-0,0059	0,0117	-0,51	0,615
Temperatura	0,0175	0,0087	0,0117	0,75	0,459
Produto A*Produto B	-0,0100	-0,0050	0,0117	-0,43	0,672
Produto A*Produto C	-0,0012	-0,0006	0,0117	-0,05	0,958
Produto A*Temperatura	-0,0256	-0,0128	0,0117	-1,09	0,280
Produto B*Produto C	0,0231	0,0116	0,0117	0,99	0,329
Produto B*Temperatura	0,0012	0,0006	0,0117	0,05	0,958
Produto C*Temperatura	-0,0113	-0,0056	0,0117	-0,48	0,633
Produto A*Produto B*Produto C	-0,0038	-0,0019	0,0117	-0,16	0,874
Produto A*Produto B*Temperatura	0,0156	0,0078	0,0117	0,67	0,508
Produto A*Produto C*Temperatura	-0,0019	-0,0009	0,0117	-0,08	0,937
Produto B*Produto C*Temperatura	-0,0038	-0,0019	0,0117	-0,16	0,874
Produto A*Produto B*Produto C*Temperatura	-0,0169	-0,0084	0,0117	-0,72	0,475
Pt Ct		0,0084	0,0483	0,17	0,862

QUADRO 7 – Avaliação dos parâmetros do modelo de DC

Fonte: *Software Minitab*

A partir da avaliação do resultado de p-valor de cada parâmetro, observa-se que nenhum parâmetro é considerado significativo para o modelo. Com isso, conclui-se que nenhum fator ou interação entre os fatores contribuem significativamente para o resultado obtido na variável DC.

Os gráficos apresentados nas FIGURA 9 e FIGURA 10 ilustram o comportamento dos efeitos dos fatores para a variável resposta DC e a análise dos resíduos do modelo, respectivamente. Os resíduos apresentam padrão de normalidade, não são auto-correlacionados e são homocedásticos. Assim, considera-se o modelo analisado como válido para esta situação.

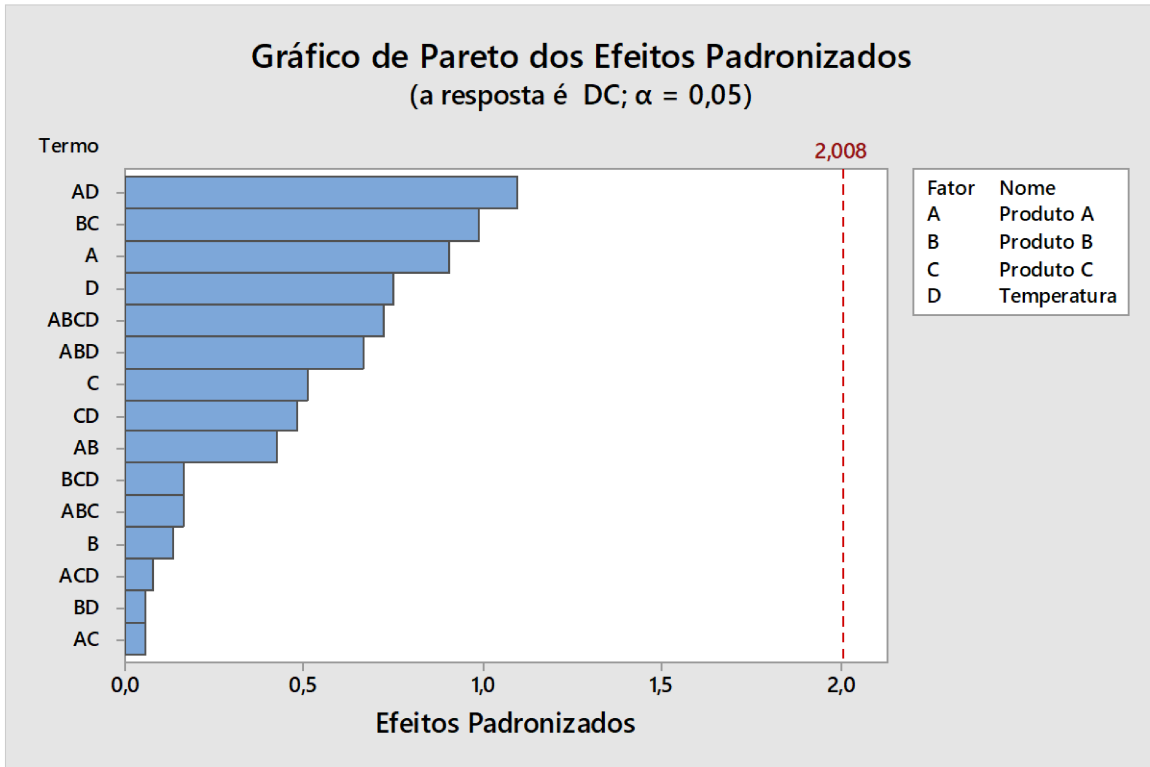


FIGURA 9 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados – DC
Fonte: *Software Minitab*

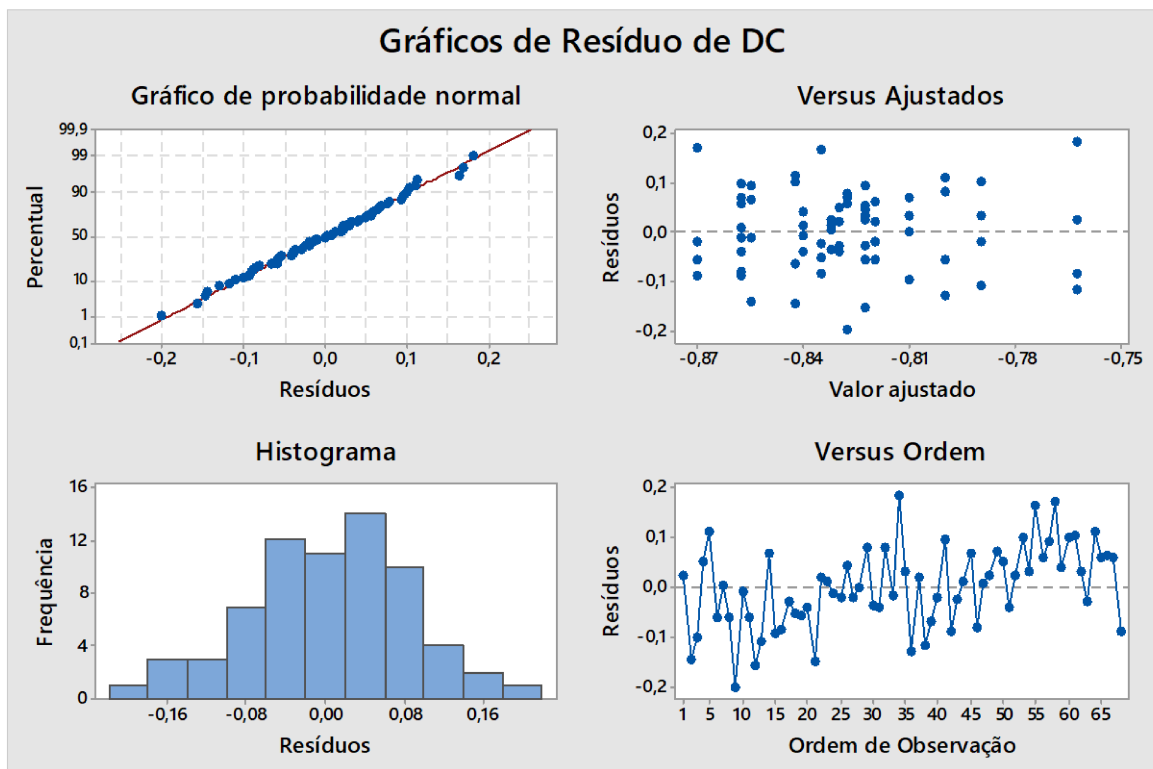


FIGURA 10 – Análise dos resíduos – DC
Fonte: *Software Minitab*

7.3 Análise do modelo de Y3 – Dh

A análise realizada para a variável resposta Dh é apresentada no QUADRO 8.

Termo	Efeito	Coef	EP de Coef	Valor T	Valor-P
Constante		0,5422	0,0109	49,69	0,000
Produto A	0,0319	0,0159	0,0109	1,46	0,150
Produto B	-0,0331	-0,0166	0,0109	-1,52	0,135
Produto C	0,0362	0,0181	0,0109	1,66	0,103
Temperatura	0,1238	0,0619	0,0109	5,67	0,000
Produto A*Produto B	0,0256	0,0128	0,0109	1,17	0,246
Produto A*Produto C	0,0188	0,0094	0,0109	0,86	0,394
Produto A*Temperatura	-0,0088	-0,0044	0,0109	-0,40	0,690
Produto B*Produto C	0,0175	0,0087	0,0109	0,80	0,426
Produto B*Temperatura	0,0162	0,0081	0,0109	0,74	0,460
Produto C*Temperatura	-0,0069	-0,0034	0,0109	-0,32	0,754
Produto A*Produto B*Produto C	-0,0062	-0,0031	0,0109	-0,29	0,776
Produto A*Produto B*Temperatura	0,0275	0,0138	0,0109	1,26	0,213
Produto A*Produto C*Temperatura	-0,0569	-0,0284	0,0109	-2,61	0,012
Produto B*Produto C*Temperatura	-0,0381	-0,0191	0,0109	-1,75	0,087
Produto A*Produto B*Produto C*Temperatura	-0,0369	-0,0184	0,0109	-1,69	0,097
Pt Ct		0,0453	0,0450	1,01	0,319

QUADRO8 – Avaliação dos parâmetros do modelo de Dh

Fonte: *Software Minitab*

A partir dos dados apresentados, verifica-se que para dois parâmetros o p-valor apresenta-se menor do que α , indicando que há parâmetros significativos para o modelo. A temperatura é um fator que influencia significativamente no resultado obtido para a variável Dh, e de acordo com o resultado de p-valor, a interação entre Produto A, Produto C e Temperatura também é significativa para o modelo. Entretanto, como os fatores Produto A e Produto C não são considerados efeitos principais, ou seja, não são significantes de maneira isolada, esta interação então não é considerada na análise geral.

O gráfico de Pareto, apresentado na FIGURA 11, ilustra essa afirmação. Observa-se que apenas o fator Temperatura apresenta valor absoluto acima do limite de margem de erro definido para o modelo analisado. Os fatores Produto A e Produto C não possuem valores significantes. Assim a significância da interação entre esses três fatores está sendo influenciada principalmente pelo valor absoluto da Temperatura.

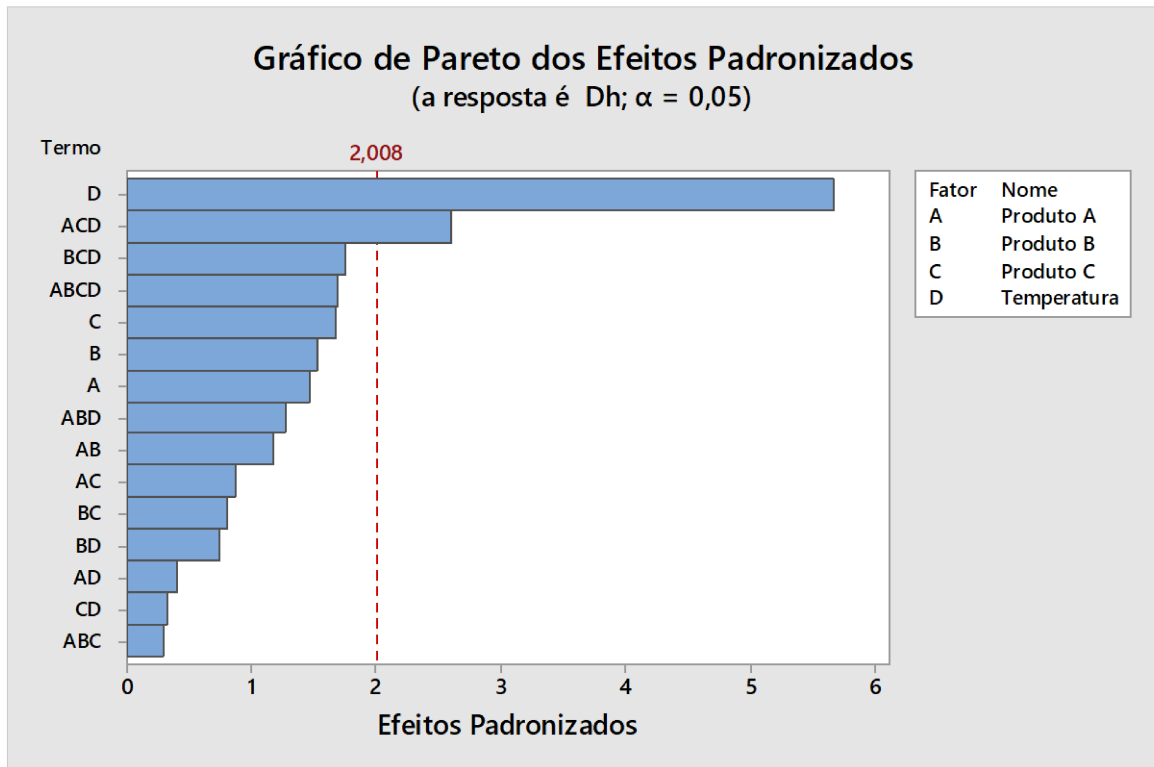


FIGURA 11 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados – Dh
Fonte: *Software Minitab*

Pela análise dos resíduos, o modelo é considerado válido, por apresentar resíduos de padrão normal, não auto-correlacionados e homocedásticos. A análise é apresentada na FIGURA 12.

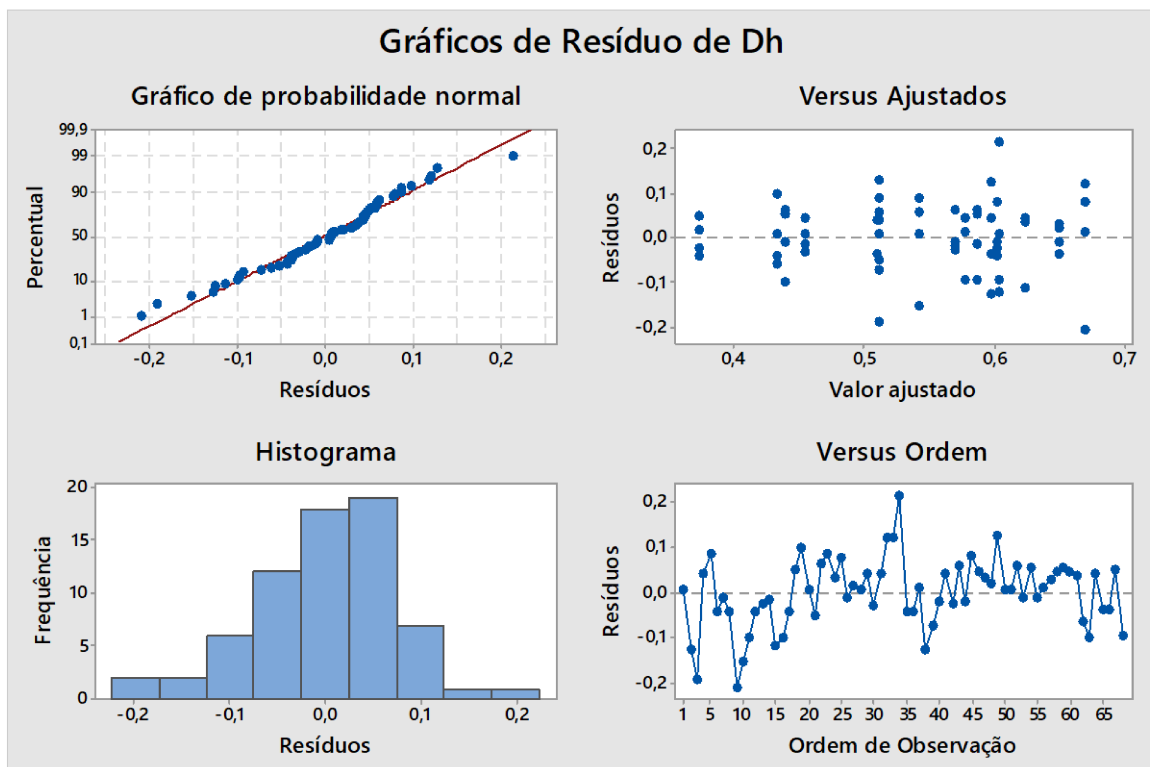


FIGURA 12 – Análise dos resíduos – Dh
Fonte: *Software Minitab*

Então, define-se o modelo válido para a variável resposta Dh, considerando a Temperatura como o principal fator de influência para os resultados obtidos nesta avaliação. O QUADRO 9 apresenta os dados gerados para o modelo final de Dh.

Sumário do Modelo						
S	R2	R2 (aj)	R2 (pred)			
0,094473730	35%	28,20%	24,37%			
Coeficientes Codificados						
Termo	Efeito	Coef	EP de Coef	Valor T	Valor-P	VIF
Constante		0,5422		0,011845,91	0,000	
Temperatura	0,1237	0,0619	0,0118	5,24	0,000	1,00
PtCt		0,0453	0,0487	0,93	0,355	1,00
Equação de Regressão em Unidades Não codificadas						
Dh = -0,572 + 0,00619 Temperatura + 0,0453 Pt Ct						

QUADRO 9 – Modelo para a variável Dh

Fonte: *Software Minitab*

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação realizada a partir da técnica de DOE permitiu conhecer o comportamento dos fatores observados – Produtos Químicos e Temperatura – e a influência que eles exercem sobre a cor final do tecido.

Como proposta inicial, a análise foi realizada buscando-se comprovar se os valores dos níveis definidos para cada fator, conforme indicação de fornecedores, seriam significativamente influentes nos resultados de nuança da cor obtidos ao final do processo de acabamento.

Foi detectado que o Produto A, dentro da faixa de variação de quantidade de aplicação informada, influencia significativamente no resultado da característica de nuança DL, tendo interferência no brilho da cor.

Para a característica de nuança DC, que representa a saturação da cor, nenhum dos fatores analisados foi considerado significativo, comprovando que produto químico de acabamento e nem temperatura do processo, influenciam neste resultado.

No caso da característica de nuança Dh, que representa a tonalidade da cor, o fator Temperatura possui principal influência no resultado obtido, pois apresentou maior significância estatística na análise.

Para atender ao objetivo de minimização da alteração de cor, é preciso que seja realizado um estudo aprofundado, buscando-se identificar quanto cada fator influencia no resultado de nuança da cor, com o objetivo de prever a alteração identificada e evitar que haja variações nos resultados de cor obtidos no tecido acabado. Trabalhos futuros podem ser realizados, a partir do conhecimento gerado através da aplicação da técnica descrita neste trabalho.

REFERÊNCIAS

LADCHUMANANANDASIVAM, Rasiah. **Ciência da cor**. In: Série Processos Químicos Têxteis, vol. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Têxtil. Natal, 2004. Disponível em: <<http://clovisbezerra.tripod.com/materiais-didaticos/proqui-ii/ciencia-da-cor.pdf>>. Acesso em: 15fev. 2014.

MINITAB 17, Software. **Menu Ajuda**. In: Minitab Inc. 2013.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and analysis of experiments**. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, 2001. 684 p.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 493 p.

NETO, Benício de Barros; SCARMINIO, Ieda Sparcino; BRUNS, Roy Edward. **Como fazer experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2. ed. Campinas: Unicamp, 2001. 401 p.

PORTAL ACTION (Brasil). EstatCamp (Comp.). **DOE - Planejamento do Experimento**. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/content/doe>>. Acesso em: 10 out. 2013.

RÉGULA, L. M. **Padrões Virtuais e Tolerâncias Colorimétricas no Controle Instrumental das Cores**. 2004. 223 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia)-Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=4944@1>. Acesso em: 15fev. 2014.

SALEM, Vidal. **Curso de tingimento têxtil**. Golden Química do Brasil. Elaboração de VS Produção e Treinamento. [s.l.]: Módulo 1, [200-?].

TECNOCOR Serviços. **Curso sobre aplicações em colorimetria e aparência na indústria**. Elaboração de Celso Farkas. [s.l.], 2003.

- Passo 3: Seleção do fatores

01/07/2014 20:34:56

Welcome to Minitab, press F1 for help.

Define Custom Factorial Design

Factors:

- Produto A-Temperatura

2-level factorial
 2-level split-plot (hard-to-change factors)
 General full factorial

Factors from above that are hard to change:

	C1	C2	C3	C4	C5
	Ponto central	Produto A	Produto B	Produto C	Temperatura
1	1	50,0	5,0	10	190
2	1	75,0	10,0	30	190
3	1	50,0	10,0	10	190
4	1	75,0	10,0	30	170
5	1	50,0	5,0	10	170
6	1	75,0	5,0	10	170
7	1	75,0	5,0	10	190
8	1	75,0	10,0	10	170
9	1	75,0	10,0	10	190

Create a factorial design from data already in the worksheet

- Passo 4: Especificação dos níveis e inclusão do ponto central

01/07/2014 20:34:56

Welcome to Minitab, press F1 for help.

Define Custom 2-Level Factorial - Designs

Standard Order Column
 Order of the data
 Specify by column:

Run Order Column
 Order of the data
 Specify by column:

Center Points

- No Center Points
- Specify by column: Ponto central

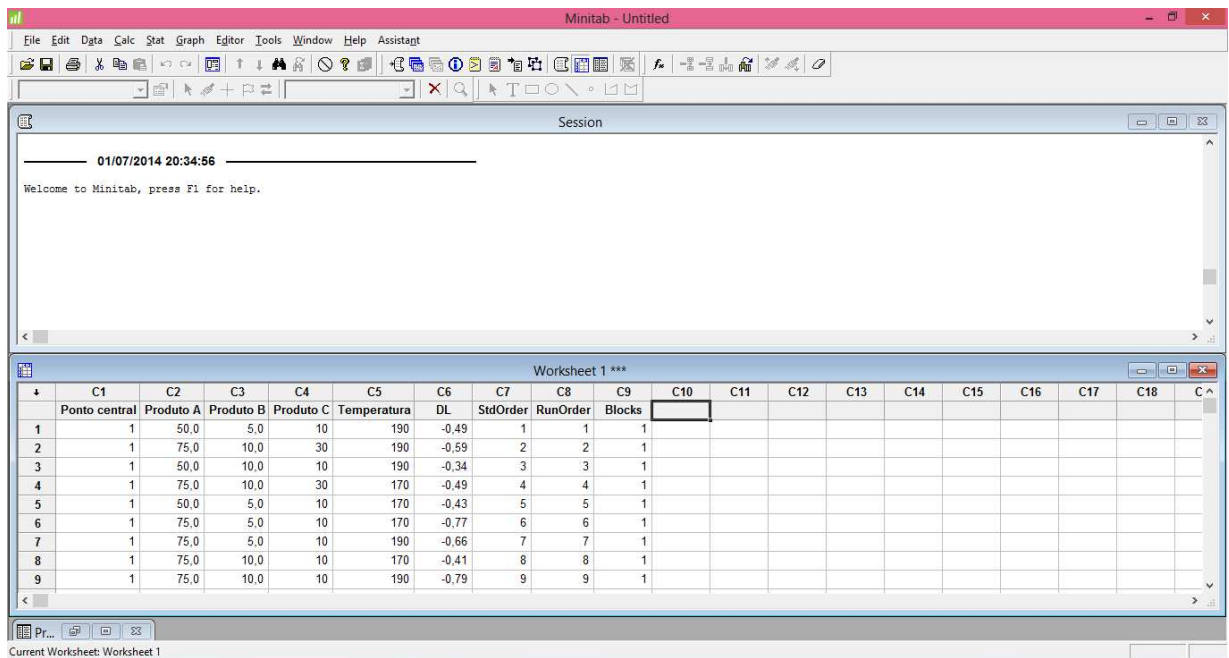
Blocks

- No blocks
- Specify by column:

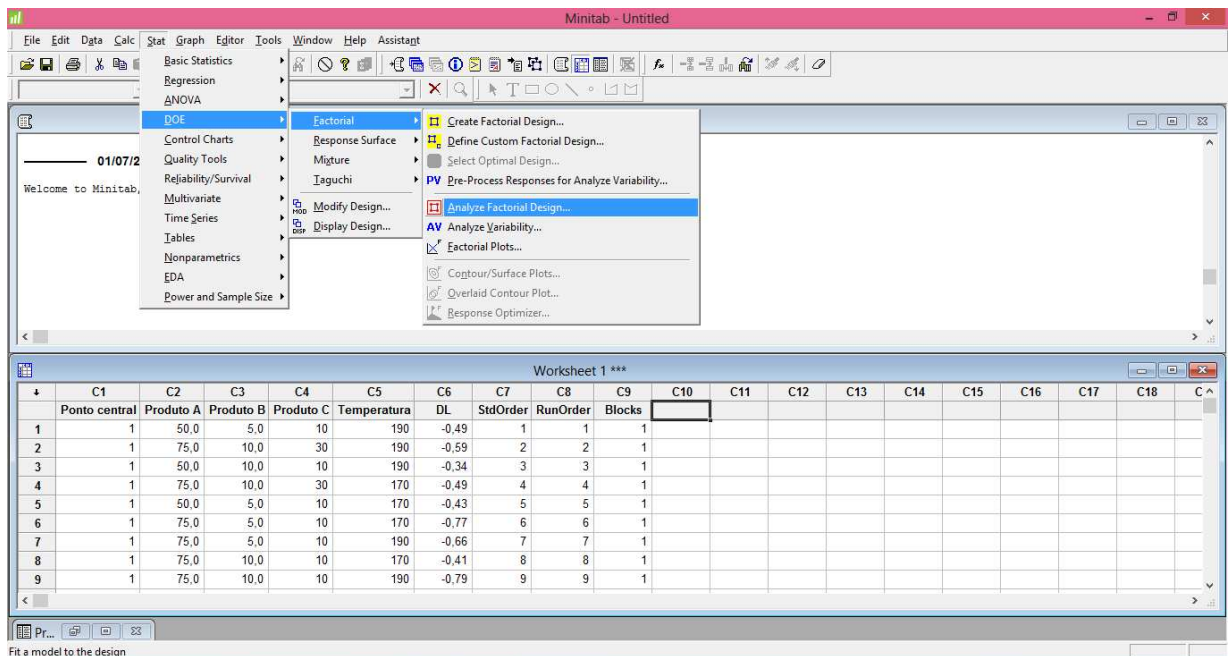
	C1	C2	C3	C4	C5
	Ponto central	Produto A	Produto B	Produto C	Temperatura
1	1	50,0	5,0	10	190
2	1	75,0	10,0	30	190
3	1	50,0	10,0	10	190
4	1	75,0	10,0	30	170
5	1	50,0	5,0	10	170
6	1	75,0	5,0	10	170
7	1	75,0	5,0	10	190
8	1	75,0	10,0	10	170
9	1	75,0	10,0	10	190

Create a factorial design from data already in the worksheet

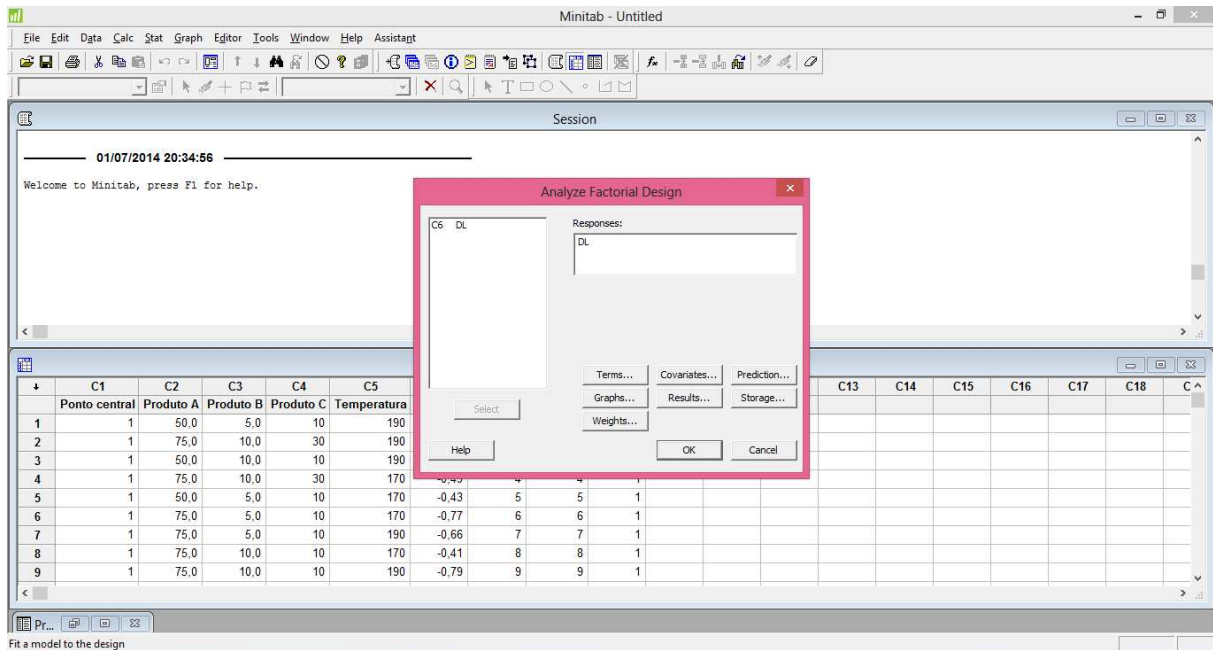
- Passo 5: experimento fatorial definido



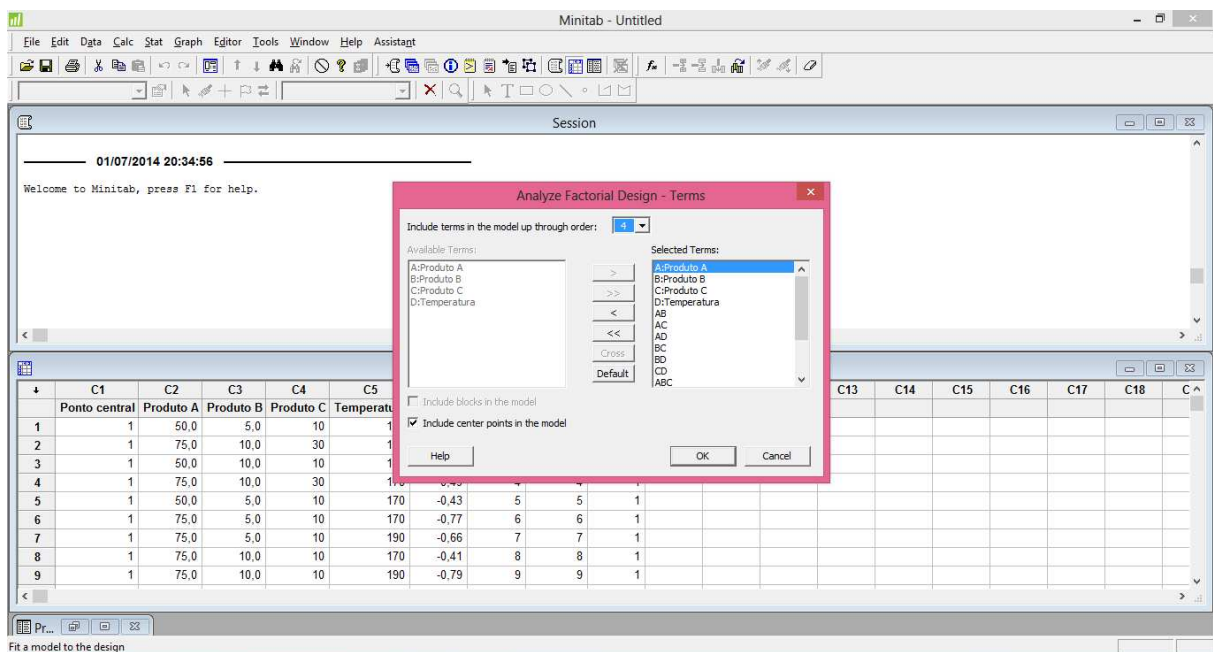
- Passo 6: Realização da análise do experimento fatorial



- Passo 7: Indicação da variável resposta



- Passo 8: Indicar as interações entre os fatores



- Passo 9: Selecionar gráficos de análise

Minitab - Untitled

Session

01/07/2014 20:34:56

Welcome to Minitab, press F1 for help.

Analyze Factorial Design - Graphs

Effects Plots
 Normal Half Normal Pareto
 Alpha: 0,05

Residuals for Plots:
 Regular Standardized Deleted

Residual Plots
 Individual plots
 Histogram
 Normal plot
 Residuals versus fits
 Residuals versus order

Four in one
 Residuals versus variables:

	C1	C2	C3	C4	C5
	Ponto central	Produto A	Produto B	Produto C	Temperatura
1	1	50,0	5,0	10	190
2	1	75,0	10,0	30	190
3	1	50,0	10,0	10	190
4	1	75,0	10,0	30	170
5	1	50,0	5,0	10	170
6	1	75,0	5,0	10	170
7	1	75,0	5,0	10	190
8	1	75,0	10,0	10	170
9	1	75,0	10,0	10	190

Fit a model to the design

- Passo 10: Visualização dos resultados

Minitab - Untitled

Effects Pareto for DL

Pareto Chart of the Standardized Effects
 (response is DL, Alpha = 0,05)

2,008

Term

Standardized Effect

Factor: Name
 A: Produto A
 B: Produto B
 C: Produto C
 D: Temperatura

Residual Plots for DL

Residual Plots for DL

Normal Probability Plot

Versus Fits

Histogram

Versus Order

	C1	C2	C3	C4	C5
5	1	50,0	5,0	10	170
6	1	75,0	5,0	10	170
7	1	75,0	5,0	10	190
8	1	75,0	10,0	10	170
9	1	75,0	10,0	10	190

Current Worksheet: Worksheet 1

- Passo 13: Seleção da variável resposta

Estimated Effects and Coefficients for DL (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Stat	P-Value
Constant		-0,4580	0,02207	-20,74	<0,001
Produto A	-0,1847	-0,0923	0,02207	-4,18	0,000
Produto B	-0,0291	-0,0145	0,02207	-0,66	0,513
Produto C	-0,0253	-0,0127	0,02207	-0,58	0,561
Temperatura	-0,0666	-0,0333	0,02207	-1,51	0,139
Produto A*Produto B	0,0047	0,0023	0,02207	0,10	0,921
Produto A*Produto C	-0,0428	-0,0214	0,02207	-1,92	0,067
Produto A*Temperatura	-0,0253	-0,0127	0,02207	-0,58	0,561
Produto B*Produto C	-0,0334	-0,0167	0,02207	-0,76	0,450

Session

Estimated Effects and Coefficients for DL (coded units)

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19
	Ponto central	Produto A	Produto B	Produto C	Temperatura														
1	1	50,0	5,0	10	190														
2	1	75,0	10,0	30	190														
3	1	50,0	10,0	10	190														
4	1	75,0	10,0	30	170														
5	1	50,0	5,0	10	170	-0,43	5	5	1										
6	1	75,0	5,0	10	170	-0,77	6	6	1										
7	1	75,0	5,0	10	190	-0,66	7	7	1										
8	1	75,0	10,0	10	170	-0,41	8	8	1										
9	1	75,0	10,0	10	190	-0,79	9	9	1										

Analyze Factorial Design

Responses: DL

Terms... Covariates... Prediction...
 Graphs... Results... Storage...
 Weights...
 Select Help OK Cancel

- Passo 14: Seleção dos fatores significativos

Estimated Effects and Coefficients for DL (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Stat	P-Value
Constant		-0,4580	0,02207	-20,74	<0,001
Produto A	-0,1847	-0,0923	0,02207	-4,18	0,000
Produto B	-0,0291	-0,0145	0,02207	-0,66	0,513
Produto C	-0,0253	-0,0127	0,02207	-0,58	0,561
Temperatura	-0,0666	-0,0333	0,02207	-1,51	0,139
Produto A*Produto B	0,0047	0,0023	0,02207	0,10	0,921
Produto A*Produto C	-0,0428	-0,0214	0,02207	-1,92	0,067
Produto A*Temperatura	-0,0253	-0,0127	0,02207	-0,58	0,561
Produto B*Produto C	-0,0334	-0,0167	0,02207	-0,76	0,450

Session

Estimated Effects and Coefficients for DL (coded units)

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19
	Ponto central	Produto A	Produto B	Produto C	Temperatura														
1	1	50,0	5,0	10	190														
2	1	75,0	10,0	30	190														
3	1	50,0	10,0	10	190														
4	1	75,0	10,0	30	170														
5	1	50,0	5,0	10	170	-0,43	5	5	1										
6	1	75,0	5,0	10	170	-0,77	6	6	1										
7	1	75,0	5,0	10	190	-0,66	7	7	1										
8	1	75,0	10,0	10	170	-0,41	8	8	1										
9	1	75,0	10,0	10	190	-0,79	9	9	1										

Analyze Factorial Design - Terms

Include terms in the model up through order: 4

Available Terms: A:Produto A, B:Produto B, C:Produto C, D:Temperatura, AB, AC, AD, BC, BD, CD, ABC

Selected Terms: A:Produto A

Include blocks in the model
 Include center points in the model

Help OK Cancel

APÊNDICE A – Etapas para a efetuação do cálculo do p-valor através do *software Excel*

Inicialmente, deve-se padronizar a forma de apresentação dos dados, através da tabulação dos efeitos principais (fatores do experimento) e seus respectivos níveis, as possíveis interações existentes entre eles, juntamente com o ponto central. A apresentação correta ocorre através da definição de variáveis *dummies*, consideradas como variáveis preditoras, representadas por 1 e -1, pelo qual o valor -1 representa o nível mínimo do fator e o valor 1 representa o nível máximo do fator. Quando há a adição de ponto central, a variável *dummy* é então definida pelo valor 0. O QUADRO 10 contém a apresentação dos dados para análise, com definição das variáveis *dummies*.

O p-valor é calculado com objetivo de resolução do teste de hipóteses, cuja hipótese definida é de que algum coeficiente do modelo é significativo. Assim, para avaliar a significância da interação entre o Produto B e Produto C, considera-se o seguinte modelo:

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 D_1 + \beta_2 D_2 + \beta_3 D_3 + \beta_4 D_4 + \beta_5 D_5 + \beta_6 D_6 + \beta_7 D_7 + \beta_9 D_9 + \beta_{10} D_{10} + \beta_{11} D_{11} + \beta_{12} D_{12} + \beta_{13} D_{13} + \beta_{14} D_{14} + \beta_{15} D_{15} + \beta_{16} D_{16}$$

Onde:

\hat{Y} = variável resposta estimada

β = coeficientes de regressão

D = variável *dummy* (preditora)

Observa-se que a variável $\beta_8 D_8$ não está presente no modelo a ser testado, justamente porque refere-se à interação entre o Produto B e Produto C, como pode ser observado na coluna 8 – BC do QUADRO 10. Retirando esta variável do modelo é possível avaliar se ela possui significância para o resultado da variável resposta. Nesse caso o teste de hipótese é definido por:

$$H_0: \beta_8 = 0$$

$$H_1: \beta_8 \neq 0$$

ENSAIOS (n)	EFEITOS PRINCIPAIS				INTERAÇÕES DE SEGUNDA ORDEM						INTERAÇÕES DE TERCEIRA ORDEM				INTERAÇÃO DE QUARTA ORDEM	EFEITO CURVATURA (PONTO CENTRAL)	VARIÁVEL RESPOSTA
	A (Produto A)	B (Produto B)	C (Produto C)	D (Temperatura)	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	ACD	BDC	ABCD	Efeito quadrático (D1 ²)	Y1=DL
	D1	D2	D3	D4	D5=D1D2	D6=D1D3	D7=D1D4	D8=D2D3	D9=D2D4	D10=D3D4	D11=D1D2D3	D12=D1D2D4	D13=D1D3D4	D14=D2D3D4	D15=D1D2D3D4	D16	
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-0,49
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-0,59
3	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-0,34
4	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-0,49
5	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-0,43
6	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-0,77
7	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	-0,66
8	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-0,41
9	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-0,79
10	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-0,74
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,84
12	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-0,65
13	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-0,60
14	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-0,23
15	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-0,61
16	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-0,81
17	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-0,74
18	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-0,40
19	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-0,72
20	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-0,49
21	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-0,78
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,67
23	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-0,68
24	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-0,92
25	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-0,42
26	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-0,62
27	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-0,58
28	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-0,63
29	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-0,20
30	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	-0,69
31	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-0,84
32	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-0,90
33	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-0,86
34	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-0,53
35	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-0,64
36	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-0,95
37	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-0,90
38	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-0,76
39	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-0,62
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,81
41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-0,88
42	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-0,91
43	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-0,61
44	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	-0,80
45	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-0,98
46	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-0,76
47	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-0,87
48	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-0,63
49	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-0,70
50	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-0,45
51	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-0,73
52	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	-0,83
53	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-0,44
54	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-0,66
55	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-0,32
56	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-0,72
57	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-0,47
58	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-0,53
59	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-0,85
60	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-0,77
61	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-0,31
62	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-0,84
63	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-0,95
64	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-0,74
65	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-0,21
66	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-0,87
67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,97
68	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-0,80

QUADRO 10 – Apresentação dos dados – Variáveis *dummies*Fonte: *Software Excel*

A seguir são descritas as etapas para cálculo do p-valor, juntamente com a definição das fórmulas utilizadas, através da utilização do *software Excel*.

- Etapa 1 – Definição dos valores dos parâmetros do modelo

Através da função *proj.lin* assume-se valores para os parâmetros do modelo, considerando os valores da variável resposta e as variáveis preditoras – *dummies* – em todos os ensaios realizados.

Para esta análise, é importante realizar dois cálculos, sendo o primeiro considerando o modelo completo; o segundo deve-se considerar o modelo indicado como sendo do teste de significância da interação entre o Produto B e Produto C. Serão necessárias essas duas definições para os cálculos das etapas posteriores.

- Etapa 2 – Estimação da variável resposta do modelo

Após definição dos parâmetros do modelo, é possível estimar o valor que variável resposta (\hat{Y}) pode assumir, considerando a substituição dos valores dos parâmetros e das variáveis *dummies* no modelo completo. Em sequência, estima-se também a variável resposta incompleta (\hat{Y}_i), desconsiderando-se a variável relativa à interação entre Produto B e Produto C.

- Etapa 3 – Determinação da variância de Y , \hat{Y} e \hat{Y}_i

Deve-se calcular a variância dos valores das variáveis respostas – Y , \hat{Y} e \hat{Y}_i . Esse resultado será utilizado em cálculos posteriores. Para esse cálculo utiliza-se a função *vara*, selecionando-se todos os valores de cada variável resposta.

- Etapa 4 – Determinação do Coeficiente de Determinação – R^2

R^2 representa a proporção da variabilidade da variável resposta explicada pelo modelo. Seu valor é encontrado através da aplicação da fórmula:

$$R^2 = \frac{\sigma^2(\hat{Y})}{\sigma^2(Y)}$$

É importante observar que, para encontrar o valor de R^2 , deve-se levar em consideração todas as variáveis preditoras, ou seja, o modelo completo.

Neste caso, o resultado encontrado foi:

$$R^2 = \frac{0,01501}{0,03874} = 0,38758$$

- Etapa 5 – Determinação do Coeficiente de Determinação Incompleto – R^2_i

Nesta etapa, calcula-se o R^2_i , considerando-se o modelo incompleto, sem a variável relativa à interação entre Produto B e Produto C. Utiliza-se a seguinte fórmula:

$$R^2_i = \frac{\sigma^2(\hat{Y}_i)}{\sigma^2(Y)}$$

Ao substituir os valores na fórmula, encontra-se o resultado:

$$R^2_i = \frac{0,01475}{0,03874} = 0,38068$$

- Etapa 6 – Cálculo da estatística de teste – F

Deve-se calcular a estatística de teste para avaliar a hipótese definida. Para seu cálculo é utilizada a fórmula a seguir:

$$F = \frac{(R^2 - R^2_i) / j}{(1 - R^2) / (n - k - 1)}$$

Sendo:

R^2 : Coeficiente de determinação

R^2_i : Coeficiente de determinação incompleto

j: número de restrições em H_0

n: tamanho da amostra

k: número de parâmetros do modelo

Substituindo-se os valores definidos nas etapas anteriores na fórmula, tem-se o seguinte resultado:

$$F = \frac{(0,38758 - 0,38068) / 1}{(1 - 0,38758) / (68 - 16 - 1)} = 0,57398$$

- Etapa 7 – Cálculo do p-valor

Para este cálculo utiliza-se a função *distf*, que considera o valor da estatística de teste F, o número de restrições em H_0 (j) e o tamanho da amostra menos o número de parâmetros do modelo menos 1 ($n-k-1$).

Com a aplicação dessa função, encontra-se o p-valor = 0,452.