

ELTON VIEIRA DE FREITAS

**Melhoria de processos utilizando técnicas de Delineamento de Experimentos
Estudo de caso de um processo de conformação de vidro para utensílios
domésticos**

São Paulo
(2016)

ELTON VIEIRA DE FREITAS

**Melhoria de processos utilizando técnicas de Delineamento de Experimentos
Estudo de caso de um processo de conformação de vidro para utensílios
domésticos**

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Especialista em
Gestão e Engenharia da Qualidade

Orientador: Prof. Dr. Adherbal Caminada
Netto

São Paulo
(2016)

ELTON VIEIRA DE FREITAS

**Melhoria de processos utilizando técnicas de Delineamento de Experimentos
Estudo de caso de um processo de conformação de vidro para utensílios
domésticos**

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Especialista em
Gestão e Engenharia da Qualidade

Orientador: Prof. Dr. Adherbal Caminada
Netto.

São Paulo
(2016)

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.0	Diagrama das etapas de um Delineamento de Experimentos	24
Figura 1.1	Fluxo do processo Máquina Prensa.	30
Figura 1.2	Exemplos de produtos Máquina Prensa	31
Figura 1.3	Fluxo do processo Máquina H-28.	32
Figura 1.4	Exemplos de produtos da máquina H-28.	32
Figura 1.5	Fluxo do processo Máquina I.S (Prensado/Soprado)	33
Figura 1.6	Fluxo do processo Máquina I.S (Soprado/Soprado)	33
Figura 1.7	Exemplos de produtos Máquina I.S	34
Figura 1.8	Fluxo do processo Máquina Spinning	34
Figura 1.9	Exemplos de produtos Máquina Spinning	35
Figura 2.0	Ciclo de trabalho máquina H-28.	37
Figura 2.1	Modelo de Processo.	39
Figura 2.2	Planejamento 2^3	41
Figura 2.3	Gráfico dos efeitos para o primeiro experimento.	48
Figura 2.4	Gráfico de probabilidade normal dos efeitos do primeiro experimento.	48
Figura 2.5	Gráfico dos efeitos para o segundo experimento.	51
Figura 2.6	Gráfico de probabilidade normal dos efeitos do segundo experimento.	51
Figura 2.7	Gráfico dos efeitos principais.	53
Figura 2.8	Gráfico das interações.	54
Figura 2.9	Gráfico de cubo.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.0	Matriz de Planejamento do Experimento fatorial 2^3	19
Tabela 1.1	Escolha dos níveis.	40
Tabela 1.2	Matriz do Experimento.	42
Tabela 1.3	Resultado do primeiro experimento.	44
Tabela 1.4	Resultado do segundo experimento.	45
Tabela 1.5	Matriz para cálculo dos Efeitos do primeiro experimento.	47
Tabela 1.6	Cálculo dos Efeitos do primeiro experimento.	47
Tabela 1.7	ANOVA primeiro experimento.	49
Tabela 1.8	Matriz para cálculo dos Efeitos do segundo experimento.	50
Tabela 1.9	Cálculo dos Efeitos do segundo experimento.	50
Tabela 2.0	ANOVA segundo experimento.	52
Tabela 2.1	Valores médios para temperatura do macho.	54
Tabela 2.2	Valores previstos para equação de regressão.	56
Tabela 2.3	Combinações para teste de validação.	57
Tabela 2.4	Resultado do experimento de validação.	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO	12
1.2	ESCOPO DO TRABALHO.....	12
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	13
2.1	ESTATÍSTICA E SEU CONTEXTO HISTÓRICO	13
2.2	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS	14
2.3	CONCEITOS BÁSICOS DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS	15
2.4	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS NAS INDÚSTRIAS.....	16
2.5	TIPOS DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS	17
2.5.1	Experimento com 1 único fator e totalmente aleatorizado	17
2.5.2	Planejamento fatorial completo 2^k	18
2.5.3	Planejamento fatorial fracionado 2^{k-p}	20
2.5.4	Experimento fatorial em quadrado latino.....	21
2.5.5	Operação evolutiva.....	22
2.6	ETAPAS DO EXPERIMENTO.....	24
2.7	ANÁLISE DE VARIÂNCIA.....	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4	CARACTERIZAÇÃO DA ORGANIZAÇÃO.....	28
4.1	FABRICAÇÃO DE VIDRO.....	28
4.2	CONTEXTO HISTÓRICO DA EMPRESA ALFA.....	29
4.3	PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE VIDRO.....	30
4.3.1	Máquina Prensa.....	30
4.3.2	Máquina H-28 (Hart Ford 28).....	31
4.3.3	Máquina I.S (Individual Section).....	32
4.3.4	Máquina Spinning.....	34
5	DESENVOLVIMENTO.....	36
5.1	RECONHECIMENTO E RELATO DO PROBLEMA.....	36
5.1.1	Descrição do processo em estudo.....	36
5.2	ESCOLHA DOS FATORES E NIVEIS.....	38
5.2.1	Escolha dos fatores.....	39

5.2.2	Escolha dos níveis.	40
5.3	ESCOLHA DA VARIÁVEL RESPOSTA.	40
5.4	ESCOLHA DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.	41
5.5	REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO.	42
5.5.1	Primeiro experimento.	43
5.5.2	Segundo experimento.	44
5.6	ANÁLISE DOS DADOS.	45
5.6.1	Análise dos dados do primeiro experimento.	45
5.6.2	Análise dos dados do segundo experimento.	49
5.6.3	Análise do modelo.	52
5.6.4	Experimento de confirmação.	56
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.	59
	REFERÊNCIAS.	62
	APÊNDICE A.	64
	APÊNDICE B.	65

AGRADECIMENTOS

Ao iniciar este paragrafo é possível notar que mais um ciclo é uma vida profissional chega ao fim. A conclusão de tal ciclo mostra o alcance de um objetivo iniciado com a decisão de ingressar em um curso de Pós-graduação tão renomeado como este.

Posto isto gostaria de agradecer a Deus por me conceder capacidade de realizar este trabalho.

A minha querida Mãe (em memoria) que me proporcionou um aprendizado jamais descrito em nenhum livro.

A meu querido pai, pelas conversas e lições de vida aprendidas, vivenciadas pelo seu exemplo de homem.

A minha amada esposa, pelos momentos de apoio, carinho e compreensão.

A meus irmãos, pelo companheirismo em nossas relações.

Ao Engenheiro Flávio Fugukava, por depositar em mim confiança para executar tal trabalho.

Ao Mestre Prof. Dr. Adherbal Caminada Netto, pela excelente orientação na condução deste trabalho.

Ao Sr. Gilberto José, pelas horas dedicadas para contribuir na execução deste estudo.

A todos, o meu sincero agradecimento.

A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original.

Albert Einstein

RESUMO

O presente trabalho aplica as técnicas de Delineamento de Experimentos a um processo de conformação de vidro para utensílios doméstico, a fim de definir a influência dos fatores temperatura do vidro, altura de mola (força de prensagem) e altura do mancal (penetração do macho) na variável resposta temperatura do macho e posteriormente criar uma relação matemática entre as variáveis, com o objetivo de reduzir a temperatura de trabalho do macho. O tipo de planejamento escolhido para a execução do experimento foi o planejamento fatorial completo 2^3 , executado em uma máquina H-28 cuja conformação do vidro ocorre através do processo prensado e soprado. Constatou-se que os fatores, temperatura do vidro, altura da mola e altura do mancal, bem como a interação altura do mancal e temperatura do vidro exercem influência na variável resposta. Foi utilizada a técnica de análise de regressão para equacionar a relação entre as variáveis possibilitando ajustar os fatores em níveis que gerassem um menor valor da temperatura de trabalho do macho, sem que a qualidade final do produto fosse comprometida.

Palavras-Chave: Delineamento de Experimentos; Conformação de vidro; Planejamento Fatorial Completo 2^3 ; Análise de regressão; Processo Prensado e Soprado.

ABSTRACT

The present work applies as techniques of Design of Experiments a glass forming process for housewares, in order to define an influence of the factors glass temperature, spring height (press force) and height of the bearing (male penetration) the variable temperature response of male and then create a mathematical relationship between the variables, in order to reduce the male working temperature. The planning type chosen for the implementation of the experiment was full factorial 2^3 , executed in an H-28 machine whole glass forming process occurs through the compressing and blowing. It was found that the factors, glass temperature, spring height and height of the bearing influence the response variable. The regression analysis technique was used to equate the relationship between the variable with allow adjusting factors at levels that generate fewer male working temperature, without the quality of final product was compromised.

Keywords: Design of experiments; glass conformation; factorial planning full 2^3 , regression analysis; compressing and blowing process.

1 INTRODUÇÃO

O atual cenário econômico mundial requer das organizações uma maior atenção à competitividade, definida por Ferraz (1996) como a capacidade de a empresa formular e implementar estratégias concorrenciais que lhe permitam ampliar (ou conservar), de forma duradoura, uma posição sustentável no mercado. Este fato está intimamente ligado com a ideia de manter ou buscar novos clientes, satisfazer suas expectativas de forma que diminua o espaço entre cliente e fornecedor.

A manutenção da satisfação dos clientes leva as empresas a terem um ciclo de melhoria continua de seus processos, visando acompanhar a evolução de suas necessidades e agir com rapidez aos espasmos do mercado. A necessidade de reestruturar processos visa basicamente atender a dois requisitos: custo e qualidade, fatores de grande relevância para a competitividade.

A busca pela melhoria continua traz a necessidade das empresas reinventarem seus processos, de modo que seja possível produzir a mesma quantidade com o menor custo, sem que este afete a qualidade final do produto.

Neste momento é importante que seja feita uma análise crítica de seus processos, a fim de minimizar desperdícios com atividades que não agregam valor, com a visualização dos processos através de seus fluxos é possível redesenhar a forma de fazer as coisas buscando redução de custos e melhorias tanto para os clientes internos como para os externos (Kim, 2002).

Segundo CAMPOS (2013) embora as melhorias sucessivas sejam muito importantes, é necessário questionar constantemente os seus produtos e o seu próprio processo, fato este que devido a turbulências externas o seu processo pode deixar de atender as expectativas propostas inicialmente, havendo a necessidade de uma reestruturação de suas atividades.

Diversos são os métodos e ferramentas existentes hoje para utilização em melhorias de processos, o que separa o sucesso do insucesso na realização de um projeto é a análise minuciosa de seu escopo e do cenário da organização onde será realizado, adequando o método ou ferramenta escolhido às necessidades levantadas.

As ferramentas de análise estatísticas tem mostrado um enorme poder na solução de problemas relacionados à melhoria dos processos, diminuindo custos em suas etapas e gerando maior confiabilidade nos resultados.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem o objetivo de estudar o fluxo de fabricação de vidro oco (está etapa do processo será descrita em detalhes mais adiante), na etapa de conformação (prensagem do vidro), verificando a influência das variáveis, temperatura do vidro, altura de mola e altura do mancal, exerce na variável temperatura do equipamento macho. Propor melhorias em seu processo que gerem uma redução na temperatura de trabalho do equipamento macho, através de ferramentas de análise estatística utilizando o Delineamento de Experimentos.

Este objetivo geral pode ser dividido em três objetivos particulares:

- Estudar do processo de conformação de vidro oco a fim de determinar quais os melhores valores de ajustagem dos parâmetros;
- Estudar a implantação da ferramenta de Delineamento de Experimentos como uma técnica eficaz na solução de problemas nas indústrias, avaliar suas técnicas e as dificuldades encontradas;
- Contribuir com a aproximação entre universidade e indústria através do emprego dos conhecimentos adquiridos em sala de aula na prática.

1.2 ESCOPO DO TRABALHO

A melhoria continua deve fazer parte do cotidiano das organizações atuais de modo que venha a contribuir agregando conhecimento aos processos. No ambiente industrial esta visão pode ser descrita através da busca de alcançar melhores resultados, aumentando a qualidade e reduzir custos nas diversas etapas da cadeia do processo.

O presente trabalho traz uma abordagem do uso de técnicas de Delineamento de Experimentos aplicado ao departamento de produção, na etapa de prensagem do vidro. Limita-se este trabalho aos processos de obtenção do produto final através do processo de sopragem da massa de vidro. MAIA (2003) exemplifica o processo de produção de vidro, onde as peças de vidros são sopradas dentro de moldes, os quais podem ser apenas polidos no seu interior ou revestidos de uma camada de cortiça carbonizada, podendo ainda isto acontecer com o vidro parado ou girando dentro do molde.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ESTATÍSTICA E SEU CONTEXTO HISTÓRICO

A palavra estatística foi concebida a primeira vez por Gottfried Achemmel no século XVIII, entretanto sua origem monta à antiga história e deriva da palavra em latim Status, que significa estado, sua aplicação era essencialmente levantamentos de censos da população e riquezas a fim de servir de informações básicas para os governantes terem conhecimento de seus povos e terras. Um dos primeiros censos que se tem conhecimento foi realizado por Heródoto, e tinha como objetivo levantar a riqueza da população do Egito, para estabelecer quais eram os recursos disponíveis para a construção das pirâmides a 3050 a. C.

Na história mais recente, é possível destacar o uso por Pipino, em 758, e Carlos Magno, em 762 que realizaram estatísticas sobre as propriedades da igreja. No século XVII, na Inglaterra dados sobre a saúde pública, referentes a nascimento, mortes eram utilizados em estatísticas por John Graunt (1620 – 1674) e Willian Petty (1623 – 1687) a fim de formas qualitativas dos fenômenos sócias e políticos.

No século XIX, a estatística consolida os conhecimentos adquiridos anteriormente, e avança para o seu uso não somente para informações demográficas e econômicas. Inicia-se neste período o uso da estatística nas diversas áreas do conhecimento humano, tais como, Medicina, Física, Psicologia, Comércio, Indústria, meteorologia etc.

Segundo CRESPO (2002) estatística pode ser definida como a parte da matemática aplicada que fornece métodos para a coleta, descrição, análise e a interpretação de dados para a utilização dos mesmos na tomada de decisão. Esta definição de estatística descreve claramente seu uso atualmente e sua eficácia tem levado a ser uma ferramenta indispensável nas indústrias modernas.

Um dos fatos que marcaram de vez a entrada da estatística na indústria foi o uso por Shewhart, em 1924, desenvolvendo os conceitos estatísticos de gráficos de controle. Na segunda Guerra Mundial o uso dos controles estatísticos aumentou de escala, sendo evidenciadas claramente as necessidades de controlar e melhorar a qualidade do produto.

2.2 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Experimentos são processos realizados constantemente nos meios científicos, sócias, indústrias e em outras tantas áreas de estudo da humanidade. É dado a Ronald A. Fisher o crédito de realizar um trabalho pioneiro no estudo de experimentos na agrícola, em Londres, entre as décadas de 20 e 30. Seus trabalhos foram de extrema importância para o desenvolvimento desta técnica, destacando-se sua obra “The Design of experiments”, publicada em 1935 que trouxe conceitos fundamentais. Segundo MONTGOMERY (2005), Fisher reconheceu que falhas na forma de realizar as experiências que geraram os dados dificultassem a análise dos resultados do sistema, ao interagir com cientistas e pesquisadores em muitos campos, ele desenvolveu as ideias que levaram aos princípios de aleatorização, replicação e blocagem.

Segundo CALEGARE (2001), um experimento é definido como um teste ou uma série de testes nos quais são feitas mudanças propositalmente nas variáveis da entrada de um processo ou sistema de forma que possam ser observadas e identificadas as razões para as mudanças na resposta de saída. A realização de testes no ambiente industrial auxilia o gerenciamento do negócio no processo de tomada de decisão, suponha que um gerente necessite saber qual máquina produz determinado produto com maior desempenho, através do planejamento de experimentos é possível delinear a produção para máquina que mostrar melhor resultado nos testes.

O planejamento de experimentos também é usado na etapa de projeto do produto ou processo, segundo SLACK et al. (1997), o projeto de um produto envolve cinco etapas:

- Geração do conceito;
- Triagem;
- Projeto preliminar;
- Avaliação/Melhoria;
- Prototipagem/Projeto final.

É possível através da determinação das variáveis de controle e variável resposta realizarem experimentos a fim de identificar a interação entre as variáveis que possam justificar a viabilidade do projeto.

Delineamento de experimento é uma ferramenta diversificada, sendo possível sua aplicação em diversas áreas, iremos, portanto focar nossos estudos na aplicação industrial, objeto de análise deste trabalho.

2.3 CONCEITOS BÁSICOS DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Para dar continuidade com a abordagem de planejamento de experimento é necessário definir termos que são usuais em sua aplicação.

- **Processo:** Segundo CALEGARE (2001), processo é definido como um conjunto de causas que produzem um ou mais efeitos;
- **Variáveis de resposta:** são variáveis dependentes (variáveis de saída) que sofrem algum efeito quando modificado algum fator propositalmente durante o teste. ALBERTO (2013), explica que no contexto da Gestão da Qualidade a resposta será a característica da Qualidade em que os investigadores estão interessados em aperfeiçoar.
- **Fatores de Controle:** são as variáveis alteradas durante a realização do experimento para poder avaliar o efeito causado na variável resposta.
- **Ruído:** São fatores conhecidos ou não que influenciam nas variáveis de resposta. Estes ruídos podem ser causados por fontes externas, tais como, temperatura e umidade ou por fontes internas como desgaste do equipamento ou fadiga.
- **Níveis dos fatores:** denominam-se fatores de níveis as condições operacionais de cada fator de controle.
- **Matriz de experimento:** é o plano formalizado elaborado para realizar o experimento.
- **Aleatorização:** definição da ordem dos tratamentos da matriz. Este processo não pode ser tendencioso e deve ser realizado de forma aleatória, como é uma jogada de dados. Segundo ALBERTO (2013), esta técnica é fundamental para a realização do delineamento de experimentos é trata-se de um processo puramente estatístico, onde o objetivo é espalhar o erro experimental ao acaso entre as várias rodadas da observação.
- **Tratamentos:** combinação dos níveis dos fatores.

- **Repetições:** é a realização de todas as combinações novamente sob as mesmas condições. Para MONTGOMERY (2005), este conceito permite encontrar uma estimativa do erro experimental.
- **Blocos:** processo de monitorar a variabilidade produzida pelos fatores perturbadores do experimento. Segundo ALBERTO (2013) está é uma técnica muito importante utilizada nas indústrias e tem como objetivo aumento da precisão.
- **Efeito de um fator:** mudança percebida na resposta ocasionada por uma alteração no nível de um fator.

2.4 PLANEJAMENTOS DE EXPERIMENTOS NAS INDÚSTRIAS

A preocupação dos engenheiros e gestores nas indústrias com a otimização dos processos é um fato relevante para garantir a competitividade de uma empresa no atual mercado. Segundo MONTGOMERY (2004) desde 1980 os engenheiros e cientistas vêm se tornando cada vez mais consciente dos benefícios da utilização de experimentos planejados.

Os processos indústrias normalmente operam com um número alto de variáveis, sejam elas características de um equipamento ou devido a condições ambientais, tais variáveis impactam diretamente no resultado do processo, influenciando nas características da qualidade dos produtos. Para MONTGOMERY (2004) planejar processos de modo que o produto manufaturado fique tão próximo quanto possível das especificações alvo desejadas é um dos objetivos dos estudos de robustez de um processo, realizado através de experimentos indústrias.

Dentre os benefícios que tornam o planejamento de experimentos uma ferramenta atrativa às indústrias, pode destacar o baixo custo de sua realização sem que interfira na precisão estatística da resposta. Segundo MONTGOMERY (2004) o fato de levar as características de o produto ficar perto do valor alvo minimiza a variabilidade tornando assim processos mais robustos, com menor número de defeitos nos produtos fabricados.

Os conhecimentos adquiridos acerca do assunto estudado durante a realização do experimento é outro fato marcante nesta técnica, através de suas etapas é possível colher informações do processo outrora desconhecidas, isto se deve, pois estamos estudando os diversos fatores relevantes do processo, os efeitos causados por eles

na variável de saída, as interações entre estes fatores e resultado gerado por estas interações.

MONTGOMERY (2004) ainda cita que os métodos de controle estatístico do processo (CEP) estão intimamente correlacionados com as técnicas de planejamento de experimentos, por exemplo, suponha que um gráfico de controle indique que o processo está fora de controle, e que o processo tenha várias variáveis de entrada controláveis. A menos que saibamos quais variáveis de entrada são importantes, poderá ser muito difícil trazer o processo para o controle novamente. Através do planejamento de experimentos é possível identificar quais variáveis estão influenciando no processo.

2.5 TIPOS DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Em um projeto realizado com o auxílio do planejamento de experimentos, podem ser aplicadas diversas técnicas para sua execução. O fato que determina a escolha técnica a ser utilizada é o cenário em que o projeto acontece. A seguir serão listados alguns dos principais tipos de planejamentos e uma definição sucinta para cada um deles, não é o intuito deste trabalho o aprofundamento destes tópicos e sim uma abordagem a fim de evidenciar os tipos mais usuais. Vale ressaltar que existem obras completas sobre o assunto com maior grau de profundidade dos temas como o livro de Douglas C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*.

2.5.1 Experimento com 1 único fator e totalmente aleatorizado

Este é o tipo mais simples de experimento, onde o pesquisador está interessado em saber se um determinado fator influencia na variável resposta. É necessário que o ambiente onde o experimento será executado seja o mais uniforme possível, tais como, laboratório, estufas, etc.

CALEGARE (2001) cita dois modelos, o modelo de efeito fixo, onde o executor escolhe o fator e os seus níveis que serão utilizados no experimento, neste caso as conclusões obtidas só serão válidas para os níveis escolhidos daquele fator específico, não sendo estendida a outros níveis ou outros fatores.

O modelo estatístico linear abaixo descreve as observações no caso do efeito fixo:

$$Y_{ij} = \mu + \beta_i + \varepsilon_{ij}, (i = 1, 2 \dots a; j = 1, 2 \dots n) \quad (1)$$

Onde: Y_{ij} - resposta obtida no tratamento (i), para replica (j);
 μ - média global, comum a todos os tratamentos;
 β_i - efeito do tratamento i;
 ε_{ij} - componente do erro aleatório;
a - número de tratamentos; e
n - número de replicas por tratamento.

Outro modelo citado por CALEGARE (2001) é o modelo de efeitos aleatórios, onde os níveis do fator são escolhidos por meio de sorteio. As conclusões obtidas neste caso podem ser estendidas a todos os níveis do fator, mesmo que não tenha sido objeto de estudo.

O modelo estatístico que o descreve é o mesmo apresentado para o modelo de efeito fixo, como podemos ver a seguir:

$$Y_{ij} = \mu + \beta_i + \varepsilon_{ij}, (i = 1, 2 \dots a; j = 1, 2 \dots n) \quad (2)$$

Onde: Y_{ij} - resposta obtida no tratamento (i), para replica (j);
 μ - média global, comum a todos os tratamentos;
 β_i - efeito do tratamento i;
 ε_{ij} - componente do erro aleatório;
a - número de tratamentos; e
n - número de replicas por tratamento.

Sendo que neste caso a interpretação do parâmetro β_i é diferente, pois agora β_i é uma variável aleatória.

2.5.2 Planejamento fatorial completo 2^k

Segundo ALBERTO (2013) o Planejamento fatorial completo é uma técnica bastante utilizada quando se tem dois ou mais fatores e deseja-se uma análise de um fator sujeito as combinações dos demais. Para CALEGARE (2001), este tipo de experimento é apropriado com necessitamos saber a interação entre dois ou mais fatores em seus diferentes níveis.

É aconselhável ter experimentos com dois níveis ou no máximo três, o processo experimental desta técnica consiste em realizar testes com cada uma das combinações da matriz experimental, para em seguida determinar e analisar os efeitos originados, desta forma poder identificar as melhores condições experimentais do produto ou processo de fabricação (Alberto. 2013).

Atualmente existem programas computacionais que facilitam a construção dos experimentos, dando agilidade ao processo, entretanto MONTGOMERY (2005) ilustra um exemplo de como construir uma matriz para um planejamento fatorial 2^k . Suponha que um experimento com três fatores (x_1 , x_2 e x_3), cada um destes parâmetros foi testado com dois níveis (-1, +1). Podemos representar a matriz de planejamento fatorial 2^3 na tabela 1.0.

TABELA 1.0 - MATRIZ DE PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO
FATORIAL 2^3

FONTE MONTGOMERY (2005)

N Teste	Fatores de Controle			Ordem do Teste	Resposta (y_1)
	X_1	X_2	X_3		
1	-1	-1	-1	6	y_1
2	+1	-1	-1	8	y_2
3	-1	+1	-1	1	y_3
4	+1	+1	-1	2	y_4
5	-1	-1	+1	5	y_5
6	+1	-1	+1	3	y_6
7	-1	+1	+1	4	y_7
8	+1	+1	+1	7	y_8

GALDÁMEZ (2002) mostra uma forma de criar a tabela manualmente utilizando os conceitos mostrados a seguir:

- Para X_1 , o sinal alterna em grupos de $2^0 = 1$ (ex.: -1, +1);
- Para X_2 , o sinal alterna em grupos de $2^1 = 2$ (ex.: -1, -1, +1, +1);
- Para X_3 , o sinal alterna em grupos de $2^2 = 4$ (ex.: -1, -1, -1, -1, +1, +1, +1, +1);

- Para X_k , o sinal alterna em grupos de 2^{k-1} , ou seja, 2^{k-1} vezes o sinal -1 e 2^{k-1} vezes o sinal +1.

O modelo estatístico do experimento fatorial 2^k é descrito por MONTGOMERY (2005) como:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_i + \lambda_j + \alpha_k + (\beta\lambda_{ij}) + (\beta\alpha_{ik}) + (\lambda\alpha_{jk}) + (\beta\lambda\alpha_{ijk}) + \varepsilon_{ijk} \quad (3)$$

Onde:

μ é a média global dos resultados;

β_i é o efeito principal do fator X_1 ;

λ_j é o efeito principal do fator X_2 ;

α_k é o efeito principal do fator X_3 ;

$(\beta\lambda_{ij})$ é o efeito de interação entre os fatores X_1 e X_2 ;

$(\beta\alpha_{ik})$ é o efeito de interação entre os fatores X_1 e X_3 ;

$(\lambda\alpha_{jk})$ é o efeito de interação entre os fatores X_2 e X_3 ;

$(\beta\lambda\alpha_{ijk})$ é o efeito de interação entre os fatores X_1 , X_2 e X_3 ;

ε_{ijk} é o erro experimental

2.5.3 Planejamento fatorial fracionado 2^{k-p}

Na realização de experimentos nas indústrias é comum a necessidade de estudar o efeito de um ou mais fatores de controle ao mesmo tempo (ABRAHAM et al., 1999), o planejamento fatorial fracionado 2^{k-p} mostra-se eficaz na solução destes problemas. Segundo MONTGOMERY (2005) com esta técnica é possível analisar os efeitos sobre a variável resposta de interesse, de k fatores com dois níveis cada um em 2^{k-p} combinações de testes, realizando desta forma somente uma parte do teste sem comprometer significativamente a precisão das conclusões decorrentes da análise dos resultados.

MONTGOMERY (2005) justifica a utilização desta técnica através de três ideias importantes, dispersão dos efeitos, ou seja, quando existem vários fatores de controle, neste caso é provável que o processo seja influenciado apenas por alguns efeitos principais e de interação de ordem inferior. Outra ideia discutida é a questão da propriedade de projeção, os experimentos fatoriais fracionados podem ser planejados em matrizes maiores, sendo que podem ser construídas a partir de

subconjuntos. Por fim a última característica citada por Montgomery é a experimentação sequencial, que acontece quando é possível combinar a corrida de dois ou mais experimentos fatoriais fracionados.

Um exemplo é apresentado por MONTGOMERY (2005), onde um experimento com três fatores de controle (1, 2 e 3), com dois níveis para cada. Supondo que tenha sido determinado um alto custo para execução do experimento, tornando-se assim inviável para sua realização é possível aplicar a técnica de planejamento fatorial fracionado para obter os resultados desejados com uma solução economicamente viável. O experimento passa de oito combinações iniciais para um experimento de quatro combinações ($2^3/2 = 2^{3-1} = 4$).

2.5.4 Experimento em Quadrado Latino

Segundo CALEGARE (2001) este tipo de experimento reduz o erro residual devido à remoção da variabilidade de fontes de ruído conhecidas. É recomendada sua aplicação quando existe interesse em estudar os efeitos de um fator, entretanto os resultados dos ensaios podem ser afetados por outros dois fatores ou fontes de não homogeneidade e não há indícios de interação entre os fatores. Neste caso estas duas fontes são bloqueadas e o experimento é realizado de forma que o número de nível dos três fatores seja igual.

O modelo estatístico descrito para este tipo de experimento é mostrado a seguir:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_i + \lambda_j + \alpha_k + \varepsilon_{ijk} \quad (4)$$

Onde:

μ é a média global dos resultados;

β_i é o efeito da fonte de ruído i ;

λ_j é o efeito da fonte de ruído j ;

α_k é o efeito principal do fator k ;

ε_{ijk} é o erro experimental

Os resultados obtidos no experimento em quadrado latino dão respostas às questões, tais como, estimativa dos efeitos dos tratamentos do fator em estudo sem

a influência dos fatores bloqueados, possibilidade de comparar os efeitos dos tratamentos do fator em estudo e estimativa da variância.

2.5.5 Operação Evolutiva

O método de experimento EVOP (Operação Evolutiva) surgiu das ideias propostas por Box (1957) com o intuito de se tornar uma técnica de melhoria para a rotina de processos industriais. Para CALEGARE (2001) EVOP constitui um tipo de experimento bastante simples, porém muito poderoso e com ampla aplicação industrial, especialmente em indústrias de processos.

Segundo MONTALVÃO (1978) esta técnica usa um ciclo de pequenas variações no processo de forma planejada, sendo que estas variações consistem em alterar, por turnos, cada uma das variáveis e repetir o ciclo continuamente.

A concepção da operação evolutiva traz a ideia de uma ferramenta de delineamento de experimentos simples que possa ser utilizada pelos operadores de processos, não havendo nenhuma alteração na rotina da produção. Segundo SOBRINHO (2002) as circunstâncias são muito diferentes daquelas de laboratórios ou planta piloto, onde dinheiro e tempo adicionais devem ser empregados.

Em geral o objetivo do EVOP é aumentar o lucro de uma planta já em operação, maximizando suas saídas, sem prejudicar demais a produção e com mínimos riscos e esforços (Calegare, 2001).

Uma analogia a questão da seleção natural pode ser feita no EVOP. Podemos comparar a evolução dos organismos vivos que avançam através da seleção natural, isto é, sofrem mutações ao longo do tempo para sobreviverem às mudanças no seu ambiente. De forma similar podemos comparar a técnica EVOP como uma evolução gradual das variáveis de processos com pequenos passos em torno dos valores de referência para verificar em que direção é obtida os melhores resultados (Calegare, 2001).

A seguir listaremos seis passos recomendados para a realização da operação evolutiva, segundo CALEGARE (2001).

- **Passo 1:** estudar o assunto. Neste passo é importante entrar em contato com relatórios da empresa relacionados com o processo, resultados do processo referente à produção, qualidade e custo e buscar apoio nas literaturas sobre o assunto.

- **Passo 2:** obter o apoio da administração. Para conseguir êxito no projeto é fundamental que a alta direção tenha conhecimento do escopo do e que seus objetivos sejam compartilhados por eles.
- **Passo 3:** Treinar o pessoal envolvido com o processo. Se todos os envolvidos não tiverem uma clareza do que está acontecendo, certamente o trabalho encontrara obstáculos. Nesta etapa é essencial nivelar as equipes operacionais com os conhecimentos necessários para a execução das tarefas do projeto EVOP.
- **Passo 4:** Fazer um brain-storming com os especialistas e técnicos dos vários departamentos que conhecem o processo, a fim de, verificar qual é a resposta mais importante do processo e selecionar os fatores controláveis mais influentes.
- **Passo 5:** Planejar o experimento (delineamento) do experimento. É importante ressaltar que nesta etapa já se deve ter um conhecimento aprofundado do assunto em questão, minimizando assim erros grosseiros no momento de delinear o experimento.
- **Passo 6:** Executar o experimento, de acordo com o planejado. Nesta etapa são realizadas pequenas mudanças nos níveis dos valores controlados, em torno do valor de referência inicial. Repetir dois ciclos dos ensaios e estimar os efeitos dos tratamentos. Caso as diferenças não sejam significativas executar novos ciclos e estimar os efeitos. Quando dois ou mais efeitos forem significativos, devem-se alterar os valores de forma que os fatores fiquem próximos as melhores condições obtidas, após isto iniciar novos ensaios. Deve-se continuar a mover o ponto central da EVOP e ajustar as amplitudes com relação aos resultados dos ensaios, caso após oito ciclos. Nenhum fator se mostra efetivo, é necessário alterar a amplitude de mudança de nível dos fatores ou selecionar novos fatores controláveis, esta situação deve ser adotada quando se chega ao máximo, ou quando a razão de ganho for muito pequena.

2.6 ETAPAS DO EXPERIMENTO

A descrição deste tópico sugere algumas etapas básicas para um bom desenvolvimento de um Delineamento de Experimento. Para MONTGOMERY (2004) é necessário que todos os envolvidos no experimento tenham uma ideia prévia clara do objetivo do experimento, de quais fatores serão estudados, como o experimento será conduzido. Estas etapas estão descritas na figura 1.0, uma adaptação aos conceitos detalhados por (Montgomery, 2004 & Rotondaro, 2014).

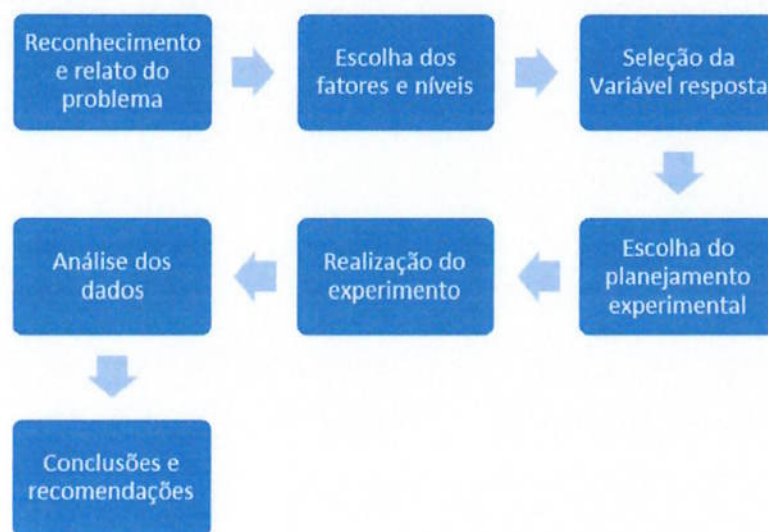


Fig. 1.0 Diagrama das etapas de um Delineamento de Experimentos

A seguir um breve detalhamento de cada etapa:

- **Reconhecimento e relato do problema:** ROTONDARO (2014) explica que nesta fase é necessário definir com clareza qual é o problema estudado. Para MONTGOMERY (2004) na prática é difícil perceber que existe um problema que exige um experimento planejado formal, de modo que isto dificulta a obtenção de um relato claro do problema. Esta etapa deve ser realizada até o esgotamento das ideias sobre o problema. Um relato claro do problema e dos objetivos do experimento costuma contribuir substancialmente para uma melhor compreensão do processo e para uma eventual solução do problema (Montgomery, 2004).
- **Escolha dos fatores e dos níveis:** a escolha correta dos fatores e de seus níveis é fundamental para o sucesso do experimento. MONTGOMERY (2004)

relata que a pessoa que conduz o experimento deve escolher os fatores que devem variar os intervalos sobre os quais esses fatores variarão e os níveis específicos nos quais cada rodada será feita. Pode ser necessária nesta etapa uma listagem com todos os fatores conhecidos do processo, pois estas informações podem resultar uma combinação entre o conhecimento prático e a compreensão teórica do objeto de estudo (Montgomery, 2005).

- **Seleção da variável resposta:** nesta etapa deve-se ter atenção para que a escolha da variável resposta forneça dados que descrevem o objeto de estudo nos parâmetros esperados. MONTGOMERY (2004) destaca nesta fase a importância da capacidade do medidor, ou seja, se a capacidade do medidor for baixa, então apenas grandes efeitos dos fatores estudados poderão ser detectados no experimento.
- **Escolha do planejamento experimental:** a escolha do tipo de planejamento experimental a ser utilizada é recheada com uma infinidade de métodos desenvolvidos ao longo dos tempos para as mais diversas necessidades do pesquisador. Segundo MONTGOMERY (2005) se as três primeiras etapas foram feitas corretamente, não haverá dificuldade na realização desta fase, contudo o responsável por conduzir o experimento deve ter um bom conhecimento dos tipos disponíveis a fim de se obter melhores resultados com um menor custo possível.
- **Realização do experimento:** neste momento, através das etapas anteriores, é de se pensar que todos os envolvidos tenham certo conhecimento do objeto de estudo. Para MONTGOMERY (2005) é de vital importância a minuciosa desta etapa, para garantir que tudo seja feito de acordo com o planejado. No ambiente industrial em específico, deve-se ter atenção aos imprevistos que poderão acontecer durante a realização do experimento, podendo invalidar seus resultados. Segundo MONTGOMERY (2005) é fácil subestimar os aspectos logísticos e de planejamento em um ambiente industrial complexo.
- **Análise dos dados:** segundo ROTONDARO (2014) esta etapa consiste em determinar quais fatores são influentes na resposta estudada. O uso de métodos estatísticos é parte integrante desta fase para a mensuração objetiva dos resultados. Hoje existe uma infinidade de softwares que auxiliam na execução desta etapa, tornando o processo de análise de dados mais eficaz,

contribuindo assim para o uso de Delineamento de Experimentos na indústria, onde muitas vezes não se tem disponível uma pessoa somente para realizar a tarefa árdua de aplicação de técnicas estatísticas avançada. Entretanto é de fundamental importância o conhecimento do responsável pela análise dos dados das técnicas estatísticas necessário para realizar esta análise, tornando o processo de uso dos softwares mais dinâmico e evitando erros de interpretação dos dados.

- **Conclusões e recomendações:** nesta etapa a compilação dos dados deve ser realizada. Segundo ROTONDARO (2014) deve ser elaborado um relatório do qual constam o planejamento e suas justificativas, além dos resultados obtidos. MONTGOMERY (2005) ressalta que uma vez analisados os dados, o experimento deve acarretar conclusões práticas sobre os resultados e recomendar um curso de ação. O uso de métodos gráficos, seguindo conceitos da Gestão para a Qualidade Total, deve ser adotado sempre que possível, pois estes facilitam o entendimento na apresentação dos resultados para outras pessoas.

2.7 ANÁLISE DE VARIÂNCIA

A análise de variância (ANOVA) é uma técnica estatística que permite avaliar as médias de duas ou mais populações verificando se existem diferenças significativas entre as médias e se os fatores exercem influência na variável resposta. Neste contexto a técnica de análise de variância é tida com uma ferramenta fundamental para a análise dos resultados obtidos durante o Delineamento de Experimentos.

Segundo HO et al. (2014) algumas vezes estamos interessados em testar hipóteses do tipo:

- $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$
- H_1 : Existe pelo menos uma diferença

Para CALEGARE (2001) O emprego da análise de variância nos planejamentos experimentais visa comparar duas variâncias obtidas no experimento, a fim de verificar se está dentro dos tratamentos ou residual e se a variância está entre os tratamentos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho será conduzido em uma empresa de fabricação de vidros para uso doméstico e será tratada a questão do processo de conformação através da prensagem da massa de vidro. Será realizada uma pesquisa de caráter experimental, através do uso das técnicas de delineamento de experimento. Segundo HOPPEN et al. (1996) as pesquisas podem ser classificados de acordo com os objetivos propostos para encontrar uma resposta a solução do problema e descreve três tipos de estudos, exploratórios, descritivos e explicativos, sendo este último é o que melhor e enquadra no escopo do trabalho a ser aqui desenvolvido.

Para GIL (2002) os estudos explicativos são usados para identificar os fatores que contribuem para a ocorrência de um fenômeno, ou para determinar através da razão o fundamento das coisas. É neste contexto que o uso de Delineamento de Experimentos surge como uma saída satisfatória as necessidades indústrias, uma vez que estamos interessados em estudar a influência de alguns fatores presentes no processo em seus vários níveis e o que eles e suas interações causam na variável resposta observada.

A técnica utilizada para o desenvolvimento deste trabalho é denominada por REY (1993) como projetos fatoriais com duas ou mais variáveis independentes. Neste caso experimentos são realizados a fim de determinar os efeitos principais e as interações entre os fatores.

As etapas descritas na condução dos trabalhos serão descritas como sugere MONTGOMERY (2005) sendo divididas em sete fases (reconhecimento e relato do problema, escolha dos fatores e dos níveis, seleção da variável resposta, escolha do planejamento experimental, realização do experimento, análise dos dados, conclusões e recomendações).

Para a realização do Delineamento do Experimento será utilizado o software Minitab na versão 17, da empresa Minitab Inc, que contém uma vasta biblioteca de ferramentas para Delineamento de Experimentos e outras tantas ferramentas da Qualidade utilizadas na solução de problemas de caráter industrial. Utilizaremos também a planilha eletrônica do Excel para execução dos cálculos.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ORGANIZAÇÃO

4.1 FABRICAÇÃO DE VIDRO

O vidro é utilizado em diversos seguimentos da humanidade inclusive a indícios de que nossos ancestrais na Idade da Pedra utilizavam em sua forma natural, que é uma rocha vulcânica, conhecida pelo nome de "Obsidiana", para fabricação de pontas de lanças, de flechas e facas. (Maia, 2003).

Os registros sobre a descoberta do vidro datam de 5000 a.C., quando mercadores fenícios ao fazer uma fogueira na beira da praia descobriram acidentalmente que um novo material surgia no lugar da areia.

Para Maia (2003), está lenda tem pouco valor histórico, é de se duvidar que tenha sido essa a verdadeira origem do vidro, pois é pouco provável que com o calor de uma simples fogueira tenha provocado a sua formação. Peças encontradas nos túmulos dos Faraós, contas intercaladas com placas de ouro constituindo colares são para muitos pesquisadores as primeiras peças de vidro.

A evolução da fabricação de vidro teve um marco com a descoberta do vidro soprado, por volta do ano 250 a. C, provavelmente na Síria. Com esta descoberta foi deu-se uma nova função social e econômica ao vidro, deixando de ser um artigo de luxo para fazer parte da utilidade doméstica.

Após está descoberta a indústria do vidro teve um enorme desenvolvimento espalhando pelo mundo, devido à facilidade de aquisição de utensílios de vidro a preços populares, os romanos aperfeiçoaram a arte de fazer vidro e nesta época se tornaram o grande centro da indústria vidreira.

Outro fato marcante neste contexto histórico foi que por volta de 1200 a fama do vidro de Veneza se espalhava pelo mundo e como forma de manter o segredo da produção de vidro, os governantes Venezianos migraram as fabricas para ilha de Murano, conta a história que nesta ilha não era permitida a entrada de pessoas estranhas e que os operários que trabalhavam na ilha só poderiam sair com permissão especial e prometendo que iria voltar, caso isto não acontecesse, sua família era presa e se isto ainda não desse motivo para eles voltarem, eram perseguidos e mortos quando encontrados.

O vidro Veneziano era fino e com alto grau de pureza, razão pelo qual foi chamado na época de “Cristallo” e as taças com asas marcavam o vidro típico da Renascença italiana.

O setor vem se desenvolvendo ao longo da história e deixando claro que o vidro é um material de extrema importância para a humanidade, após a revolução industrial, houve uma consolidação da moderna indústria do vidro, com novos produtos e tecnologias que originaram novos processos para a sua fabricação, propiciando uma ampla utilização do vidro na sociedade.

4.2 CONTEXTO HISTÓRICO DA EMPRESA ALFA

A empresa Alfa é uma indústria de fabricação de utensílios de vidro para uso doméstico e de embalagens de alimentos, fundada em 30 de agosto de 1912, como uma oficina de conserto de máquinas de escrever. Em 1913 passou a produzir artigos elétricos e de iluminação, mostrando a visão de negócio em uma época que a iluminação a gás era substituída pela elétrica.

Durante a revolução constitucionalista de 1932, que eclodirá contra o regime de Getúlio Vargas, as forças armadas exigiram a empresa a produzir munição para alimentar as tropas. Além de fazer com que a sua empresa produzisse armamento para a guerra civil, o chefe do governo, Pedro de Toledo, solicitou ao fundador da empresa que liderasse um movimento junto às indústrias de São Paulo para contribuir com as forças armadas na produção de armamento. Além de chefiar o movimento saiu com a patente de major do palácio.

O marco na produção de vidro para organização A se deu no ano de 1935, com a produção de vidro manual no bairro de Belém, em São Paulo, produzindo artigos de uso doméstico de iluminação. Em 1946 é construída a fábrica na Vila Maria, São Paulo, com instalações modernas e máquinas totalmente automáticas.

A produção automática de vidro tomou outra forma com a criação de um copo inovador, um ícone que faria a empresa gravar de vez seu nome na história da fabricação de vidro. Com mais de 6 bilhões de unidades produzidas até o ano de 2014, este copo se tornou o carro forte da empresa.

Em meados da década de 50, foi a vez de revolucionar o seguimento de embalagens de alimentos, conta a história que a empresa percebeu a oportunidade de reutilizar artigos onde eram envazados alimentos para uso como copos. Dessa

ideia surgiu o conceito de fabricar copos de vidro para embalagens, inicialmente com geleias e frutas e depois com grande uso em envase de requeijão.

Em 1992 preocupado com a liderança competitiva do mercado, a empresa lança seu programa de Qualidade Total. Em 1998 o processo de fabricação manual de taças é substituído pelo processo automático, assegurando os avanços nos processos de tecnologia em fabricação de vidro.

No ano de 2005, lança a linha de refratários, entrando cada vez mais no mercado doméstico do vidro. Em 2009 a empresa Alfa adquiriu uma planta em Suzano que produzia anualmente naquela época mais de 160.000 toneladas de vidro.

Com a aquisição de outras marcas em 2011, a empresa fortalece sua linha de mesa. Em 2012 inicia-se um novo processo, o vidro opalino.

Atualmente a Organização Alfa, com 100% de suas instalações na planta de Suzano - SP tem um portfólio diversificado, atendendo uma demanda de mais de 120 países.

4.3 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE VIDRO

Atualmente a empresa Alfa contém quatro tipos de processos de fabricação de vidro, prensado, prensado e soprado, soprado e soprado, e centrifugado. Iremos detalhar os processos de acordo com as respectivas máquinas de conformação.

4.3.1 Máquina Prensa

A máquina Prensa é responsável pela conformação do vidro no processo prensado. Este processo ocorre através da prensagem da massa de vidro por dois equipamentos (macho e forma) dando origem a forma final do produto. O tipo de máquina utilizada pela empresa trata-se de uma Prensa circular onde o número de seções (posições) pode variar a critério da empresa, conforme concepção da máquina no momento do desenvolvimento.



Fig. 1.1 Fluxo do processo Máquina Prensa

Os principais produtos fabricados nesta máquina são copos, canecas, pratos e refratários (assadeiras). Existe também uma demanda de produção de produtos para envase de alimentos, denominados produtos de embalagens. Entre os principais clientes estão, Itambé, Sadia, Aviação, Danúbio entre outros.



Fig. 1.2 Exemplos de produtos Maquina Prensa

4.3.2 Máquina H-28 (Hart Ford 28)

A máquina H-28 é responsável pela conformação do vidro no processo prensado/soprado. Entre os diversos processos existentes para a obtenção de produtos de vidro, este é um dos mais semelhantes ao processo de fabricação de vidro manual. A conformação ocorre através da prensagem da massa de vidro por dois equipamentos (macho e Blank), formando o parison que por sua vez da forma ao produto após a etapa de sopro, realizando o enchimento do artigo nas paredes do molde. Neste processo o vidro sai com uma parte excedente, denominada calota, que é cortada na máquina Burn-Off-Machine dando origem a forma final do produto.



Fig. 1.3 Fluxo do processo Máquina H-28

Os principais produtos fabricados nesta máquina são copos e taças. Os produtos fabricados na máquina H-28 são caracterizados por ter um maior valor agregado possuem espessura de parede fina e design arrojado. São produtos usados em bares, restaurantes. A demanda basicamente é com o intuito de atender o consumidor final.



Fig. 1.4 Exemplos de produtos da máquina H-28

4.3.3 Máquina I.S (individual Section)

A máquina I.S é responsável por dois tipos de processos de conformação de vidro, processo prensado/soprado e soprado/soprado, dependendo do tipo de produto que se deseja fabricar.

No processo prensado/soprado, a conformação ocorre através da prensagem da massa de vidro por meio de dois equipamentos (punção e molde), formando o parison, em seguida ocorre a transferência para o lado da forma onde ocorre o sopro final, dando origem ao produto finalizado.

No processo soprado/soprado ocorre a compressão do vidro para formação do gargalo, em seguida o furo do parison e a transferência para forma, onde ocorre o sopro final dando origem ao produto finalizado.

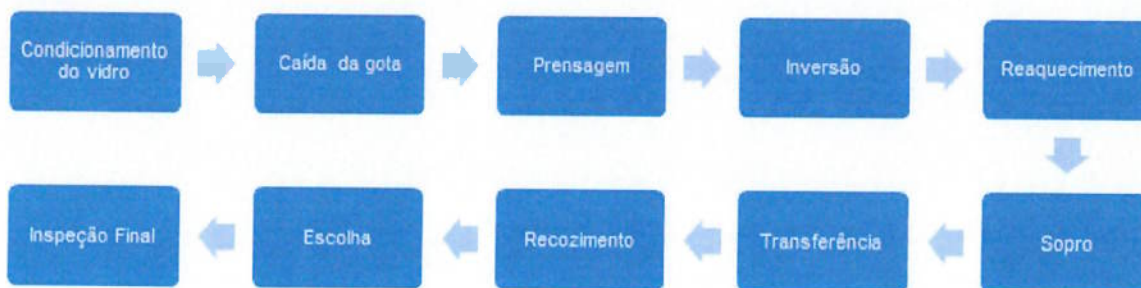


Fig. 1.5 Fluxo do processo Máquina I.S (prensado/soprado)

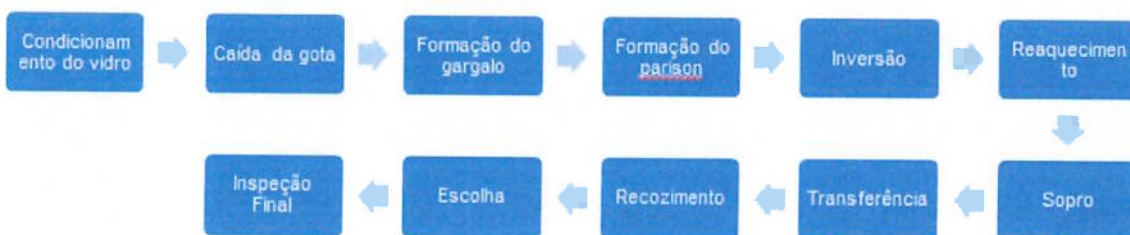


Fig. 1.6 Fluxo do processo Máquina I.S (soprado/soprado)

A maioria dos produtos fabricados na máquina I.S são destinados ao mercado de envase de alimentos. Entre as principais clientes estão, Zaeli, Aviação, Homemade. A máquina I.S produz também produtos destinados ao uso doméstico, ou seja, para utensílios de mesa como jarras e potes.



Fig. 1.7 Exemplos de produtos Máquina I.S

4.3.4 Máquina Spinning

A máquina Spinning é responsável pela conformação do vidro no processo centrífugo. Este processo ocorre através do depósito da massa de vidro em uma forma que após um determinado tempo inicia sua rotação, conformando o produto por meio da força centrípeta. Trata-se de uma máquina rotativa, onde o número de seções pode variar de acordo com a sua concepção.

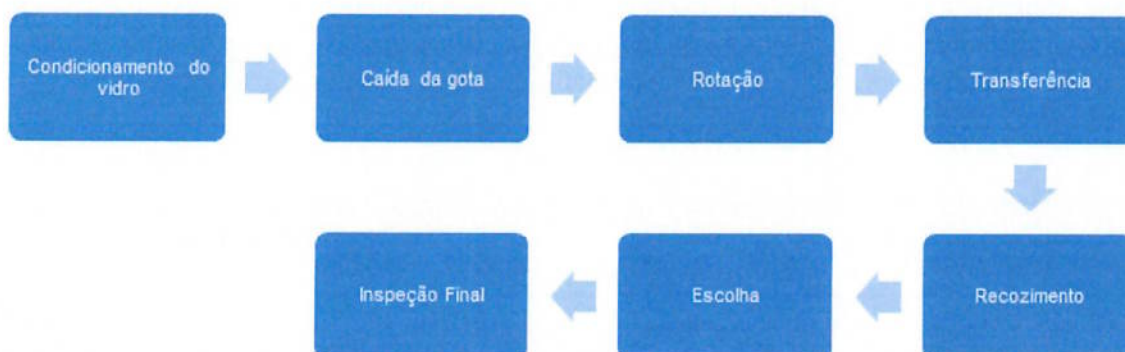


Fig. 1.8 fluxo do processo Máquina Spinning

Os principais produtos fabricados nesta máquina são pratos e tigelas, utilizados em restaurantes e uso de utensílios de mesa. O tipo de vidro proveniente deste forma é diferenciado dos demais que atualmente tem na empresa, sendo denominado vidro opalino, por ser um tipo de vidro branco.



Fig. 1.9 Exemplos de produtos Máquina Spinning

5 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo é destinado ao desenvolvimento do experimento seguindo a metodologia descrita por Montgomery conforme abordado no capítulo 3 deste trabalho.

5.1 RECONHECIMENTO E RELATO DO PROBLEMA

Nesta etapa é definido de forma clara o problema a ser abordado. O objeto de estudo do presente trabalho é conhecer a influência que as variáveis, temperatura do vidro, altura da mola e altura do mancal na variável resposta temperatura do macho. Após compreender o funcionamento do processo, identificar os níveis destas variáveis que geram a melhor condição de trabalho para temperatura do macho, de modo que seja possível reduzir a sua temperatura de trabalho sem influenciar nas demais características do processo.

5.1.1 Descrição do processo em estudo

O presente trabalho será desenvolvido na etapa de conformação do processo de fabricação de vidro denominado prensado e soprado.

Entre os diversos processos existentes de fabricação de vidro, o processo prensado/soprado é um dos mais semelhantes à fabricação de vidro oco manual. Este processo pode ser desenvolvido em diversas máquinas, no caso deste objeto de estudo trataremos a realização na máquina H-28 para a fabricação de copos de vidro.

A máquina em questão é constituída de um tambor rotativo de 18 seções que trabalham individualmente, alimentadas através de dispositivos sincronizados que fornecem o vidro em formato de gota para a máquina. Sua velocidade pode variar de acordo com o tipo de produto a ser fabricado, o ciclo de trabalho da máquina H-28 é mostrado na figura a seguir:



Fig. 2.0 Ciclo de trabalho máquina H-28

- **Caída da gota:** Nesta etapa acontece o fornecimento da massa de vidro (gota) para a máquina H-28. A temperatura do vidro neste momento é de aproximadamente 1100°C , a gota percorre as alimentações após o corte, sendo depositada em um equipamento denominado blank.
- **Prensagem:** após a gota ser depositada no blank, a próxima etapa é a prensagem. Esta etapa ocorre através da prensagem do vidro por um equipamento denominado macho. O macho prensa o vidro contra o blank formando o parison. Nesta etapa o vidro está a uma temperatura de aproximadamente 750°C .
- **Estiramento do parison:** a próxima etapa do ciclo de trabalho da máquina H-28 é o estiramento do parison. Após a prensagem é formado o parison que passa por um estiramento ocorrido devido a força da gravidade sobre o vidro ainda em ponto de amolecimento. A correta realização desta etapa depende de como a prensagem ocorreu, pois através da troca de calor entre os equipamentos (macho e blank), define-se o quanto o vidro vai esticar.
- **Enchimento do parison:** Após o estiramento o vidro está pronto para ganhar o formato do molde. Neste momento ocorre a presença de uma leve pressão de enchimento que faz o vidro moldar as paredes do molde, dando formato ao produto.

- Transferência: a transferência descreve o fim do ciclo de trabalho na máquina H-28. Nesta etapa o produto já formado com calota passa para próxima fase de fabricação.

A etapa de interesse no presente trabalho é a prensagem, segunda etapa do ciclo de trabalho da máquina H-28. A importância desta etapa se deve ao controle das temperaturas dos equipamentos no momento da prensagem, uma vez que este controle garante um correto estiramento do vidro.

A busca em obter temperaturas menores de trabalho, formulando a influência das principais variáveis do processo sobre a temperatura do macho, contribui para alcançarmos este objetivo.

5.2 ESCOLHA DOS FATORES E NÍVEIS

Uma importante etapa para o sucesso do experimento é a correta escolha dos fatores que iremos utilizar na condução do experimento e seus respectivos níveis. Este fato ganha uma maior atenção quando estamos tratando de experimentos indústrias que serão realizados em plantas já em funcionamento. Nesta ocasião deve-se ter em mente que um experimento de sucesso é aquele de que é possível tirar informações importantes do processo gerando um número mínimo de interrupções da produção.

Nesta etapa é necessário que o responsável pela condução do experimento realize um estudo prévio do processo, bem como ouvir a opinião de pessoas envolvidas na atividade para obter um maior grau de conhecimento sobre o estudo.

Montgomery (2015) descreve um processo como sendo um sistema que transforma entradas em saídas. As entradas podem sofrer alterações devido a variáveis (controladas ou ruídos) afetando as saídas desejadas. A figura 2.1 mostra um esquema de um processo.

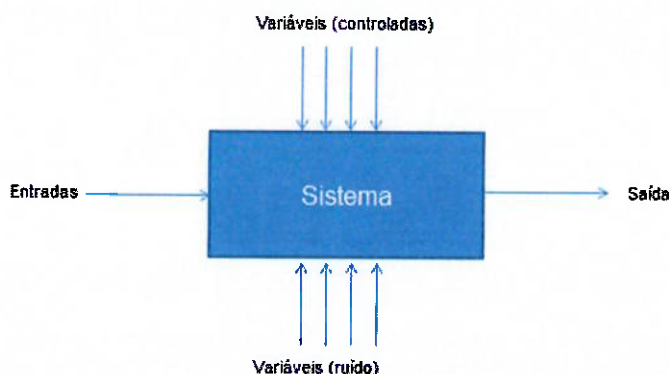


Fig. 2.1 Modelo de Processo

Fonte: Adaptado de Montgomery (2015)

5.2.1 Escolha dos fatores

Para a escolha dos fatores foram considerados dois aspectos importantes, o conhecimento adquirido ao longo do tempo sobre o processo e a formulação de hipótese de que alguns fatores poderiam influenciar a variável resposta com menor intensidade, entretanto com a capacidade de contribuir para alcançar o objetivo.

Os fatores escolhidos foram descritos como é mostrado a seguir:

- **Temperatura do vidro:** O vidro passa por um processo de fusão que consiste em aquecer as matérias primas constituintes do vidro a uma temperatura de aproximadamente 1600°C. Nesta temperatura o vidro se torna fluido escoando pelos canais até chegar na região de corte da gota. Durante este percurso é realizado um controle minucioso da temperatura do vidro, ocorrendo um resfriamento controlado até obter a temperatura desejada. A variável temperatura de vidro de interesse nesse trabalho será medida na região denominada Spout, onde ocorre o corte da gota. Detectar a influência da temperatura do vidro sobre a temperatura de trabalho do macho. Este fator já era de conhecimento dos responsáveis pelo processo na empresa e a sua escolha se deve a importância de conhecer o quanto de influência este fator opera na variável resposta.
- **Altura da mola:** A altura da mola é responsável pela força do cilindro no momento da prensagem do vidro. A escolha deste fator é devida ao pouco conhecimento da influência deste sobre a temperatura do macho.

- **Altura do mancal:** A altura do mancal é responsável pela penetração do macho no momento da prensagem. A escolha deste fator é devida ao pouco conhecimento da influência deste sobre a temperatura do macho

5.2.2 Escolha dos níveis

Na escolha dos níveis dos fatores foi utilizado o critério de que os níveis selecionados para o experimento não deveriam afetar a capacidade de produção, ou seja, causar interrupções no funcionamento da máquina.

Pela experiência dos responsáveis do processo foi possível detectar quais os níveis que deveriam ser adotados no trabalho. A tabela 1.1 mostra os níveis escolhidos para o experimento inicial:

Tabela 1.1 – Escolha dos níveis

Fatores	Min	Máx
Temperatura do vidro [°C]	1155	1157
Altura da mola [mm]	90	110
Altura do mancal [mm]	80	90

5.3 ESCOLHA DA VARIÁVEL RESPOSTA

No processo de conformação de vidro podemos listar diversas variáveis resposta do sistema. A escolha da temperatura do macho como variável resposta se deve à importância que a mesma exerce sobre a formação do parison.

A formação do parison ocorre na etapa descrita neste trabalho anteriormente e trata-se do estiramento do vidro através da força gravitacional, até atingir um comprimento adequado para que através do sopro de enchimento seja moldado no formato do molde.

O controle da temperatura do macho garante estabilidade no estiramento do parison, contribuindo para atingir um comprimento desejável.

5.4 ESCOLHA DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Nesta etapa foram discutidos os diversos tipos de experimentos e sua adequação ao uso no processo estudado. A realização de experimentos industriais não é uma tarefa fácil de ser realizada, ainda se tratando de conduzir experimentos no curso da produção.

A opção escolhida foi a realização de um experimento fatorial, com três fatores, sendo considerados dois níveis de cada fator. Este planejamento é descrito por Montgomery (2015) como um experimento fatorial 2^3 e tem oito rodadas ou combinações de tratamentos. O experimento 2^3 é visualizado geometricamente através de um cubo, onde os vértices deste cubo formam as rodadas a serem executadas no experimento. A figura 2.2 mostra um exemplo geométrico do experimento 2^3 .

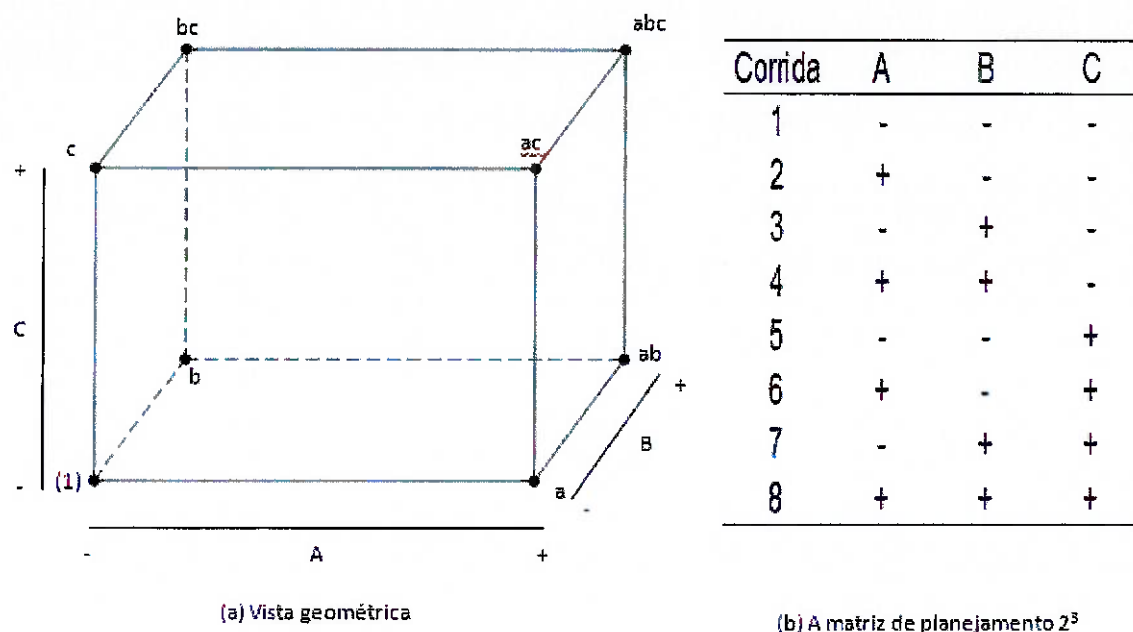


Fig. 2.2 Planejamento 2^3

Fonte: Adaptado de Montgomery (2015)

Para o experimento proposto foi utilizado o conceito de replica Segundo Montgomery (1991), este conceito permite encontrar uma estimativa do erro experimental,

utilizado para determinar se há diferenças estaticamente significativas entre os dados. Foram utilizadas réplicas de $n=2$ para realização do experimento.

A matriz do experimento completa é apresentada na tabela 1.3. O experimento será composto de 16 corridas, conforme é mostrado a seguir:

Tabela 1.2 – Matriz do experimento

Corrida	Altura da mola	Altura do mancal	Temp. vidro
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+
9	-	-	-
10	+	-	-
11	-	+	-
12	+	+	-
13	-	-	+
14	+	-	+
15	-	+	+
16	+	+	+

5.5 REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

A condução de experimentos industriais deve ser feita de forma cautelosa. Subestimar os aspectos de um ambiente industrial certamente pode levar o experimento ao fracasso, para tanto é necessário que no decorrer do experimento o processo seja monitorado rigorosamente a fim de que perturbações no processo não venham a destruir a validade do experimento.

Para o caso em análise levamos em considerações alguns aspectos que julgamos importantes ao decorrer da condução deste projeto, tais como, realização das rodadas consecutivas do experimento, utilização do mesmo operador na condução do experimento, evitar realizar o experimento em horários de mudança da

temperatura ambiente, evitar a troca de equipamentos durante o experimento, evitar ajustes nas regulagens de outros parâmetros durante o experimento, verificar se a unidade experimental, neste caso a seção, está produzindo peças dentro dos requisitos de qualidade. Estas observações foram consideradas de grande valia para análise posterior dos resultados e repetição do experimento.

Ficou estabelecido que a realização do experimento deveria ser executada em duas seções, ou seja, primeiramente seria realizado em uma seção o experimento completo e posteriormente seria realizado em outra seção para confirmação da validade dos resultados, uma vez que estamos tratando de uma máquina de 18 seções que trabalham individualmente.

5.5.1 Primeiro experimento.

A realização do experimento foi conduzido na seção de número 1 (S#1) da máquina H-28 de 18 seções. Foram levantados os parâmetros de ajustes para a possibilidade de realização sob as mesmas condições do segundo experimento.

O primeiro experimento foi realizado e teve duração aproximada de 1,5 horas. No decorrer do experimento foi necessário checar a conformidade das peças produzidas a fim de garantir a validade do experimento para condições normais de produção. Não foram observadas ocorrências significativas que possam vir a interferir no funcionamento do processo, mostrando que os níveis escolhidos estão de acordo com os requisitos acordados inicialmente.

Os resultados obtidos foram devidamente tabulados, conforme é mostrado na tabela 1.3, levando em consideração que as amplitudes escolhidas para os níveis foram consideradas com base na experiência dos responsáveis pelo processo é importante verificar se geraram dados satisfatórios para a análise do experimento. A análise dos dados será abordada no item 5.6.

Tabela 1.3 Resultado do Primeiro Experimento

Corrida	Altura da mola	Altura do mancal	Temp. vidro	Temp. Macho
1	-	-	-	172
2	+	-	-	175
3	-	+	-	173
4	+	+	-	174
5	-	-	+	184
6	+	-	+	191
7	-	+	+	182
8	+	+	+	185
9	-	-	-	173
10	+	-	-	174
11	-	+	-	171
12	+	+	-	175
13	-	-	+	186
14	+	-	+	189
15	-	+	+	180
16	+	+	+	183

Obs.: Temperatura [°C]

5.5.2 Segundo experimento.

Com o objetivo de validar os resultados obtidos no primeiro experimento, uma vez que estamos trabalhando com uma máquina de 18 seções foi acordado realizar um novo experimento a fim de verificar se os resultados obtidos são válidos para todo o processo.

O segundo experimento foi conduzido na seção de número 10 (S#10) da máquina H-28 de 18 seções. A tabela 1.4 mostra os resultados do segundo experimento.

Tabela 1.4 Resultado do Segundo Experimento

Corrida	Altura da mola	Altura do mancal	Temp. vidro	Temp. Macho
1	-	-	-	174
2	+	-	-	178
3	-	+	-	173
4	+	+	-	177
5	-	-	+	187
6	+	-	+	191
7	-	+	+	185
8	+	+	+	188
9	-	-	-	175
10	+	-	-	177
11	-	+	-	172
12	+	+	-	178
13	-	-	+	187
14	+	-	+	190
15	-	+	+	183
16	+	+	+	186

Obs.: Temperatura [°C]

5.6 ANÁLISE DOS DADOS

Nesta etapa foi realizada a análise dos resultados obtidos através da realização do experimento. Os cálculos foram feitos com o auxílio da planilha eletrônica Excel, da Microsoft e os gráficos foram elaborados com o auxílio do Software Minitab, versão 17.

5.6.1 Análise dos dados do Primeiro Experimento

Primeiro foram calculados os efeitos que de acordo com Montgomery (2015) para um experimento fatorial 2^3 podem ser estimados de acordo com as fórmulas (6) a (11).

- Efeito principal do fator A (Altura da mola);

$$A = 1/4n [a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc] \quad (5)$$

- Efeito Principal do fator B (Altura do mancal);

$$B = 1/4n [b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac] \quad (6)$$

- Efeito Principal do fator C (Temperatura do Vidro);

$$C = 1/4n [c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab] \quad (7)$$

- Efeito da interação de segunda ordem: AB (Altura da mola e Altura do mancal);

$$AB = 1/4n [abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)] \quad (8)$$

- Efeito da interação de segunda ordem: AC: (Altura da mola e temperatura do Vidro);

$$AC = 1/4n [(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc] \quad (9)$$

- Efeito da interação de segunda ordem: BC (altura do mancal e temperatura do vidro);

$$BC = 1/4n [(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc] \quad (10)$$

- Efeito da interação de terceira ordem: ABC (altura da mola, altura do mancal e temperatura do vidro);

$$ABC = 1/4n [abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)] \quad (11)$$

Os cálculos realizados são mostrados na tabela 1.5.

Tabela 1.5 Matriz para Cálculo dos Efeitos do Primeiro Experimento

Combinações dos tratamentos	Fatores do Planejamento			Resposta				Totais
	A	B	C	1	2			
(I)	-1	-1	-1	172	173			345
a	1	-1	-1	175	174			349
b	-1	1	-1	173	171			344
ab	1	1	-1	174	175			349
c	-1	-1	1	184	186			370
ac	1	-1	1	191	189			380
bc	-1	1	1	182	180			362
abc	1	1	1	185	183			368
			Média	179,1875			soma	2867

Obs.: Temperatura [°C]

Os resultados obtidos para os efeitos são mostrados na tabela 1.6.

Tabela 1.6 Cálculo dos Efeitos do Primeiro Experimento

Fatores	Efeito
A=	3,125
B=	-2,625
C=	11,625
AB=	0,375
AC=	0,875
BC=	-2,375
ABC=	-0,625

O gráfico dos efeitos foi gerado com o auxílio do Minitab, conforme é mostrado na figura 2.3.

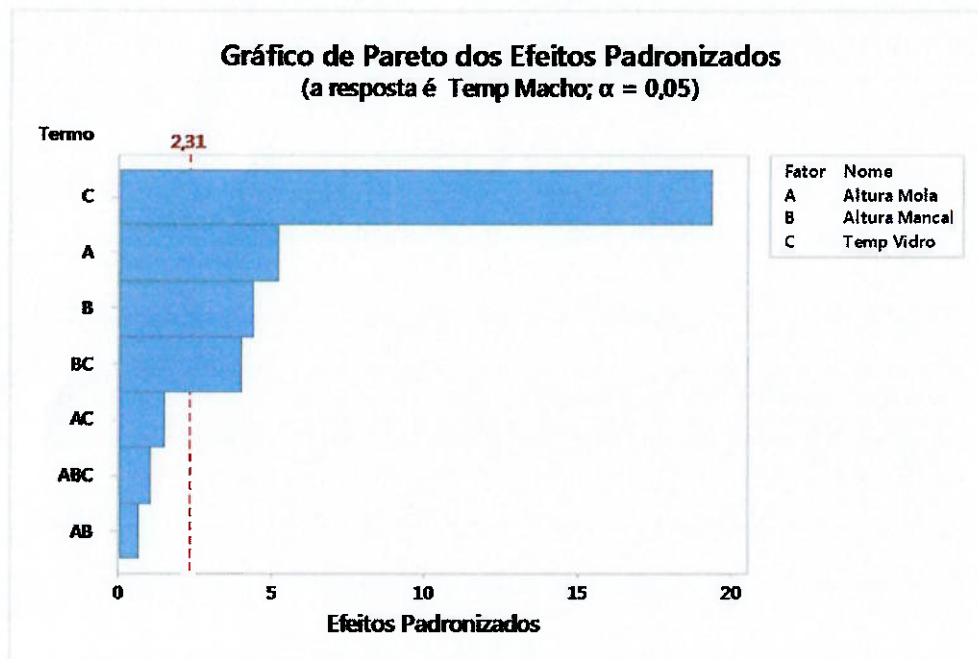


Fig. 2.3 Gráfico dos Efeitos para o primeiro Experimento

A figura 2.4 mostra o gráfico da probabilidade normal dos efeitos para o primeiro experimento.

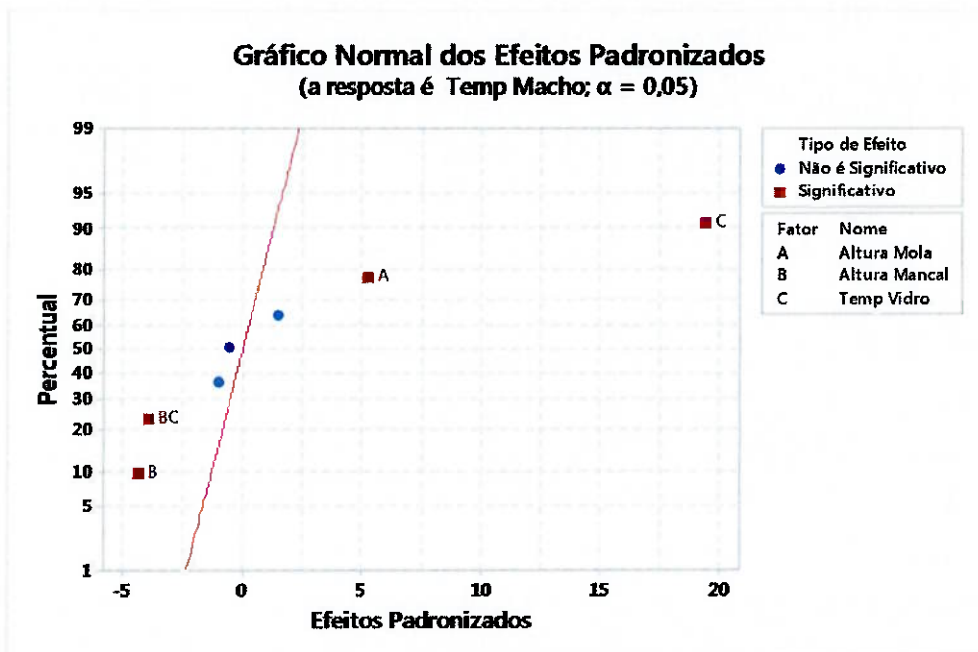


Fig. 2.4 Gráfico de probabilidade normal dos Efeitos do primeiro Experimento

É possível identificar pela análise dos dados que o fator com maior influência na temperatura do macho foi a temperatura do vidro, seguido respectivamente pela altura da mola e altura do mancal.

Para obtermos uma análise estatística dos dados utilizamos a ferramenta ANOVA, análise de variância, neste caso a ANOVA nos ajuda a determinar se existe diferença significativa no valor da variável resposta de acordo com cada fator e as interações entre eles. A tabela 1.7 mostra o resultado da ANOVA calculado com o auxílio do Excel.

Tabela 1.7 ANOVA Primeiro Experimento

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média Quadrática	F _{calc}	F _{crit}	P-Valor
A	39,0625	1	39,0625	27,1739	5,31766	0,001
B	27,5625	1	27,5625	19,1739	5,31766	0,002
C	540,5625	1	540,5625	376,0435	5,31766	0,000
AB	0,5625	1	0,5625	0,3913	5,31766	0,549
AC	3,0625	1	3,0625	2,1304	5,31766	0,183
BC	22,5625	1	22,5625	15,6957	5,31766	0,004
ABC	1,5625	1	1,5625	1,0870	5,31766	0,328
Erro	11,500	8	1,4375			
Total	646,438	15				

De acordo com a tabela ANOVA para o primeiro experimento, identificamos que os fatores A (altura da mola), B (Altura do mancal), C (temperatura do vidro) a interação de segunda ordem BC (Altura do mancal e Temperatura do vidro) têm influência significativa na temperatura do macho.

5.6.2 Análise dos dados do Segundo Experimento

A análise dos dados para o segundo Experimento foi realizada similarmente ao primeiro Experimento. Os cálculos dos efeitos foram realizados através das equações (5), (6), (7), (8), (9), (10) e (11) de acordo com a tabela 1.8, conforme é mostrado a seguir.

Tabela 1.8 Matriz para Cálculo dos Efeitos do Segundo Experimento

Combinações dos tratamentos	Fatores do Planejamento			Resposta			
	A	B	C	1	2		Totais
(1)	-1	-1	-1	174	175		349
a	1	-1	-1	178	177		355
b	-1	1	-1	173	172		345
ab	1	1	-1	177	178		355
c	-1	-1	1	187	187		374
ac	1	-1	1	191	190		381
bc	-1	1	1	185	183		368
abc	1	1	1	188	186		374
			Média	181,3125		soma	2901

Obs.: Temperatura [°C]

Os resultados obtidos para os efeitos são mostrados na tabela 1.9.

Tabela 1.9 Cálculo dos Efeitos do Segundo Experimento

Fatores	Efeito
A=	3,625
B=	-2,125
C=	11,625
AB=	0,375
AC=	-0,375
BC=	-1,125
ABC=	-0,625

O gráfico dos efeitos foi gerado com o auxílio do Minitab, conforme é mostrado na figura 2.5.

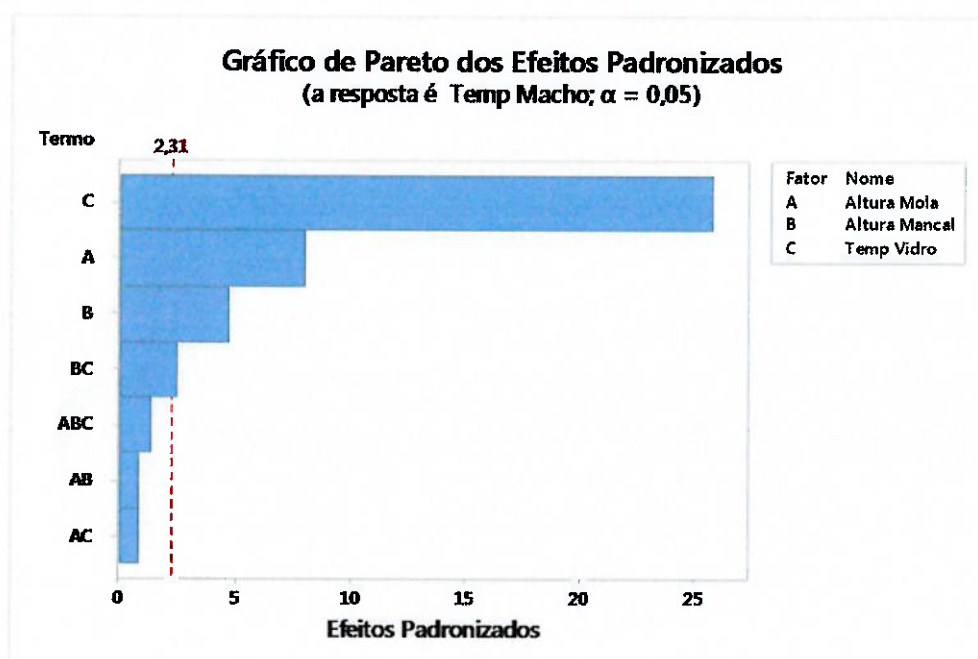


Figura 2.5 Gráfico dos Efeitos para o segundo Experimento

A figura 2.6 mostra o gráfico da probabilidade normal dos efeitos para o segundo experimento.

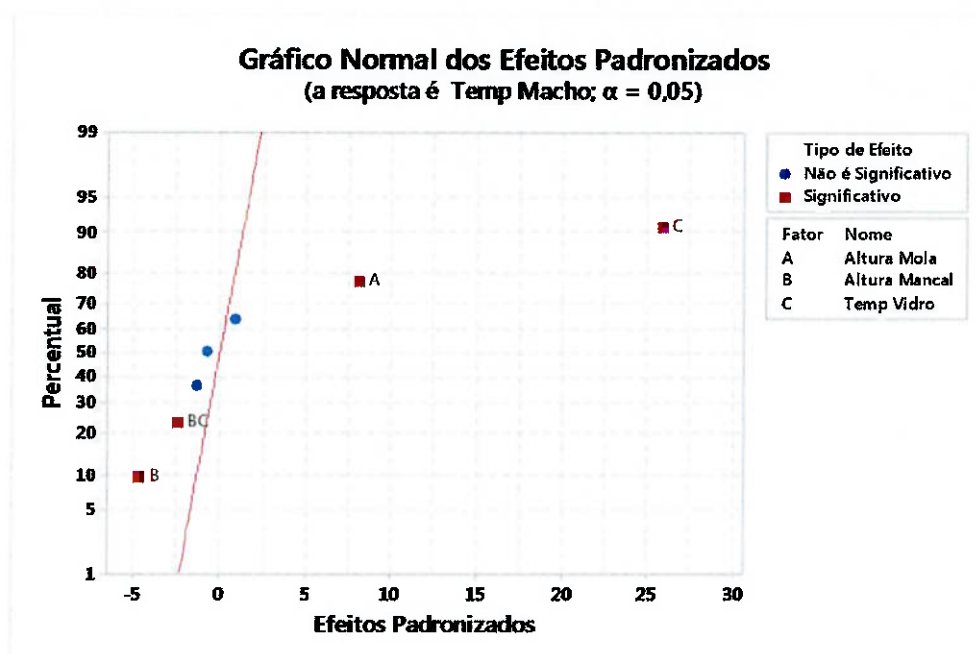


Fig. 2.6 Gráfico de probabilidade normal dos Efeitos do segundo Experimento

É possível notar concordância nos resultados obtidos no segundo experimento com relação ao primeiro, uma vez que este foi realizado para verificar se o modelo obtido

no primeiro Experimento, realizado na Seção 1 (S#1) da máquina H-28, poderia ser aplicado às demais seções da máquina.

A análise dos dados identifica que o fator com maior influência na temperatura do macho foi a temperatura do vidro, seguido respectivamente pela altura da mola e altura do mancal. Similarmente foram realizados os cálculos da ANOVA para o segundo experimento, conforme é mostrado a seguir:

Tabela 2.0 ANOVA Segundo Experimento

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média Quadrática	F _{calc}	F _{crit}	P-Valor
A	52,5625	1	52,5625	64,6923	5,31766	0,000
B	18,0625	1	18,0625	22,2308	5,31766	0,002
C	540,5625	1	540,5625	665,3077	5,31766	0,000
AB	0,5625	1	0,5625	0,6923	5,31766	0,430
AC	0,5625	1	0,5625	0,6923	5,31766	0,430
BC	5,0625	1	5,0625	6,2308	5,31766	0,037
ABC	1,5625	1	1,5625	1,9231	5,31766	0,203
Erro	6,500	8	0,8125			
Total	625,438	15				

De acordo com a tabela ANOVA para o segundo experimento, identificamos que os fatores A (altura da mola), B (Altura do mancal), C (temperatura do vidro) a interação de segunda ordem BC (Altura do mancal e Temperatura do vidro) têm influência significativa na temperatura do macho.

Este resultado indica que o experimento proposto representa de fato o processo em estudo e pode com segurança ser aplicado às demais seções da máquina H-28 de 18 seções.

5.6.3 Análise do Modelo

O próximo passo proposto é a análise do modelo para determinar qual a melhor configuração dos fatores que geram uma menor temperatura de trabalho. Para esta etapa utilizaremos o conceito da análise de regressão. Segundo Montgomery (2015) a coleção de ferramentas estatísticas que são usadas para modelar e explorar relações entre variáveis que estão relacionadas de maneira não determinística é

chamado de análise de regressão. Para realização dos cálculos de modelo e análise residual utilizaremos o primeiro experimento realizado.

De acordo com a tabela 1.7, da análise de variância do primeiro experimento, podemos afirmar que os fatores A (altura da mola), B (altura do mancal), C (temperatura do vidro) e a interação BC (altura do mancal e temperatura do vidro) são estatisticamente significantes, ou seja, influenciam na variável resposta (temperatura do macho). Os gráficos 2.7 e 2.8 a seguir foram desenvolvidos com o auxílio do Minitab e mostram a relação dos efeitos principais e interações do experimento.

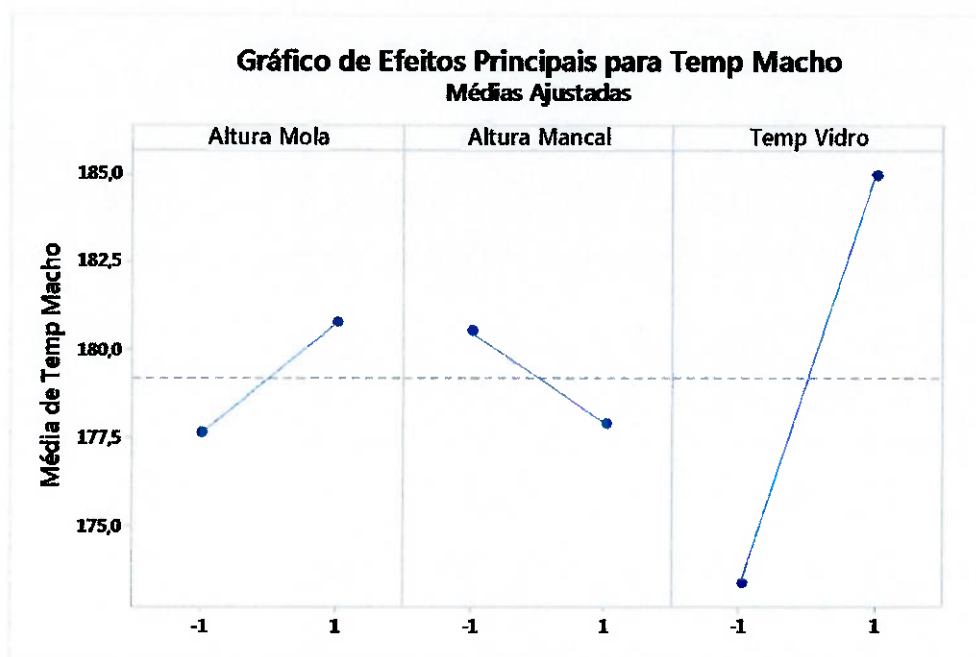


Fig. 2.7 Gráfico dos Efeitos Principais

O gráfico da figura 2.7 sugere que para valores mais altos de altura da mola e temperatura do vidro, teremos maiores valores da temperatura do macho enquanto que para a altura do mancal para valores mais altos teremos temperaturas do macho mais baixa.

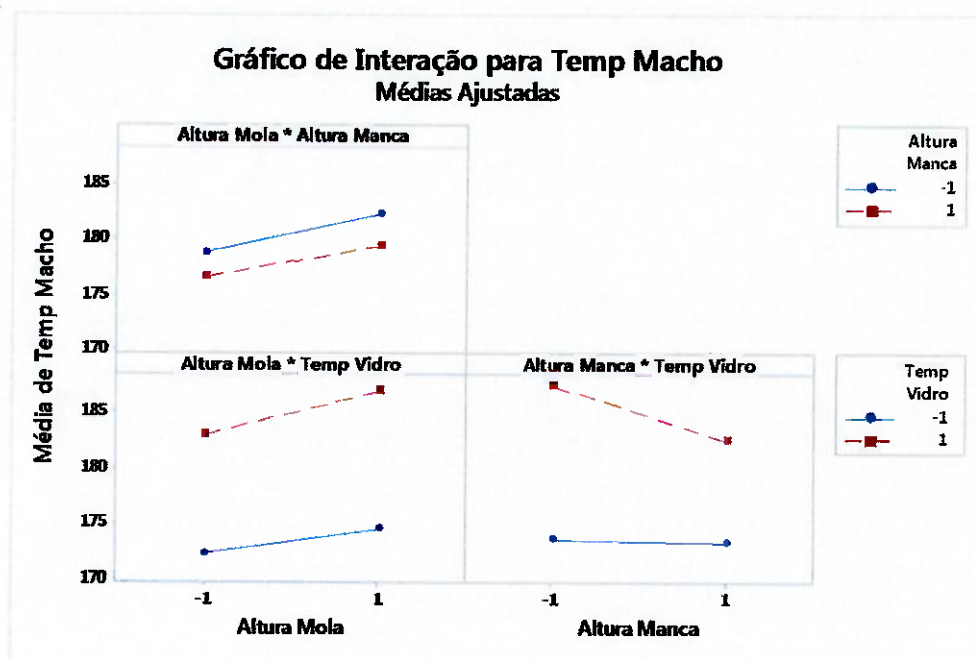


Fig. 2.8 Gráfico das Interações

A tabela 2.1 mostra os valores médios da resposta temperatura do macho para cada rodada do experimento.

Tabela 2.1 Valores médio para Temperatura do macho

Combinações dos tratamentos	Fatores do Planejamento			Resposta		
	A	B	C	1	2	Média
(1)	-1	-1	-1	172,0	173,0	172,5
a	1	-1	-1	175,0	174,0	174,5
b	-1	1	-1	173,0	171,0	172,0
ab	1	1	-1	174,0	175,0	174,5
c	-1	-1	1	184,0	186,0	185,0
ac	1	-1	1	191,0	189,0	190,0
bc	-1	1	1	182,0	180,0	181,0
abc	1	1	1	185,0	183,0	184,0

Obs.: Temperatura [°C]

Através da tabela é possível construir a representação geométrica do experimento 2^3 , que se trata de um cubo conforme é mostrado na figura 2.9.

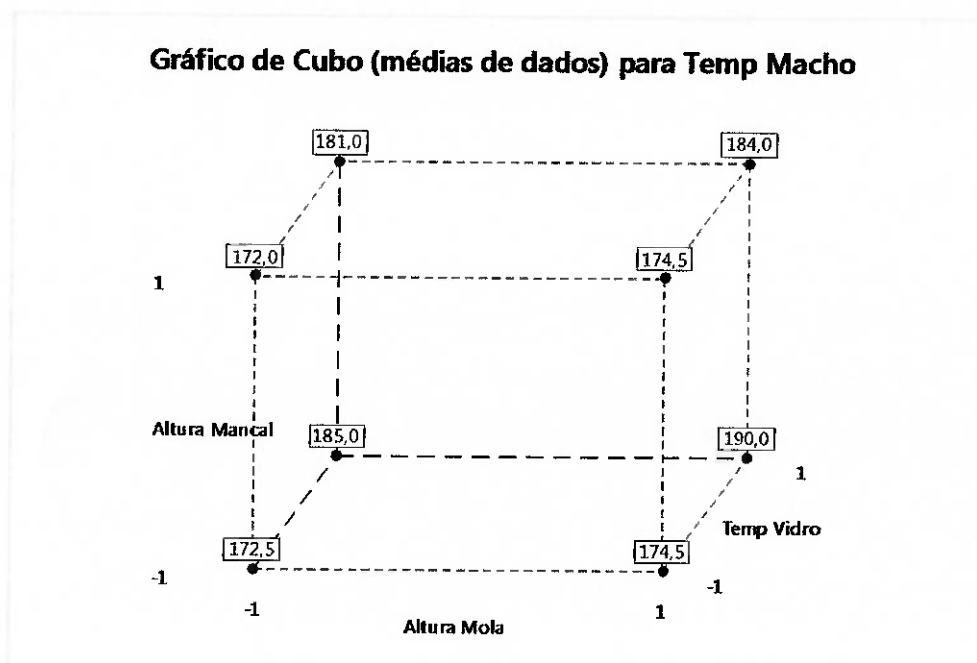


Fig. 2.9 Gráfico de Cubo

A equação do modelo linear de regressão pode ser verificada a seguir:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{23} x_{23} \quad (12)$$

Onde $x_1, x_2, x_3, x_{12}, x_{23}$ é a representação da variável codificada sendo:

β_0 = é a média dos valores de resposta do experimento;

β_1 = é o efeito de A (altura da mola) dividido por dois;

β_2 = é o efeito de B (altura da mancal) dividido por dois;

β_3 = é o efeito de C (temperatura do vidro) dividido por dois;

β_{23} = é o efeito de BC (altura do mancal e temperatura do vidro) dividido por dois;

x_1 = A (altura da mola)

x_2 = B (altura do mancal)

x_3 = C (temperatura do vidro)

x_{23} = BC (altura do mancal e temperatura do vidro);

Desta a equação do modelo linear de regressão para o primeiro experimento é dado por:

$$y = 179,19 + 1,56x_1 - 1,31x_2 + 5,81x_3 - 1,19x_{23} \quad (13)$$

Os efeitos estimados para o cálculo dos coeficientes da equação (13) podem ser calculados de acordo com as equações (5) a (11).

Os valores previstos para as oito corridas do experimento são apresentados na tabela 2.2.

Tabela 2.2 Valores previstos para a equação de regressão

	Fatores do Planejamento			Resposta da Equação	Coeficientes da equação	
	A	B	C			
(I)	-1	-1	-1	171,94	β_0	179,19
a	1	-1	-1	175,06	β_1	1,56
b	-1	1	-1	171,69	β_2	-1,31
ab	1	1	-1	174,81	β_3	5,81
c	-1	-1	1	185,94		
ac	1	-1	1	189,06	β_{23}	-1,19
bc	-1	1	1	180,94		
abc	1	1	1	184,06		

A= Altura da mola; B= Altura do mancal; C= Temp. Vidro

Obs.: Temperatura [°C]

5.6.4 Experimento de confirmação

Após a análise dos dados descritos nos itens anteriores foi decidido realizar um novo experimento a fim de validar a equação do modelo proposto.

Este experimento foi planejado de forma a selecionar algumas rodadas da tabela 2.2 e verificar se os valores com os ajustes propostos de fato aconteciam no processo.

Foram considerados os mesmos parâmetros de regulação da máquina H-28 de 18 seções para tal experimento. A escolha das combinações dos fatores a serem testados está descritos na tabela 2.3.

Tabela 2.3 Combinações para teste de validação

Rodada	Fatores do Planejamento			Resposta da Equação
	A	B	C	
1	-1	1	-1	171,69
2	-1	1	1	180,94
3	1	-1	1	189,06

Obs.: Temperatura [°C]

Os dados da tabela 2.3 foram cálculos com base na equação 13. É possível calcular um intervalo de confiança para a resposta média. Segundo Montgomery (2015), podemos obter este intervalo de confiança em um determinado ponto através da equação 14.

$$\hat{\mu}_{y|x_0} - t_{\alpha/2, n-2} \sqrt{\hat{\sigma}^2 \left[\frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{S_{xx}} \right]} \leq \mu_{y|x_0} \leq \hat{\mu}_{y|x_0} + t_{\alpha/2, n-2} \sqrt{\hat{\sigma}^2 \left[\frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{S_{xx}} \right]} \quad (14)$$

Onde:

$\mu_{y|x_0}$: É dado pelo modelo ajustado da equação linear ($\beta_0 + \beta_1 X_0$)

$\hat{\mu}_{y|x_0}$: É a estimativa pontual de Y em $x = x_0$ (μ_{y/x_0})

$t_{\alpha/2, n-2} \sqrt{\hat{\sigma}^2 \left[\frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{S_{xx}} \right]}$: Variância da previsão de um valor médio de Y, com distribuição t e n-2 graus de liberdade

Utilizando um $\alpha=95\%$ para o intervalo de confiança para a resposta média temperatura do macho, obtemos os seguintes valores para os pontos A= (-1), B= (1) e C= (-1).

$$170,04 \leq \mu_{y|x_0} \leq 173,95 \quad (15)$$

Para os valores dos parâmetros nos pontos A= (-1), B= (1) e C= (1), temos:

$$179,04 \leq \mu_{y|x_0} \leq 182,95 \quad (16)$$

Para os valores dos parâmetros nos pontos A= (1), B= (-1) e C= (1), temos:

$$188,04 \leq \mu_{y|x_0} \leq 191,95 \quad (17)$$

As rodadas propostas na tabela 2.3 foram realizadas e os valores obtidos estão descritos na tabela 2.4

Tabela 2.4 Resultado do Experimento de Validação

Rodada	Fatores do Planejamento			Temperatura do macho			
	A	B	C	1	2	Média	Erro
1	-1	1	-1	173,00	172,00	172,50	0,81
2	-1	1	1	183,00	181,00	182,00	1,06
3	1	-1	1	192,00	189,00	190,50	1,44

Obs.: Temperatura [°C]

Os resultados obtidos são coerentes com as respostas previstas pelo modelo de regressão.

Comparando a primeira rodada, com os fatores regulados nos seguintes níveis: A= (-1), B= (1) e C= (-1), obtemos uma temperatura do macho média de 172,5°C, comparando com o resultado da equação 15 para o intervalo de confiança notamos que o valor da variável resposta médio está dentro do intervalo.

Similarmente, para a segunda rodada do experimento de confirmação temos uma temperatura do macho média de 182°C que é considerado satisfatório para o intervalo de confiança calculado.

Para a terceira rodada a temperatura do macho média observada foi de 190,5°C, dentro do intervalo especificado.

Os resultados deste experimento indicam que a equação de regressão pode ser utilizada para prever os resultados para a temperatura de trabalho do macho.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O ultimo passo descrito por Montgomery (2005) é, após o término das análises o responsável pelo experimento deve tirar conclusões e recomendações acerca do experimento. Nesta etapa deve ser analisado se os resultados foram de fato alcançados com a realização do experimento, conseqüentemente a elaboração de uma proposta para a melhoria do processo estudado.

O objetivo principal deste trabalho foi estudar e aplicar as técnicas de planejamento de experimentos em um ambiente industrial, com foco na melhoria do processo de conformação de vidro para utensilio doméstico, a fim de reduzir a temperatura de trabalho do macho.

Os objetivos propostos anteriormente podem ser discutidos segundo dois aspectos: a contribuição do experimento para o processo de conformação de vidro no que se refere à possibilidade de criar uma metodologia para atingir temperaturas de trabalho do macho menores e à contribuição que o experimento proporcionou à empresa através da aplicação das técnicas de Delineamento de Experimentos.

No que diz respeito ao primeiro aspecto, com o estudo do processo de conformação de vidro, na etapa de prensagem, foi possível determinar que as variáveis, temperatura do vidro, altura de mola (força de prensagem), altura do mancal (penetração do macho), bem como a interação entre as variáveis, temperatura do vidro e altura do mancal exercem influência na variável de interesse temperatura do macho.

A abordagem da ferramenta de análise de regressão propôs a elaboração de uma metodologia para a aplicação de uma relação matemática entre as variáveis, podendo quantificar o valor da influência de cada fator relevante no experimento. Este fato proporcionou uma previsão da resposta do processo para um determinado nível de ajuste. Desse modo foi possível configurar a ajustagem dos parâmetros nos níveis que gerassem a menor temperatura de trabalho do macho, sem que a qualidade do produto final fosse comprometida.

A melhor configuração para alcançar tal objetivo foi a regulagem dos fatores altura da mola no nível (-1), altura do mancal no nível (1) e temperatura do vidro no nível (-1), a configuração obteve uma resposta para a temperatura de trabalho do macho de 171,69°C. É possível identificar que o conhecimento adquirido no experimento é benéfico ao processo, pois nota-se que dependendo da regulagem dos fatores, por

exemplo, altura de mola no nível (1), altura do mancal no nível (-1) e temperatura do vidro (1), obteve uma resposta para temperatura do macho de 189,06°C, 17,37°C superior.

O presente estudo contribuiu também para a estabilização das temperaturas entre as seções, uma vez que a unidade experimental estudada trata-se de uma máquina H-28 de 18 seções, foi possível através do conhecimento da influência dos fatores, configurar melhores níveis de trabalho para as diferentes seções, reduzindo a variação de temperatura entre as mesmas.

No que diz respeito ao segundo aspecto é possível notar que a aplicação de experimentos industriais é muitas vezes negligenciada devido à dificuldade de aplicação desse tipo de estudo na indústria. No presente trabalho foi possível constatar que as principais dificuldades encontradas foram na seleção dos fatores importantes para o experimento, escolha dos níveis destes fatores e execução do experimento sem que a mesma afete significativamente a capacidade de projeto da planta industrial.

É importante que o responsável pela condução do experimento tenha em mãos informações do processo que levem a análises preliminares de seu comportamento, caso isto não seja possível é fundamental o levantamento de dados para realizar a análise. No caso em estudo estas informações foram obtidas através de reuniões com as pessoas envolvidas no processo, possibilitando a discussão do objetivo do estudo e informações inerentes ao experimento.

Durante a fase de revisão bibliográfica não foram encontradas publicações de trabalho relativas ao presente tema abordado, dificultando o estudo da concepção do processo. A saída utilizada para suprir esta dificuldade foi utilizar o conhecimento da equipe envolvida para obtenção de um modelo do processo.

A análise estatística também apresentou barreiras quanto ao seu uso. As técnicas de análise de variância e análise de regressão são ainda pouco usadas no dia a dia da indústria. Este fato foi contornado através de treinamentos com as pessoas envolvidas e uso de um programa estatístico para análise dos resultados.

Foi possível mostrar que as técnicas de Delineamento de Experimentos são eficazes para a solução de problemas quando desejamos identificar a influência dos fatores de controle sob uma determinada variável. A possibilidade de identificar a interação entre as variáveis estudadas foi considerada por parte da equipe da empresa envolvida no estudo, como um fator de grande ajuda no entendimento do processo,

pois muitas vezes utiliza-se a técnica de analisar um fator por vez sem considerar a interação entre eles.

Por fim o estudo do processo de conformação de vidro através das técnicas de Delineamento de Experimento teve um resultado satisfatório, apresentando possibilidade de ganho na redução da temperatura de trabalho do macho no processo de conformação de vidro prensado e soprado da máquina H-28.

REFERÊNCIAS

- ALBERTO, M.A.M. **Planeamento de Experiências e Controlo de Qualidade na Indústria**. 2013. 172 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Aberta, Lisboa, 2013.
- CALEGARE, A.J.A. **Introdução ao Delineamento de Experimentos**. 1th ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2001. 130 p.
- CAMPOS, V.F. **Gerenciamento da rotina do trabalho do dia a dia**. 9th ed. Nova Lima: FALCONI, 2013. 266 p.
- CRESPO, A. A. **Estatística fácil**. 18th ed. São Paulo: Saraiva, 2002. 224 p.
- FERRAZ, J.C; KUPFER, D.; HAGUENAUER, L. **Made in Brazil: Desafios competitivos para a indústria**. 1th ed. Rio de Janeiro: Campus, 1996. 386 p.
- GIL, A.C. **Como Elaborar projetos de pesquisas**. 4th ed. São Paulo: Atlas, 2002. 175 p.
- HOPPEN, N.; LAPOINTE, L.; MOREAU, E. uma guia para a avaliação de artigos de pesquisa em sistemas de informação. **Revista eletrônica de Administração – REAd**. Porto Alegre, v.2. n.3, p. 1-27. nov. 1996
- KIM, S.; JANG, K. Designing performance analysis and IDEF0 for enterprise modelling in BPR. **International Journal of Produciton Economics**, v. 76, n. 1 p. 121-133, 2002.
- MAIA, S.B. **O vidro e sua fabricação**. 1th ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 211 p.
- MONTALVÃO, W. **Otimização Experimental com Operação Evolutiva**. 1978. 137 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de matemática, Estatística e Ciência da Computação da Universidade de Campinas, Campinas, 1978.
- MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of Experiments**. 6th ed. Arizona: John Wiley & Sons, INC, 2005. 643 p.
- MONTGOMERY, D.C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 5th ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- MONTGOMERY, D.C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4th ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 513 p.
- REY, L. **Planejar e redigir trabalhos científicos**. 2th ed. São Paulo: Edgard Blucher. 1993. 328 p.
- ROTONDARO, R.G. et al. **Seis Sigma: estratégia gerencial para a melhoria de processos, produtos e serviços**. 1th ed. São Paulo: Atlas. 2014. 375 p.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 3th ed. São Paulo: Atlas, 1997. 728 p

SOBRINHO, P.S.C. **Utilização da metodologia de operação evolutiva (EVOP) para melhoria de processo na indústria de alimentos**. 2002. 107 p. Monografia (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

APÊNDICE A

Planilha de Cálculo do primeiro Experimento

1º Experimento

Combinações dos tratamentos	Fatores do Planejamento			Resposta				Totais
	A	B	C	1	2			
(1)	-1	-1	-1	172	173			345
a	1	-1	-1	175	174			349
b	-1	1	-1	173	171			344
ab	1	1	-1	174	175			349
c	-1	-1	1	184	186			370
ac	1	-1	1	191	189			380
bc	-1	1	1	182	180			362
abc	1	1	1	185	183			368
			Média	175,1875			some	2867

n=	2	a=	2
nl=	0,05	b=	2
k=	3	c=	2
n2k	16		

Fatores	Efeito	Contraste	Coefficientes da equação	
A=	3,125	0,125	1,56	SQA= 39,063
B=	-2,625	0,125	-1,31	SQB= 27,563
C=	11,625	0,125	5,81	SQC= 540,563
AB=	-0,375	0,125	-0,19	SQAB= 0,563
AC=	0,875	0,125	0,44	SQAC= 3,063
BC=	-2,375	0,125	-1,19	SQBC= 22,563
ABC=	-0,525	0,125	-0,31	SQABC= 1,563
				erro 11,500
				total 646,438

Forte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média Quadrática	Fcalc	Fcrit	P-Valor
A	39,0625	1	39,0625	27,1739	5,31766	
B	27,5625	1	27,5625	19,1739	5,31766	
C	540,5625	1	540,5625	378,0435	5,31766	
AB	0,5625	1	0,5625	0,3913	5,31766	
AC	3,0625	1	3,0625	2,1304	5,31766	
BC	22,5625	1	22,5625	15,9957	5,31766	
ABC	1,5625	1	1,5625	1,0870	5,31766	
Erro	11,500	8	1,4375			
Total	646,438	15				

Obs: se o Fcalc for menor que o Fcrit aceita-se H0

A= Altura da mola
B= Altura do mancal
C= Temp. Vidro

	Fatores do Planejamento			Resposta da Equação
	A	B	C	
(1)	-1	-1	-1	171,94
a	1	-1	-1	175,06
b	-1	1	-1	171,69
ab	1	1	-1	174,81
c	-1	-1	1	185,94
ac	1	-1	1	189,06
bc	-1	1	1	180,94
abc	1	1	1	184,06

Coefficients da equação	
β_0	179,1875
β_1	1,56
β_2	-1,31
β_3	5,81
β_{12}	-1,19

A= Altura da mola, B= Altura do mancal, C= Temp. Vidro

Combinações dos tratamentos	Fatores do Planejamento			Resposta		
	A	B	C	1	2	Média
(1)	-1	-1	-1	172,0	173,0	172,5
a	1	-1	-1	175,0	174,0	174,5
b	-1	1	-1	173,0	171,0	172,0
ab	1	1	-1	174,0	175,0	174,5
c	-1	-1	1	184,0	186,0	185,0
ac	1	-1	1	191,0	189,0	190,0
bc	-1	1	1	182,0	180,0	181,0
abc	1	1	1	185,0	183,0	184,0

Combinações dos tratamentos	Fatores do Planejamento			Resposta			Totais
	A	B	C	1	2		
(1)	-1	-1	-1	29584	29929		59513
a	1	-1	-1	30625	30276		60901
b	-1	1	-1	29928	29241		59170
ab	1	1	-1	30275	30625		60900
c	-1	-1	1	33856	34596		68452
ac	1	-1	1	36481	35721		72202
bc	-1	1	1	33124	32400		65524
abc	1	1	1	34225	33488		67714
						some	514377

APÊNDICE B

Planilha de Cálculo do segundo Experimento

2 Experimento

Combinações dos tratamentos	Fatores do Planejamento			Resposta				Totais
	A	B	C	1	2			
(1)	-1	-1	-1	174	175			349
a	1	-1	-1	178	177			355
b	-1	1	-1	173	172			345
ab	1	1	-1	177	178			355
c	-1	-1	1	187	187			374
ac	1	-1	1	191	190			381
bc	-1	1	1	185	183			368
abc	1	1	1	188	186			374
			Média	181,3125			soma	2901

n	2				
alfa	0,05				
k	3				
nk	36				

Fatores	Efeito		Contraste		Coefficientes da equação	
A	3,625		0,125	29	1,81	SQA= 52,563
B	-2,125		0,125	-17	1,06	SQB= 18,063
C	11,625		0,125	93	5,81	SQC= 540,563
AB	0,375		0,125	3	0,19	SQAB= 0,563
AC	-0,375		0,125	-3	-0,19	SQAC= 0,563
BC	-3,125		0,125	-9	-0,56	SQBC= 5,063
ABC	-0,625		0,125	-5	-0,31	SQABC= 1,563
						erro 6,500
						total 625,438

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média Quadrática	Fcalc	Fcrit	P Valor
A	52,5625	1	52,5625	64,6923	5,31766	
B	18,0625	1	18,0625	22,2308	5,31766	
C	540,5625	1	540,5625	669,3077	5,31766	
AB	0,5625	1	0,5625	0,6923	5,31766	
AC	0,5625	1	0,5625	0,6923	5,31766	
BC	5,0625	1	5,0625	6,2308	5,31766	
ABC	1,5625	1	1,5625	1,9233	5,31766	
erro	6,5000	8	0,8125			
Total	625,438	15				

Obs.: se o Fcalc for menor que o Fcrit aceita-se H0

A= Altura da mola
B= Altura do mancal
C= Temp. Vidro

	Fatores do Planejamento			Resposta da Equação	Coefficients da equação
	A	B	C		
(1)	-1	-1	-1	174,38	$\hat{\beta}_0$ 181,3125
a	1	-1	-1	177,63	$\hat{\beta}_1$ 1,81
b	-1	1	-1	173,00	$\hat{\beta}_2$ -1,06
ab	1	1	-1	177,00	$\hat{\beta}_3$ 5,81
c	-1	-1	1	187,13	$\hat{\beta}_{12}$ 0,19
ac	1	-1	1	190,39	$\hat{\beta}_{23}$ -0,56
bc	-1	1	1	183,50	
abc	1	1	1	187,50	

A= Altura da mola, B= Altura do mancal, C= Temp. Vidro

Combinações dos tratamentos	Fatores do Planejamento			Resposta		
	A	B	C	1	2	Média
(1)	-1	-1	-1	174,0	175,0	174,5
a	1	-1	-1	178,0	177,0	177,5
b	-1	1	-1	173,0	172,0	172,5
ab	1	1	-1	177,0	178,0	177,5
c	-1	-1	1	187,0	187,0	187,0
ac	1	-1	1	191,0	190,0	190,5
bc	-1	1	1	185,0	183,0	184,0
abc	1	1	1	188,0	186,0	187,0

Combinações dos tratamentos	Fatores do Planejamento			Resposta			Totais
	A	B	C	1	2		
(1)	-1	-1	-1	30276	30625		60901
a	1	-1	-1	31684	31329		63013
b	-1	1	-1	29929	29584		59513
ab	1	1	-1	31329	31684		63013
c	-1	-1	1	34969	34969		69938
ac	1	-1	1	36481	36100		72581
bc	-1	1	1	34225	33489		67714
abc	1	1	1	35344	34996		69940
						soma	526613