

FLÁVIO FUKUGAVA

**OTIMIZAÇÃO NO CONSUMO DE ENERGIA EM FORNOS DE
RECOZIMENTO PARA VIDROS OCOS, UTILIZANDO TÉCNICAS DA
QUALIDADE TOTAL**

**Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do certificado
de Especialista em Engenharia da
Qualidade-MBA/USP**

**Orientador:
Prof. Adherbal Caminada Netto**

**SÃO PAULO
2003**

AGRADECIMENTOS

A Deus que proporcionou este momento de alegria em minha vida, e por ter dado a oportunidade de ampliar um pouco os conhecimentos técnicos e científicos da Engenharia da Qualidade.

Á minha esposa, Inês e aos meus pais, Jorge e Cecília que colaboraram para que este momento fosse possível.

Aos professores do MBA-USP / EQ que dedicaram suas energias, entusiasmo na formação dos alunos, com especial menção aos professores Adherbal Caminada Neto e Dr. Gilberto F.M. de Souza pela proposta do tema e orientação, que incentivaram os alunos até a consecução do curso.

Á Strainoptic Technology Co. em conceder a utilização do manual de instrução de utilização do equipamento IM-100 neste trabalho.

Á NADIR FIGUEIREDO IND. COM S/A que me proporcionou esta oportunidade de estudar e em especial aos Sr.s Samuel Caro, Fabio Samezima e Edno Felix que deram contribuição ao trabalho, com orientações e sugestões.

A todos os meus amigos que direta ou indiretamente colaboraram na melhoria deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo otimizar o consumo de energia na forma de gás natural em fornos de recozimento para os diferentes artigos em vidro oco. Aplicando as técnicas da Qualidade Total como o PDCA e o Delineamento de Experimentos busca-se uma economia de aproximadamente US\$ 5.000,00 por ano em cada forno de recozimento. O uso do PDCA é de necessária utilização para o correto planejamento do experimento, podendo assim obter uma coesa organização e um bom resultado do experimento. Neste procedimento, empregou-se a identificação dos “seis Ms” da seguinte forma: Máquina - forno de recozimento; Matéria prima - artigo em vidro oco; Método - Delineamento de Experimentos; Medição - grau de retardamento ótico da leitura do recozimento, espessura do vidro, temperatura do vidro, temperatura da esteira e o consumo de gás natural; Mão de obra - operador da linha e o chefe do processo; Meio ambiente - gás natural. Com a aplicação do Delineamento de Experimento foi possível chegar a uma equação ideal entre as variáveis como: a temperatura de aquecimento máximo, a temperatura de resfriamento forçado, a velocidade de passagem no forno e a espessura do artigo, verificando também a maior influência da espessura do vidro e da temperatura máxima de aquecimento, no recozimento. O modelo gerado pelo experimento oferece condições para dimensionar corretamente o consumo de gás natural, através de um grau de retardamento ótico do recozimento previamente definido.

ABSTRACT

The purpose of the study is to optimize the consumption of energy – natural gas – in annealing ovens for the various glass hollowware. By using Total Quality techniques, such as PDCA and Design of Experiments, we aim to obtain savings of about US\$ 5.000,00/year/oven. The use of PDCA is essential for the correct planning of the experiment, providing a consistent organization and a good experiment result. In this procedure, a identification of “six Ms” is made as follow: Machine – annealing oven; Material – glass hollowware; Method – Design of Experiment; Manpower – machine operator and the head of production; Measurement – degree of optical retardation, glass thickness, temperature of glass, temperature of a oven belt and natural gas consumption; Means – natural gas. The application of Design of Experiments allowed us to reach an ideal balance among he variables, such as heating temperature, cooling temperature, speed of passage through the oven and thickness of the product, as well as concluding that maximum heating temperature and glass thickness are the most influential variables in the annealing process. The model generated by the experiment allowed us to correctly estimated natural gas consumption, using a pre-determined degree of optical retardation of the annealing process.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO I

1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1- Vidro.....	1
1.2- Recozimento do vidro.....	10
1.3- Fornos de Recozimento	20
1.4 - Curvas de Recozimento	23

CAPÍTULO II

2.0 - Proposta do trabalho.....	25
2.1 - Aplicação do Delineamento de Experimento.....	25
2.1.1 - Aplicação do PDCA.....	26
2.2.1 - “PLAN”- Planejamento do Experimento.....	27
2.2.2 - “DO “-Realização do Experimento.....	34
2.2.3 - “CHECK “-Análise dos Resultados.....	37
2.2.3.1 - Cálculo da economia de energia.....	41
2.2.3.2 - Validação do modelo.....	45
2.2.3.4 - Verificação da confiabilidade do cálculo do consumo de energia no forno de recozimento.....	55
2.2.4 -“ACTION”- Aplicação do resultado do Experimento em prática.....	59
CONCLUSÃO.....	60
APÊNDICE 1.....	61
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	73

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1 - Curva de viscosidade do vidro cal-soda.....	2
Figura 2 - Algumas reações que ocorrem na fusão do vidro.....	4
Figura 3 - Esquema do fluxo do vidro no tanque de fusão e a função da garganta.....	5
Figura 4 - Forno tanque de fusão para vidros de recipientes.....	5
Figura 5 - Fornecedora de vidro.....	6
Figura 6 - Foto da gota de vidro.....	7
Figura 7 - Esquema das fases de prensagem e sopro do vidro.....	8
Figura 8 - Foto da máquina “IS”.....	9
Figura 9 - Tensão em uma chapa de vidro resfriada.....	11
Figura 10 - Tensão temporária e permanente.....	12
Figura 11 - Diagrama de tensão com temperatura abaixo da faixa de recozimento.....	12
Figura 12 - Diagrama de tensão com temperatura dentro da faixa de recozimento.....	13
Figura 13 - Esquema da luz polarizada.....	14
Figura 14 - Princípio de um polariscópio plano.....	16
Figura 15 - Foto da amostra a ser analisada no polariscópio na posição “zero”.....	17
Figura 16 - Foto de uma amostra com alto índice de tensão.....	17
Figura 17 - Foto do analisador na posição de leitura o ângulo de rotação.....	18
Figura 18 - Partes de um Forno de Recozimento.....	20
Figura 19 - Queimador lateral tipo “Comelcomex”.....	21
Figura 20 - Esquema de recirculação interna de aquecimento.....	21
Figura 21 - Foto da lateral de um forno de recozimento.....	22
Figura 22 - Foto da entrada do artigo em vidro no forno de recozimento.....	22
Figura 23 - Curva de recozimento padrão.....	23

Figura 24 - Esquema simplificado do fluxo do processo de fabricação de artigos em vidro oco.....	24
--	----

CAPÍTULO II

Figura 25 - Modelo geral de um processo para Delineamento de Experimento.....	25
Figura 26 - Ciclo PDCA.....	26
Figura 27 - Variáveis a serem estudadas.....	27
Figura 28 - Foto do corte da parede do artigo em vidro.....	30
Figura 29 - Foto do artigo a ser analisado.....	30
Figura 30 - Esquema que localiza a retirada das amostras R1, R2, e R3.....	32
Figura 31 - Forno de recozimento “DELTEC”.....	33
Figura 32 - Foto da vista lateral do Forno utilizado para o teste.....	33
Figura 33 - Leitura do grau de recozimento, posição “zero”.....	35
Figura 34 - Foto da posição de leitura 32, lado direito.....	35
Figura 35 - Foto da posição de leitura 37, lado esquerdo.....	36
Figura 36 - Gráfico de região de aceitação ou rejeição de HO.. ..	37
Figura 37 - Gráfico de verificação do Erro(%) X Espessura(mm).....	47
Figura 38 - Foto da amostra usada para análise da verificação do erro do modelo.....	48
Figura 39 - Foto do dispositivo de verificação de espessura “PARAMETRICS”.....	48
Figura 40 - Foto do medidor de espessura até 15mm.....	48
Figura 41 - Foto de leitura de temperatura do vidro.....	50
Figura 42 - Foto da esteira retornando pela parte externa do forno.....	51
Figura 43 - Foto da 1ª flauta de aquecimento da esteira.....	51
Figura 44 - Foto da 2ª flauta de aquecimento	51
Figura 45 - Foto da leitura de temperatura da esteira antes da 2ª flauta.....	52
Figura 46 - Foto da leitura de temperatura da esteira após a 2ª flauta.....	52
Figura 47 - Foto do sistema infravermelho tipo radiômetro.....	53

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1 - Composição típica para recipientes de vidro.....	3
Tabela 2 - Designação de têmpera “ASTM C 148-95”.....	18

CAPÍTULO II

Tabela 3 - Limites dos tratamentos.....	28
Tabela 4 - Combinações dos tratamentos com datas e horários.....	29
Tabela 5 - Número mínimo de amostras de lotes”ASTM C224-1996”.....	31
Tabela 6 - Resultado das leituras do grau de recozimento das amostras.....	34
Tabela 7 - Matriz do Experimento.....	36
Tabela 8 - Situação que pode ocorrer num teste de hipótese.....	38
Tabela 9 - Eliminação dos termos acima de $\alpha = 5\%$	39
Tabela 10 - Valores de transformação de escala.....	41
Tabela 11 - Condições com as respectivas variáveis.....	46
Tabela 12 - Resultado da verificação do erro do modelo X real.....	47
Tabela 13 - Valores do consumo de gás natural X Temperatura utilizada.....	55
Tabela 14 - Resultado da verificação do erro entre o consumo calculado e o consumo real.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM- American Society for Testing and Materials

ANOVA – “ANalysis Of Variance”

E.E. – Energia requerida para aquecer a esteira

E.V. – Energia requerida para aquecer o vidro

E.T. – Energia total requerida

IS – Individual Section

MAX – máximo

M.E. – Massa da esteira (kg/min)

MIN - mínimo

M.V. – Quantidade de massa de vidro (kg/min)

PDCA – Plan, Do, Check, Action

T.^a - Temperatura de aquecimento próximo a ponto de recozimento

T.E. – Temperatura da esteira no momento da entrada no Forno de
Recozimento

T.V. – Temperatura do vidro no momento da entrada no Forno de
Recozimento

1D - 1º amostra do lado direito

1E - 1º amostra do lado esquerdo

2D - 2º amostra do lado direito

2E - 2º amostra do lado esquerdo

3D - 3º amostra do lado direito

3E - 3º amostra do lado esquerdo

HO - hipótese nula

H1 - hipótese alternativa

LISTA DE SÍMBOLOS

T2	- temperatura máxima de aquecimento em °C
T6	- temperatura de resfriamento forçado em °C
V	- velocidade da esteira em metros/minuto
E	- espessura do artigo em milímetros
σ	- tensão
σ_0	- tensão inicial
t	- tempo
A	- constante variando com a temperatura e a composição do vidro
M	- módulo de elasticidade à temperatura de Recozimento
η	- viscosidade à temperatura de Recozimento
C	- velocidade da luz
V	- velocidade que a luz percorre em um corpo transparente
K	- coeficiente óptico de tensão
Cb	- constante óptica de tensão
δ	- retardamento(nm)
P	- plano polarizador
α	- ângulo entre o polarizador e a direção da referência
a	- amplitude da luz polarizada no plano P
t	- espessura da amostra
β	- ângulo entre a direção principal e a direção de referência
A	- plano do analisador
N	- ordem de fringência
λ	- constante para o vidro 565 nm (ASTM F 218)
F	- constante de tensão do material óptico
e	- espessura do vidro em polegadas
m	- metros
kcal	- kilocalorias
h	- horas

α - nível de significância

β - erro tipo II

R - Recozimento do vidro em Graus (°)

T - valores estatísticos, para testar as hipóteses nulas de que os coeficientes são nulos

R² - coeficiente de explicação do modelo

SSregression - soma dos quadrados devido à regressão

SStotal - soma total dos quadrados

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Na fabricação de produtos em vidro oco é necessário, após a conformação, o processo de recozimento para aliviar as tensões internas, tornando-o seguro para embalagem e para o uso doméstico. Devido a enorme variedade de conformação de artigos em vidro, geralmente, nos fornos de recozimento, utiliza-se a temperatura para o recozimento de 550° C, denominada de “Annealing Point” ou ponto de recozimento. Este ponto de recozimento depende da composição do vidro, onde grande parte dos produtos em vidro oco para o uso comercial é do tipo sílica-soda-cal, ou a base de Sódio e Cálcio.

Para produtos com alta velocidade de produção (acima de 100 peças por minuto), antes de sofrer processo de recozimento, encontra-se a temperatura próxima do ponto de recozimento, devido à alta velocidade de produção. Isto proporciona a condição de utilizar menos energia requerida para o alívio de tensões, ocasionando assim, a economia de energia.

1.1-Vidro

Segundo NORTON (1973):

“O vidro é definido como sendo um líquido resfriado de alta viscosidade”, porém uma definição mais precisa é dada por Morey (1938): “um vidro é uma substância inorgânica numa condição contínua e análoga ao estado líquido daquela substância, porém, devido ao fato de ter sido resfriada de uma condição fundida, atingiu um grau de viscosidade tão alto que é considerada rígida para todos os fins práticos”. Por muitos anos, a natureza do vidro não foi compreendida. Somente com as técnicas de difração de raios-X desenvolvidas por Warren (1933) e colaboradores, para estudar tal problema, foi possível obter um melhor conhecimento, e isso somente para vidros simples. Segundo VAN VLACK (1973), a definição dada pela ASTM ao

vidro, é: “um produto inorgânico de fusão que foi resfriado até atingir condições de rigidez, sem sofrer cristalização”.

Sobre a viscosidade do vidro segundo NORTON (1973): “é uma característica importante na sua trabalhabilidade e no recozimento e, portanto, sua medição tem importância prática e teórica. A Figura 1 mostra a curva de viscosidade de um vidro cal-soda normal numa faixa ampla de temperatura”.

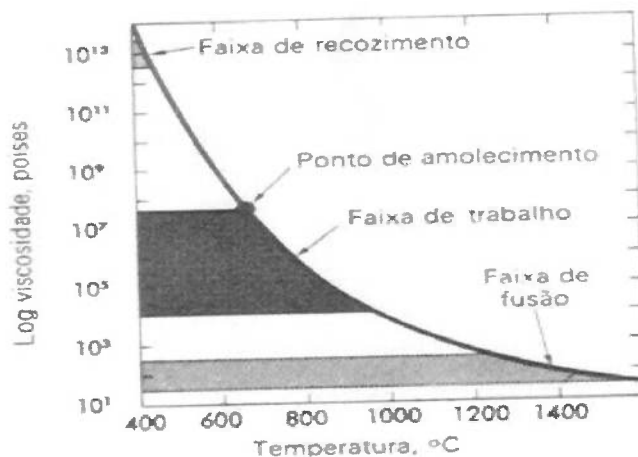


Figura 1 - Curva de viscosidade de vidro, (NORTON, 1973).

É de grande importância saber as escalas de viscosidades em várias regiões, em função da temperatura, para fabricação do vidro. Segundo NORTON (1973) as principais faixas são:

Faixa de recozimento: $10^{12,5} \sim 10^{13,4}$ poises

Ponto de amolecimento: $10^{7,6}$ poises

Faixa de trabalhabilidade: $10^4 \sim 10^{7,6}$ poises

Faixa de fusão: $10^{1,5} \sim 10^{2,5}$ poises

Extrapolando a curva de viscosidade até a temperatura ambiente, obtém-se um valor de 10^{27} poises. Vidros sob tensão poderão fluir à temperatura ambiente, porém com uma velocidade muito baixa que seria necessária toda uma vida para medi-la, como foi demonstrado por NORTON (1973).

A maior produção de vidro no momento é do tipo sílica-cal-soda com uma pequena adição de alumina. Esse tipo de vidro é usado para recipientes, garrafas,

louça em geral e vidro plano para janelas. Uma fórmula típica de vidro para garrafas é mostrada na Tabela 1:

Tabela 1- Composição típica para recipiente de vidro, (NORTON, 1973).

Areia	1000lb
Carbonato de sódio	342lb
Calcário	262lb
Feldspato	128 lb
Baritas	17 lb
Nitrato de sódio	5 lb
Trióxido de arsênio	0,5 lb
Selênio	0,225 oz
Óxido de cobalto($\text{Co}_3 \text{O}_4$)	0,015oz
Caco("cullet")	150 lb

O processo de fusão envolve uma série complicada de reações, que ocorre quando a temperatura aumenta e continua com o tempo, mesmo após a temperatura ter atingido seu valor máximo. A Figura 2 mostra as reações em função da temperatura, durante a fusão do vidro. A maioria destas reações ocorre simultaneamente, no entanto, ainda não existem dados precisos sobre o que ocorre cronologicamente desde a mistura das matérias prima até o vidro refinado.

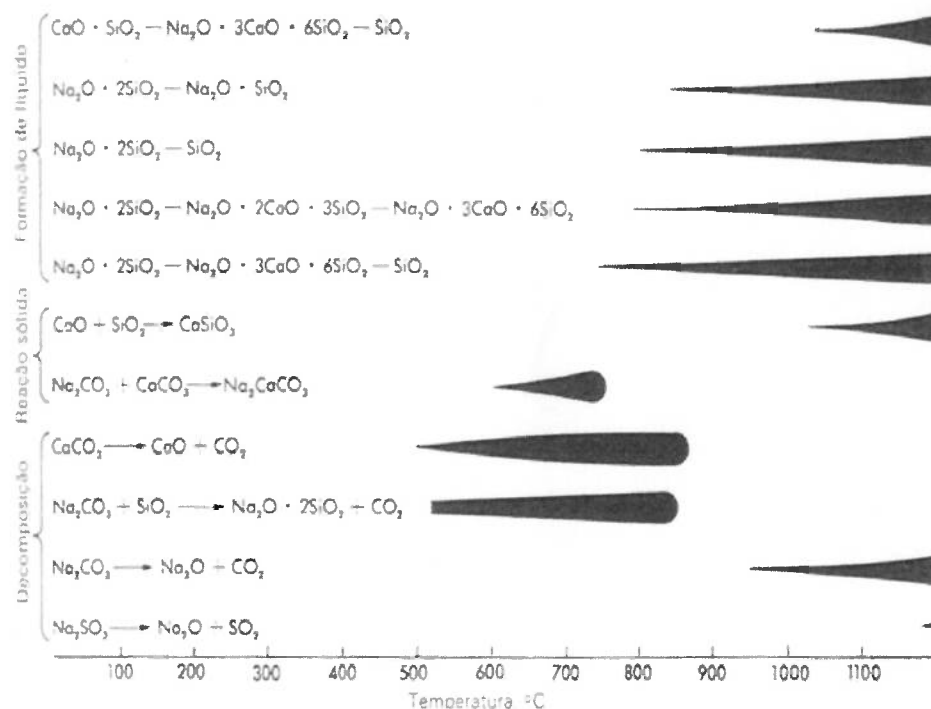


Figura 2 - Algumas das reações que ocorrem na fusão do vidro, (NORTON, 1973).

O equipamento para a fusão da composição do vidro é o forno-tanque contínuo. Nele, o vidro é aquecido inteiramente a partir da superfície livre e as matérias primas são continuamente alimentadas num extremo e o vidro refinado é continuamente retirado no outro extremo, passando pelo tanque de fusão. O calor é fornecido à região de fusão, onde a mistura de matérias primas é fundida. O vidro resultante escoava através de uma abertura submersa, a *garganta*, com a função de remover a espuma de escória que se forma. Movimentando-se lentamente, o vidro encontra-se a uma temperatura mais baixa até a região de refinação, a zona de refino. A Figura 3 mostra o fluxo do vidro e a função da garganta:

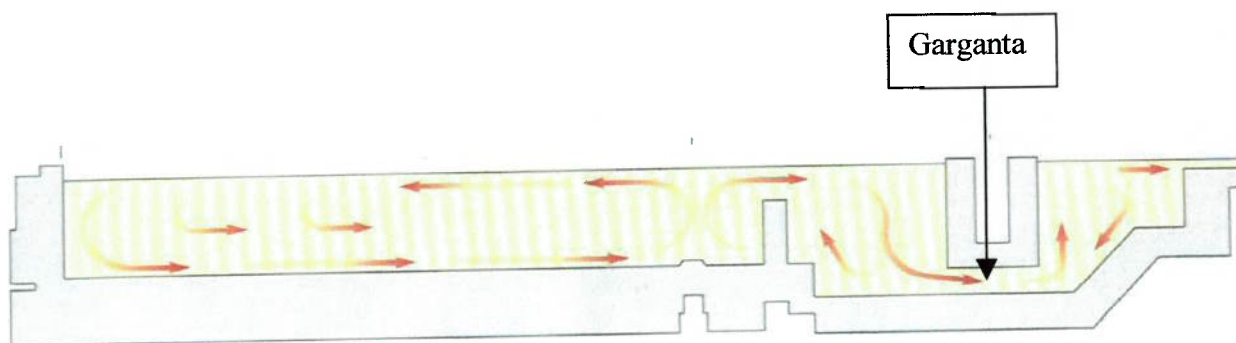


Figura 3- Esquema do fluxo do vidro no tanque de fusão e a função da garganta.

A Figura 4 demonstra o fluxo do vidro desde a entrada da composição até a saída no formato de “gotas”.

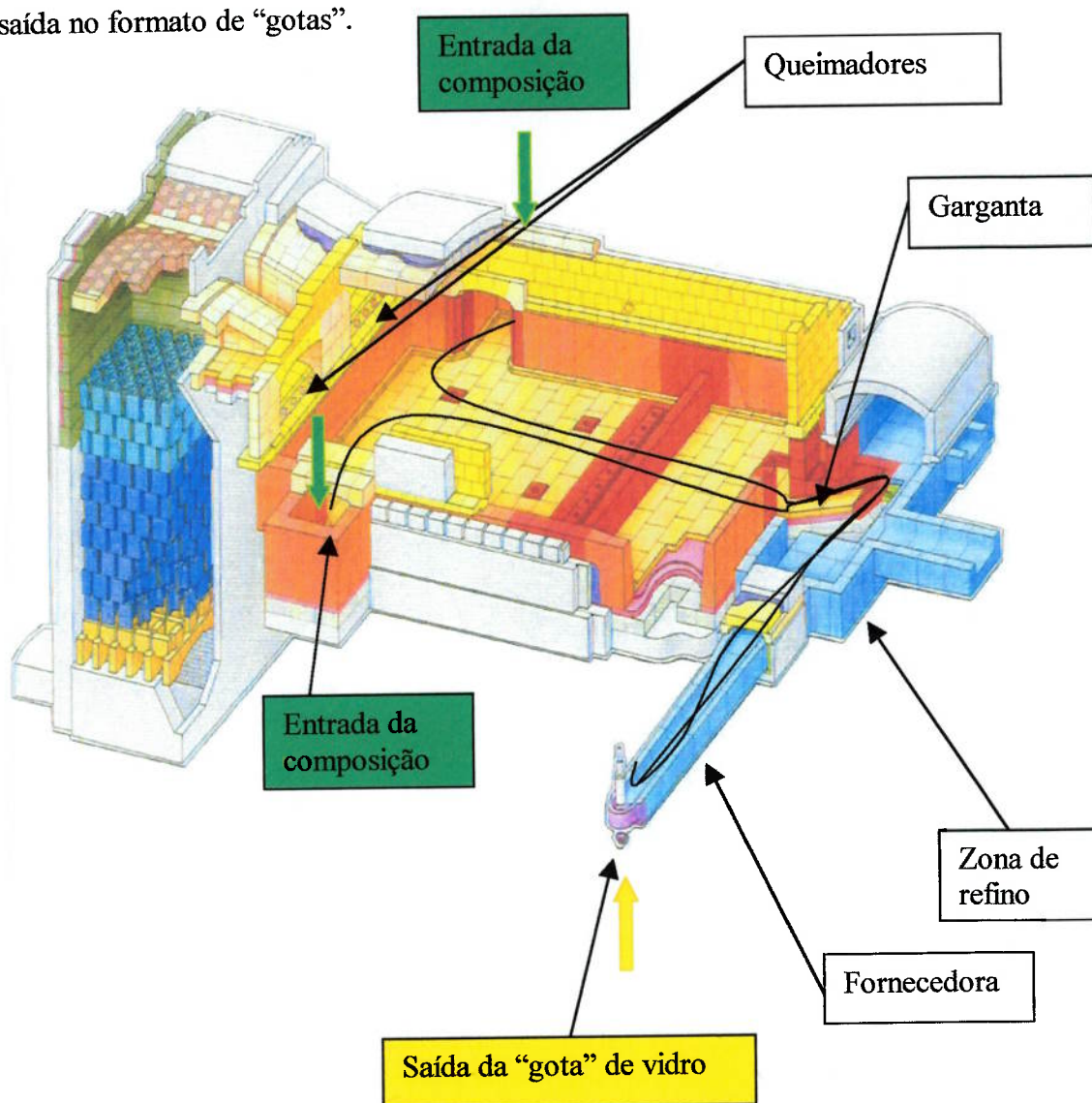


Figura 4- Forno tanque de fusão de vidros para recipientes.

O vidro passa através de uma fornecedora com temperatura controlada para as máquinas de conformação de peças de vidro ; o mesmo produz “gotas”(“gobs”) de vidro, uniformes em peso e na forma, pelo controle de escoamento através de um orifício de material refratário seguido pelo corte da gota. Para a conformação do vidro, a máquina automática deve ser suprida por vidro, uniforme, a fim de trabalhar eficientemente. A Figura 5 mostra a seção transversal de um alimentador de gotas, sendo a fotografia do mesmo apresentada na Figura 6.

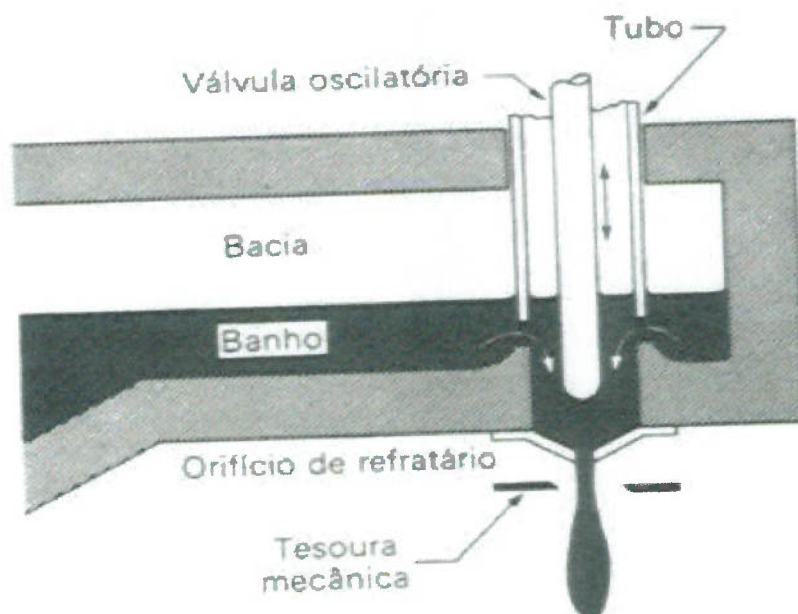


Figura 5- Fornecedora de vidro, (NORTON, 1973).

A gota, neste momento, encontra-se com a viscosidade necessária para a conformação; isto ocorre na temperatura aproximada de 1130° C.



Figura 6 - Foto de um alimentador fornecendo a gota de vidro

Como o vidro é conformado no estado viscoso, os métodos são os mais variados. Para a produção de recipientes, o processo utilizado é o prensado-soprado. Observa-se que há duas fases em cada método: a primeira, a conformação do “parison” ou forma temporária de uma gota de vidro e a segunda, a injeção do ar ou sopro dentro do “parison” para se adaptar à sua superfície interna do molde. A Figura 7 demonstra as fases de prensagem e sopro-(máquina I.S.), sendo que na Figura 8 apresenta-se a fotografia da máquina em referência.

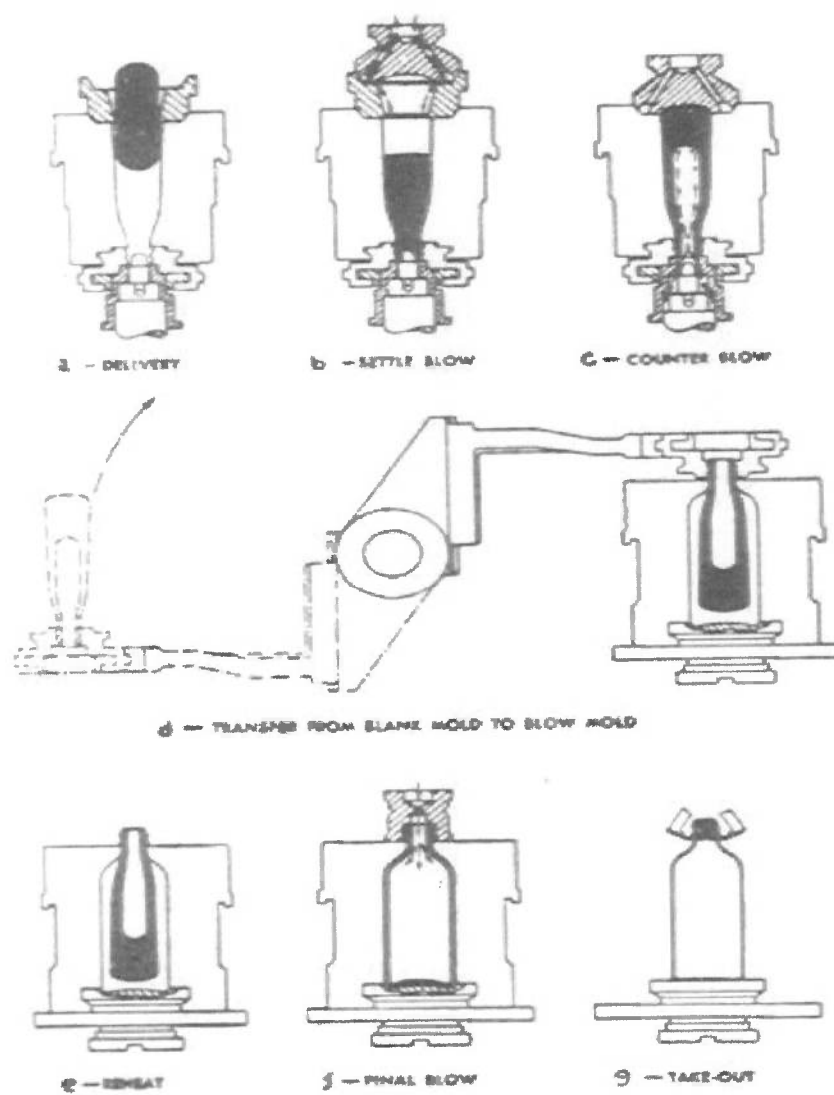


Figura 7 – Esquema das fases de prensagem e sopro do vidro,
(TOOLEY,1984).

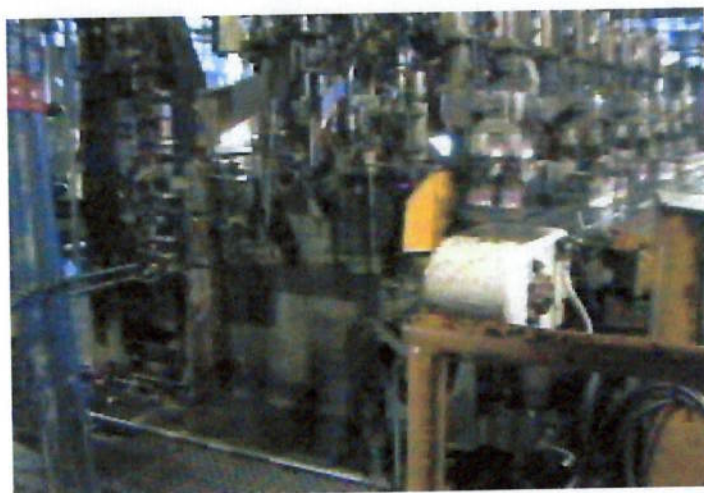


Figura 8 – Foto de uma máquina “IS.”

As referências que são utilizadas para a trabalhabilidade dos produtos em vidro oco são:

“Softening point” ou Ponto de amolecimento - para o vidro tipo soda-cal a temperatura média é 730°C .

“Annealing point” ou Ponto de Recozimento – para o vidro tipo soda-cal a temperatura média é 560°C .

“Strain point” ou Ponto limite para alívio de tensões – para o vidro soda-cal a temperatura média é 510°C .

A temperatura da gota para a conformação é em torno de 1130°C e até o término da conformação do produto em vidro, a temperatura atinge em torno 500°C . O decréscimo deste gradiente de temperatura ocorre em menos de 30 segundos, isto é, há uma queda brusca de 630°C , gerando altíssimas tensões no vidro, sendo necessário o recozimento para aliviar as tensões, tornando-o um produto seguro comercialmente, evitando assim quebras espontâneas.

1.2 – Recozimento do vidro

Conforme NORTON (1973):

“O recozimento do vidro é uma parte importante do processo de manufatura. É feito para liberar as tensões que podem ser altamente prejudiciais no caso de resfriamento pelo ar. Quanto mais pesados forem os objetos de vidro, mais lento deverá ser a velocidade de resfriamento. Por outro lado, o recozimento faz mais do que liberar as tensões de resfriamento. Ele também permite que a estrutura atômica adquira uma condição mais estável, que pode ser revelada por uma densidade mais alta e maior índice de refração. Em outras palavras, em um vidro resfriado rapidamente, há um considerável congelamento da desordem, um arranjo mais compacto pode ser obtido pelo recozimento.”

Há muitas teorias para o mecanismo de recozimento. A lei de Adams e Williamson diz que:

$$1/\sigma - 1/\sigma_0 = At, \quad (1)$$

onde σ é a tensão ao tempo t , σ_0 é a tensão inicial no tempo zero e A é uma constante, variando com a temperatura e composição. Essa equação está de acordo com os dados experimentais até o extremo superior da faixa de recozimento, porém, não é satisfatória para viscosidades mais altas.

Lilie propôs uma relação que dá melhor correlação com os experimentos. A relação é a seguinte:

$$-d(\log \sigma)/dt = M/\eta \quad (2)$$

σ = tensão

t = tempo

M = módulo de elasticidade à temperatura de recozimento

η = viscosidade à temperatura de recozimento

O recozimento permite a redução de tensões a qualquer grau desejado, se for destinado um tempo suficiente. Um pote pode ser recozido em poucas horas, porém, um espelho telescópico leva meses.

É desejável, em alguns casos, resfriar rapidamente um vidro com um sopro de ar para introduzir tensões elevadas de uma forma pré-determinada. As faces podem ser resfriadas, levando-as rapidamente, abaixo da temperatura de escoamento, enquanto o núcleo da chapa continua quente e deformável. O resfriamento subsequente do núcleo colocará as superfícies em compressão.

Na Figura 9 é mostrado como ocorre a tensão pela curva **a** em uma chapa de vidro resfriada:

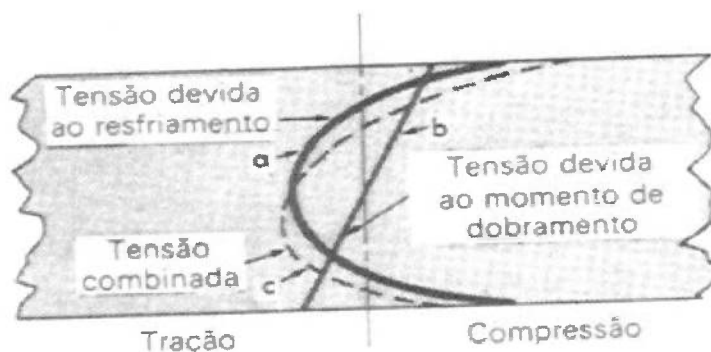


Figura 9 – Tensão em uma chapa de vidro resfriada, (NORTON, 1973).

Se uma chapa recozida pela forma usual for submetida à tensão por dobramento, as forças ao longo da espessura estarão como na curva **b** e a ruptura ocorrerá no lado da tensão. Se a mesma tensão for agora aplicada ao vidro temperado, a distribuição de tensões internas será obtida pela soma da tensão residual **a** e da tensão aplicada **b**, o que dá a curva **c**. Observa-se que, neste caso, a tensão na superfície, que controla a ruptura, é mudada para a compressão e a resistência total é muito aumentada. Um outro fator no uso do vidro rapidamente resfriado ou “congelado” (“chilled”) é o tipo da fratura, ao invés dos fragmentos usuais muitos afiados, o rompimento se dá em pequenos cubos, que oferecem menos perigo por serem pouco cortantes.

Segundo TOOLEY (1984), a tensão interna residual temporária e permanente no vidro depende do tratamento de aquecimento do vidro.

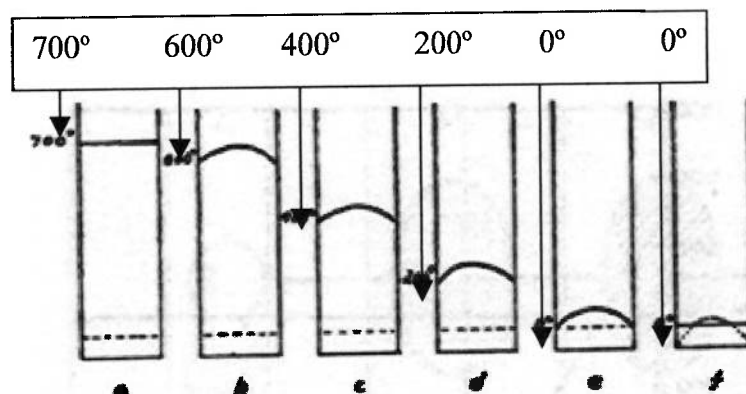


Figura 10 – Tensão temporária e permanente, (TOOLEY, 1984).

Na Figura 10 é mostrado o diagrama das diversas fases de como uma secção do vidro resfriado com velocidade uniforme desde uma alta temperatura, recebe a tensão permanente, quando o resfriamento do vidro é interrompido. As abscissas representam as distâncias da direção normal para a superfície do vidro e as ordenadas representam as temperaturas (linha cheia) ou a tensão (linha pontilhada).

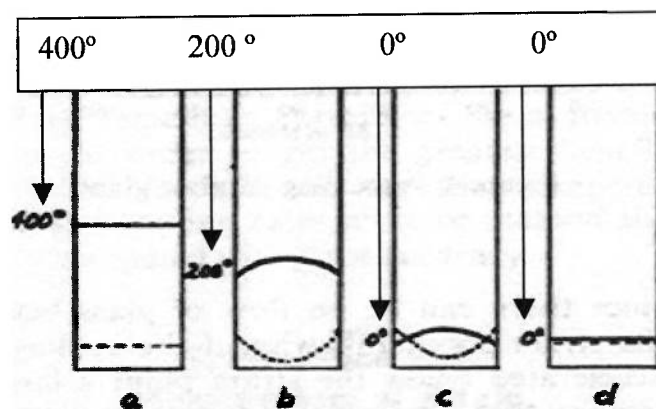


Figura 11 – Diagrama das fases de tensão de um resfriamento com temperatura abaixo da faixa de recozimento, no qual não há introdução de tensões residuais permanentes, (TOOLEY, 1984).

Na Figura 11 é mostrado o diagrama de tensões em uma secção de vidro que recebe o recozimento abaixo da temperatura de recozimento, resultando na eliminação de tensões residuais.

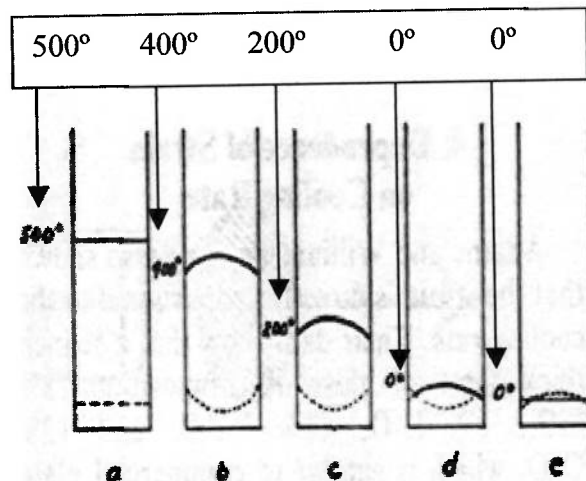


Figura 12 – Diagrama das fases de tensão de um resfriamento com temperatura dentro da faixa de recozimento. Neste caso, existe tensão residual permanente, mas menor do que na Figura 11, segundo TOOLEY(1984).

A Figura 12 mostra o diagrama de tensões de uma secção de vidro que sofreu resfriamento rápido a partir da temperatura de recozimento. Pode-se observar que as tensões residuais são menores que as tensões da Figura 10.

Para verificar as tensões residuais ou internas acumuladas no processo de fabricação de vidro oco deve-se medir as tensões utilizando-se de técnicas experimentais, recomendando-se, a análise por fotoelasticidade. O equipamento necessário para isso é o polarímetro, que possibilita a regulação para feixes de luz vertical e horizontal.

Segundo STRAINOPTICS TECHNOLOGY (1998), a luz se propaga sob forma de vibrações eletromagnéticas similares a ondas de rádio. Uma fonte incandescente emite energia, que se propaga em todas as direções e que contém todo um “espectro” de vibrações de frequências diferentes ou comprimento de onda. Uma

vibrações será transmitido (aquele que for paralelo ao eixo privilegiado do filtro) . Este fecho de luz organizado chama-se luz polarizada ou “plano polarizado”, porque a vibração está contida em um plano. Se outro filtro polarizado estiver em seu caminho, pode-se obter uma extinção total do fecho de luz quando os eixos dos dois filtros estiverem perpendicular um ao outro.

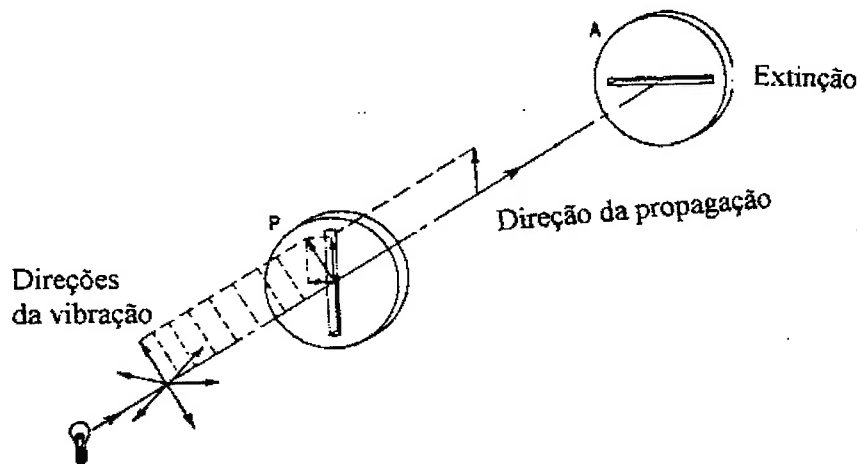


Figura 13 –Esquema da Luz polarizada, (STRAINOPTICS TECHNOLOGY, 1998).

A luz se propaga no vácuo ou no ar a uma velocidade (C) de 3×10^{10} cm/seg. Em outros corpos transparentes , a velocidade (V) é mais baixa e a relação C/V é chamada “índice de refração”. Em um corpo isotrópico, este índice é constante, independente da direção da propagação ou do plano de vibração. Certos materiais, como o vidro, são isotrópicos quando livres de tensão, mas se tornam anisotrópicos quando dotados de tensão. A mudança no índice de refração é uma função da tensão aplicada. A lei de Brewster estabelece que a troca relativa em índice de refração é proporcional á diferença das tensões principais:

$$(n_x - n_y) = K(\epsilon_x - \epsilon_y) \quad \text{ou} \quad (3)$$

$$(n_x - n_y) = Cb(\sigma_x - \sigma_y) \quad (4)$$

A constante K é chamada de “coeficiente óptico de tensão” e caracteriza uma propriedade física do material. Ela é uma constante sem dimensões e que geralmente

aplicada. A lei de Brewster estabelece que a troca relativa em índice de refração é proporcional à diferença das tensões principais:

$$(n_x - n_y) = K(\epsilon_x - \epsilon_y) \quad \text{ou} \quad (3)$$

$$(n_x - n_y) = C_b(\sigma_x - \sigma_y) \quad (4)$$

A constante K é chamada de “coeficiente óptico de tensão” e caracteriza uma propriedade física do material. Ela é uma constante sem dimensões e que geralmente é estabelecida através de calibração. A constante “ C_b ” é a constante óptica de tensão. Para vidros soda-cal o valor utilizado de C_b é $2,68$ ($C_b \times 10^{12} \text{ 1/Pa}$) (Referência: Manual do Padrão de Engenharia da Associação de Têmpera de vidro).

Quando um fecho de luz polarizada se propaga através de um material transparente de espessura e , onde x e y são as direções das tensões principais no ponto em consideração, o vetor de luz se divide em dois fechos de luz polarizados que vibram nos planos “ x ” e “ y ”.

Se as tensões ao longo forem σ_x e σ_y e a velocidade da luz vibrando nestas direções é V_x e V_y respectivamente, o tempo necessário para cada uma delas atravessar a chapa será de t/V e o retardamento relativo entre estes dois fechos de luz será:

$$\delta = C * (e/V_x - e/V_y) = e * (n_x - n_y) \quad (5)$$

Ao combinar as expressões acima, teremos:

$$\delta = e * K * (\sigma_x - \sigma_y) \quad (6)$$

ou, ao relacionar o retardamento δ às tensões, teremos:

$$\delta = C_b * e * (\sigma_x - \sigma_y) \quad (7)$$

Devido ao retardamento relativo (distância entre as ondas rápidas e as vagarosas) δ , as duas ondas não são mais simultâneas ao aparecerem no objeto. O Analisador transmitirá apenas um componente de cada uma destas ondas. Estas ondas causarão uma interferência e a intensidade de luz resultante será uma função dos seguintes pontos:

- o retardamento δ .
- o ângulo entre o Analisador e a direção das tensões principais($\beta - \alpha$)

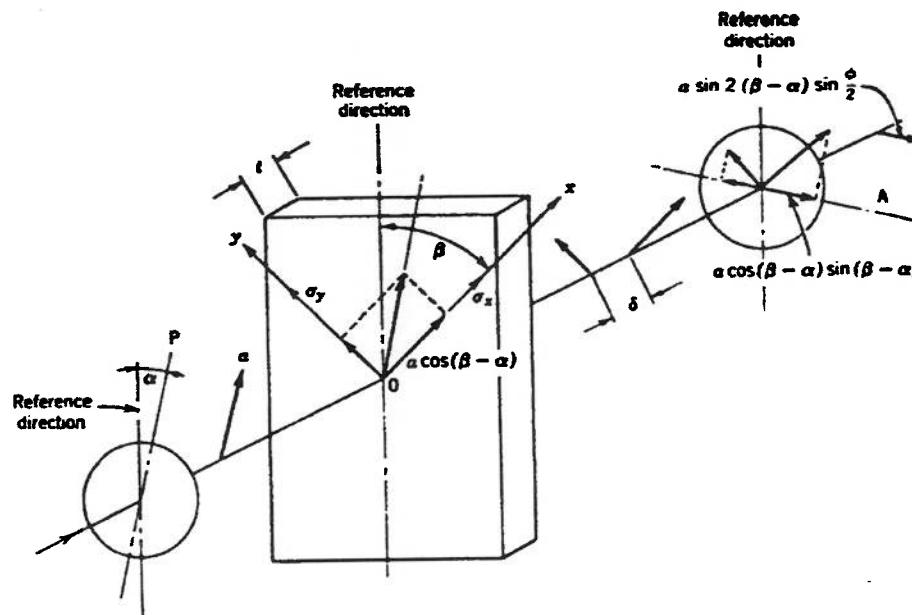


Figura 14 – Princípio de um polariscópio plano: P, plano do polarizador; α , ângulo entre o polarizador e a direção da referência; a , amplitude da luz polarizada no plano P; e , espessura da amostra com tensões σ_x e σ_y nas direções x y ; β , ângulo entre a direção principal x e a direção de referência; δ , retardamento relativo de Y em relação à onda X ; A, plano do analisador, segundo STRAINOPTICS TECHNOLOGY(1998).

A “Ordem de fringência” N é expresso através da fórmula:

$$N = \delta / \lambda \quad (8)$$

δ = retardamento (nm)

λ = Constante para vidro 565 nm (ASTM F 218).

Para utilizar o polarímetro é necessário girar o analisador inicialmente, de forma que seu plano de polarização seja perpendicular ao plano do polarizador, isto é, “zerar” o marcador. Introduzir a amostra do produto a ser analisada e observar o

fundo através da parte superior do produto. Uma “cruz” aparecerá no campo entre as áreas, que deverão apresentar cor no polarímetro. Nas amostras com recozimento aceitável, essa “cruz” será desfocada e indistinta.

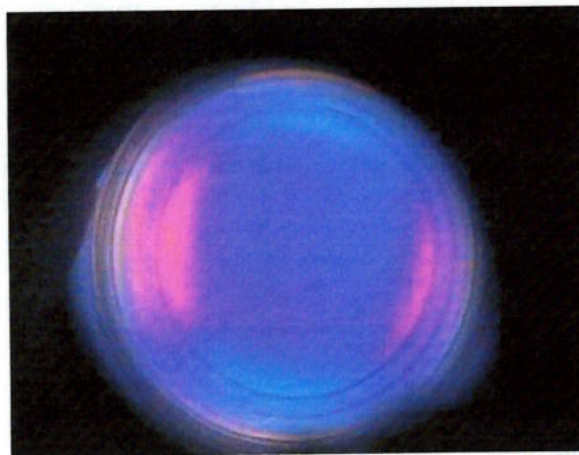


Figura 15 – Foto da amostra a ser analisada no polarímetro na posição “zero”.

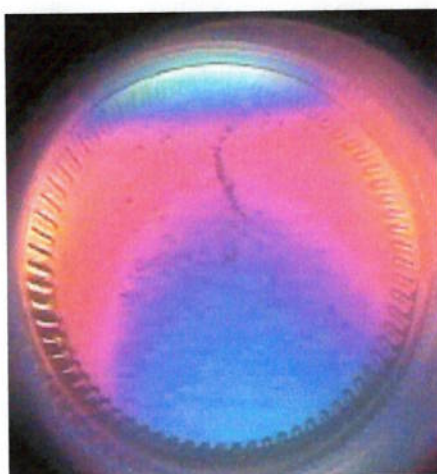


Figura 16 – Foto de uma amostra com alto índice de tensão (região clara).

O giro do analisador faz com que essa cruz se divida em dois arcos que seguirão para fora em sentidos opostos, na direção do calcanhar da amostra. À medida que essas áreas escuras se movem para fora, elas desenvolvem uma coloração azulada no lado côncavo e uma cor marrom no lado convexo. Ao medir a birrefringência de um ponto selecionado da amostra, girar o analisador até que a cor azulada seja substituída pela cor marrom no ponto selecionado. Girar o recipiente em

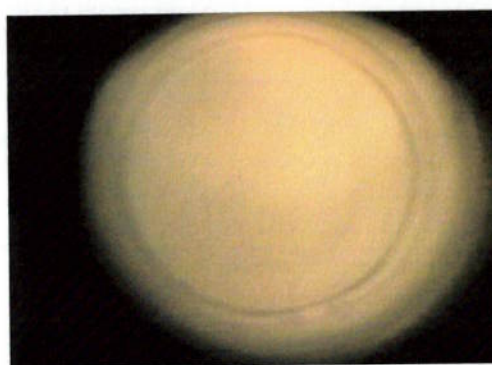


Figura 17 – Foto do analisador na posição de leitura do ângulo de rotação.

Converter o ângulo de rotação do analisador em número de tempera conforme indicado pela norma ASTM C148-95, reproduzida na Tabela 2.

Tabela 2 – Designação de “Tempera” - ASTM C 148 – 95

Número de tempera	Rotação do analisador em graus (°)	Retardamento δ (nm)	Ordem fracionária (N)
1	0,0 - 7,3	23	0.04
2	7,5 - 14.5	46	0.08
3	14.6 - 21.8	68	0.12
4	21.9 - 29.0	91	0.16
5	29.1 - 36.3	114	0.20
6	36.4 - 43.6	137	0.24
7	43.7 - 50.8	160	0.28
8	50.9 - 58.1	182	0.32
9	58.2 - 65.4	205	0.36
10	65.5 - 72.6	228	0.40

Para computarmos a tensão de uma amostra de vidro é necessário aplicarmos a seguinte equação:

Para computarmos a tensão de uma amostra de vidro é necessário aplicarmos a seguinte equação:

$$\text{Tensão (psi)} = N \cdot F / e(\text{pol}) \quad (9)$$

N = ordem de fringência

F = constante de tensão do material óptico (para o vidro soda-cal = 1250 psi/fringência)

e = espessura em polegadas

De acordo com a STRAINOPTICS TECHNOLOGY(1998) , para o uso comercial de potes de vidro o valor de tensão máxima é de 1.500 psi, com retardamento até $42,0^\circ$, isto é , o número de têmpera usado para uso comercial é até nº 6(o nº máximo do analisador é 42°). O valor mínimo comercialmente usado é o nº 4 (o nº mínimo do analisador é 25°) com o valor de tensão de 800 psi.

1.3 – Fornos de recozimento

O forno de recozimento é o equipamento usado para aliviar as tensões do vidro, isto é, recozê-lo. Este tipo de equipamento pode utilizar energia elétrica ou gás natural como fonte de energia. Nas atuais indústrias vidreiras possuem uma gama enorme de tipos de Fornos de recozimento. Os mais utilizados são:

- Largura de 2,4 m com 03 zonas de aquecimento e 08 zonas de resfriamento utilizando gás natural como fonte de energia, utilizado para altas extrações de vidro e altas velocidades de produção.

- Largura de 1,8 m com 05 zonas de aquecimento e 06 zonas de resfriamento utilizando gás natural como fonte de energia, utilizado para artigos domésticos (“tableware”) (artigos com fundo acima de 10mm).

Os fornos de recozimento que utilizam energia elétrica como fonte de energia estão sendo gradativamente descartado devido o alto custo comparado ao gás natural.

O forno de recozimento que utiliza gás natural é dividido em três partes:

- zona de aquecimento (19,3% do comprimento total)
- zona de resfriamento controlado (53,7% do comprimento total)
- zona de resfriamento até a temperatura ambiente.(27% do comprimento total)

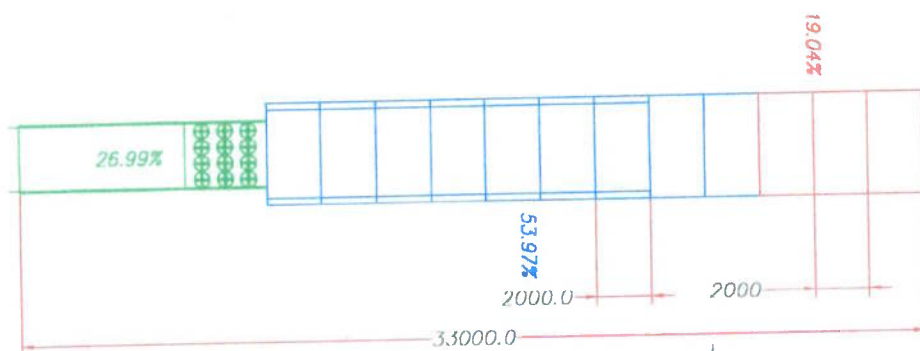


Figura 18– Partes de um forno de recozimento “DELTEC”.

O forno de recozimento a gás natural utiliza queimadores laterais para o aquecimento :

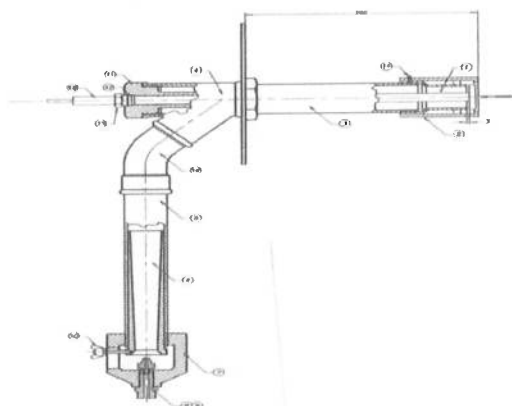


Figura 19 – Queimador lateral tipo “Cobelcomex” .

A corrente de ar aquecida é movimentada através de recirculadores homogeneizando a temperatura de cada módulo do forno de recozimento.

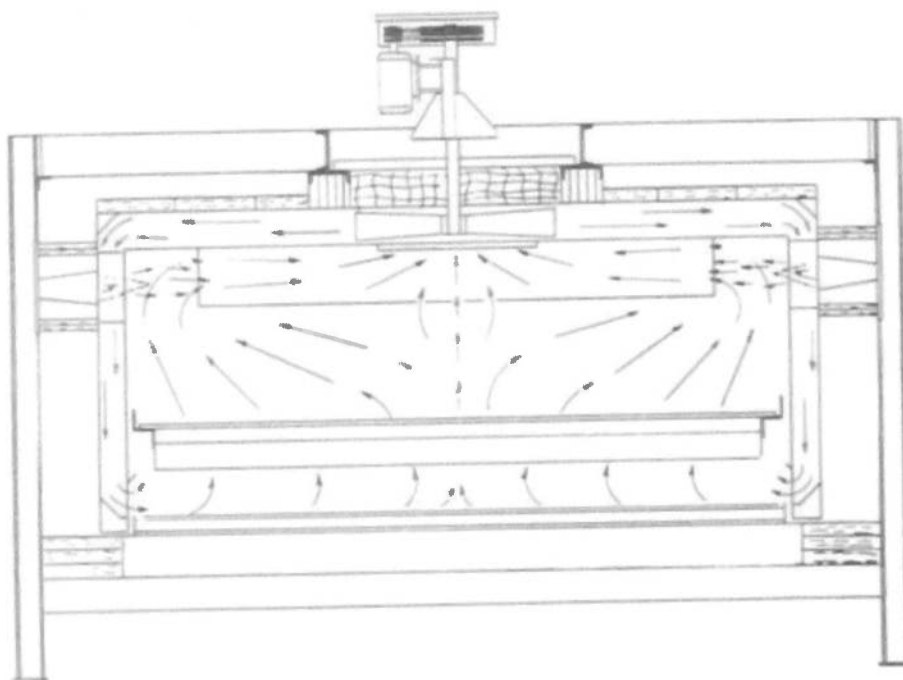


Figura 20 – Esquema de recirculação interna de aquecimento,
(TOOLEY,1984).



Figura 21 – Foto lateral de um forno de recozimento a gás natural

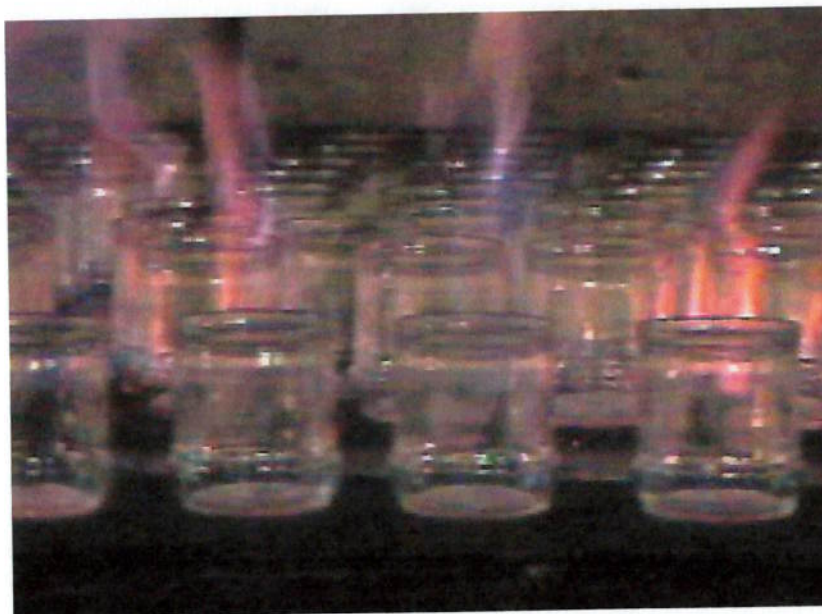


Figura 22 – Foto da entrada do artigo em vidro no forno de recozimento.

1.4 – Curvas de Recozimento

Através dos fornos de recozimento, o vidro seguirá uma curva estabelecida indo do ponto de recozimento para a temperatura ambiente. Isto ocasionará posições características diferentes na curva de aquecimento e resfriamento. Segundo TOOLEY (1984), a curva consiste em:

- 1) reaquecimento do vidro. Elevar a temperatura do vidro próximo a ponto de recozimento.
- 2) manter na temperatura fixada para equilibrar as temperaturas externas e internas do vidro.
- 3) resfriamento calculado durante o período de recozimento; do ponto de recozimento para o ponto de tensão residual que criará tensões permanentes.
- 4) resfriamento acelerado controlado do ponto de tensão até a temperatura ambiente.

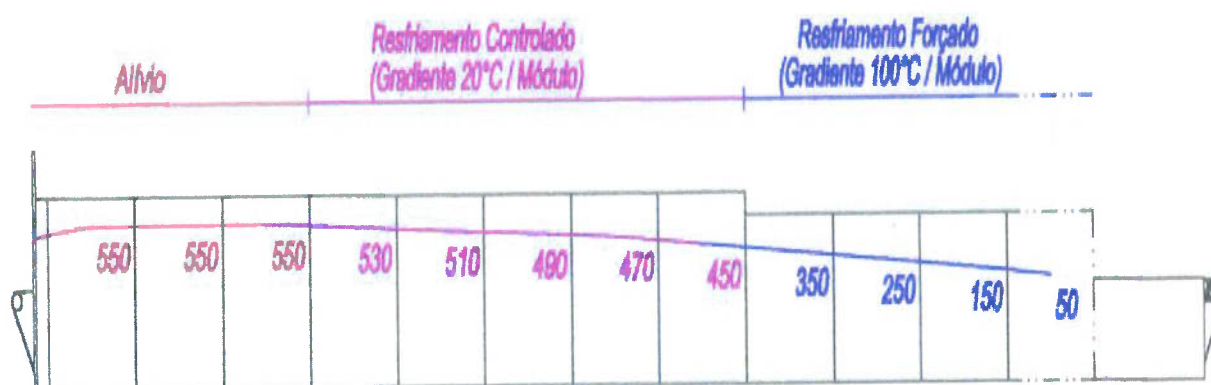


Figura 23 – Curva de recozimento padrão, (TOOLEY, 1984).

Após o artigo de vidro oco ser recozido é escolhido e embalado para ser encaminhado para o cliente. Para uma melhor compreensão simplificada do fluxo de fabricação de um artigo em vidro oco a Figura 24 mostra desde a entrada da composição até o produto embalado:

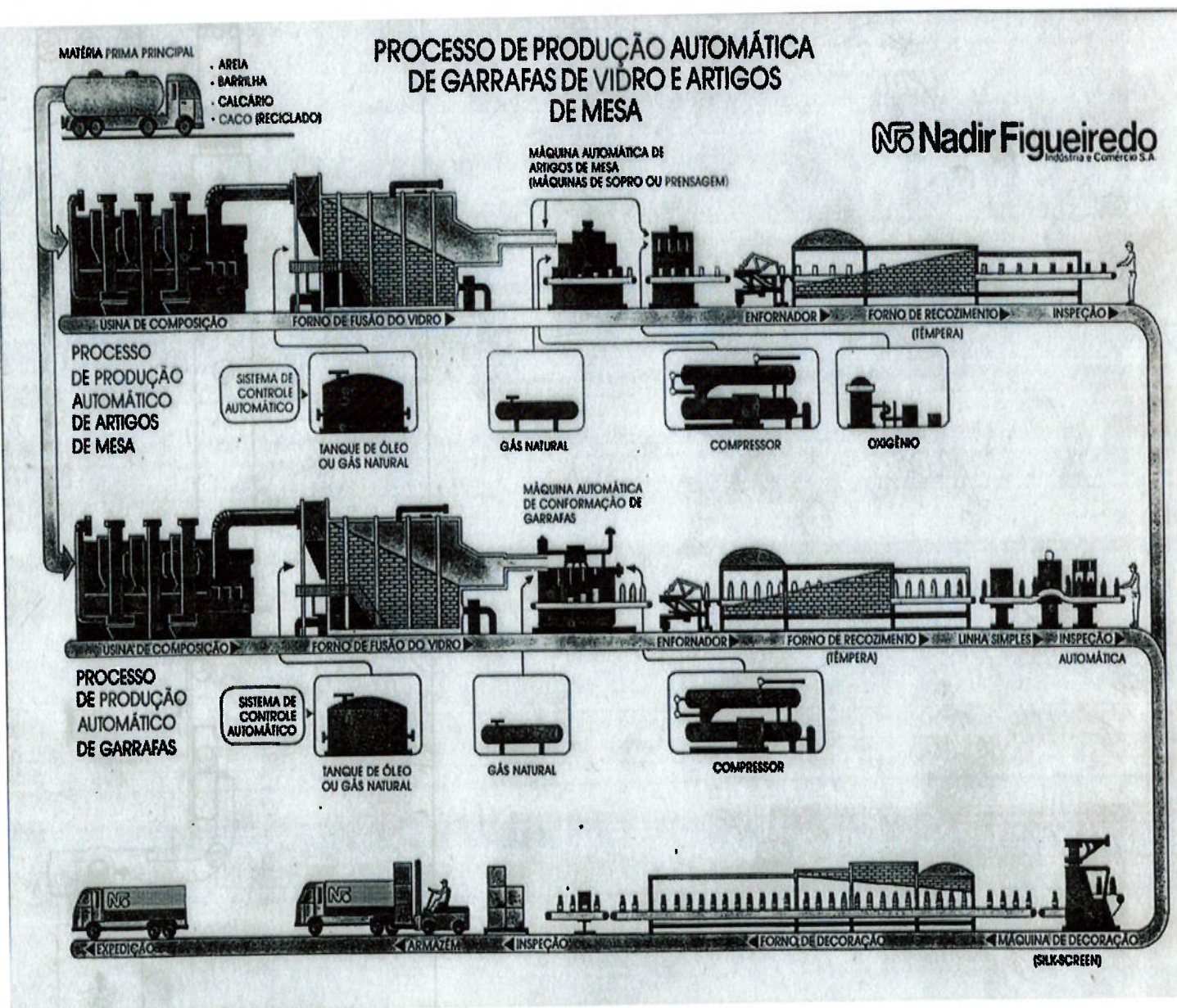


Figura 24 - Esquema simplificado do fluxo do processo de fabricação de artigos em vidro oco.

CAPÍTULO II

2.0 – Proposta do trabalho

Para o estudo da economia de energia nos fornos de recozimento para vidro, será necessária a aplicação das Técnicas da Qualidade Total, como o Delineamento de Experimento e o PDCA para verificarmos como as variáveis influenciam no grau de recozimento. Pode-se também, determinar os valores ótimos dos fatores, para torná-los mais econômicos, melhorando as características tecnológicas do grau de recozimento.

2.1 – Aplicação do Delineamento de Experimentos

Segundo CALEGARE (2001), o Delineamento de Experimentos é um processo científico com aplicação ampla em vários campos do conhecimento.

Em geral, fazemos conjecturas a respeito de um processo. Desenvolvemos experimentos para coletar dados do processo e usamos essas informações para estabelecer novas conjecturas. Novos experimentos são feitos, repetindo as operações indefinidamente, até conseguir respostas adequadas.

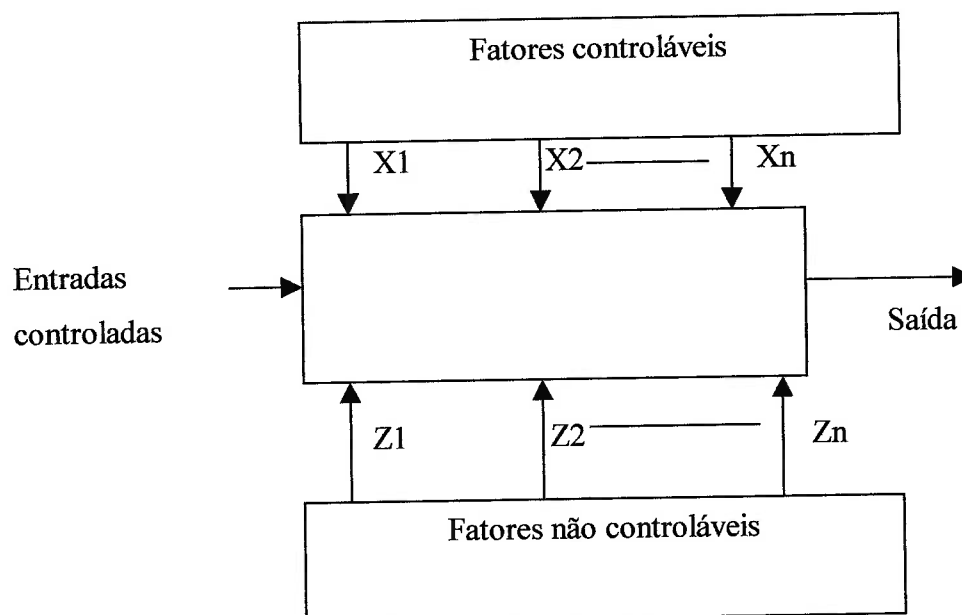


Figura 25 – Modelo geral de um processo para Delineamento de Experimentos, (CALEGARE, 2001).

2.2– Aplicação do PCDA

Obedecendo-se aos princípios da Gestão pela Qualidade Total, consideramos 4 fases nos experimentos, conforme a figura a seguir:

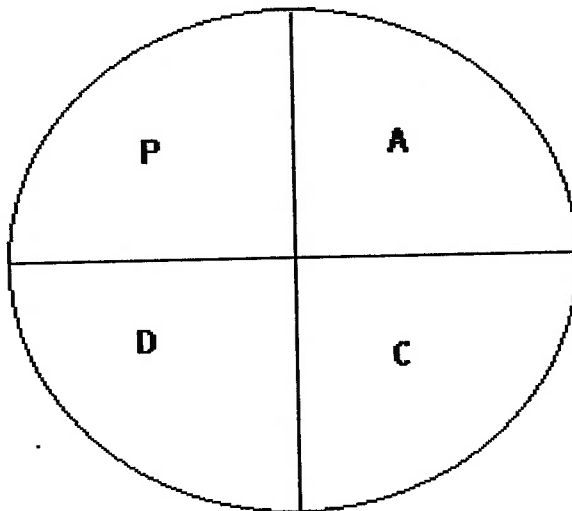


Figura 26 – Ciclo PDCA.

O PDCA é uma metodologia simples que é formado pelas iniciais:

- “PLAN” – Planejamento do experimento, conhecido pelo delineamento do experimento.
- “DO” – É a realização do experimento, de acordo com o que for planejado, com todos os requisitos para a sua realização.
- “CHECK” – Análise dos resultados obtidos no experimento. Envolve todos os estudos estatísticos e análise de variância.
- “ACT” – Ação após a análise dos resultados. Pode indicar a necessidade de novo planejamento, com novos ciclos PDCA.

2.2.1 - “PLAN” – Planejamento do experimento

A proposta do trabalho tem como objetivo atingir a economia de gás natural no forno de recozimento de aproximadamente US\$4.000,00/ano.

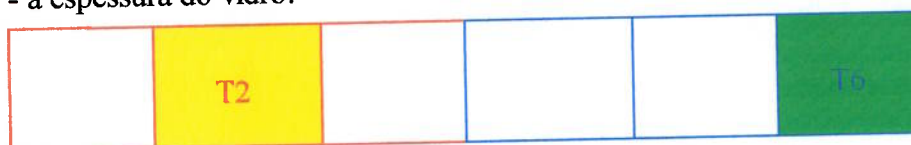
No planejamento do projeto será discriminado todas as fases do experimento.

Devemos verificar de que forma as variáveis a serem consideradas interferem no recozimento do vidro.

Os fatores controláveis do tipo Quantitativo são:

- as temperaturas de aquecimento máximo e de resfriamento forçado.(em ° C)
- a velocidade da passagem do vidro em cada zona de aquecimento e resfriamento.

- a espessura do vidro.



T2- Temperatura máxima requerida para o recozimento do artigo de vidro oco.

T6-Temperatura inicial de resfriamento controlado.

V (m/min)

E (mm)

Figura 27 – Variáveis a serem estudadas

Segundo CALEGARE (2001), os objetivos da utilização do Delineamento de Experimentos são:

- 1 - determinar se as variáveis influem no Recozimento;
- 2 - verificar as interações entre as variáveis e as suas importâncias;
- 3 - determinar os valores ótimos das variáveis controláveis, para torná-los mais econômicos, isto é, economizar energia em forma de gás natural.

O tipo de experimento realizado deverá ser do tipo 2^a fatorial. Teremos como característica, a utilização de apenas 02 níveis para cada variável.

Os tratamentos limites do experimento são:

Tabela 3 – Limites dos tratamentos.

	MAX	MIN
Variável 1 – Temperatura T2:	540° C	504° C
Variável 2 – Temperatura T6:	500° C	460° C
Variável 3 – Velocidade da esteira V:	0,74m/min	0,59m/min
Variável 4 – Espessura do vidro E:	5,0mm	3,0mm

Os valores máximos e mínimos das temperaturas T2 e T6, das velocidades e das espessuras foram definidos através dos valores que não prejudicam a eficiência de produção. No caso da temperatura T2 estar acima do limite especificado (acima do “annealing point”), pode-se marcar os produtos com o formato da esteiras. Quando a temperatura estiver abaixo do limite especificado, o artigo não será recozido, podendo posteriormente, ocorrer quebra espontânea.

Para a aplicação do Delineamento de Experimento será utilizado o programa “MINITAB Release 13” para o cálculo da análise de variância (ANOVA) do

experimento, verificando se existe influência das variáveis no recozimento do vidro e criando posteriormente, a equação para o modelo do experimento.

Será necessária a validação para verificar se o experimento foi eficaz ou não. Analisando os resultados da ANOVA, simula-se o modelo, testando-o também na prática. A equação que será gerada pelo modelo do experimento terá a sua confiabilidade verificada, através da comparação do grau de recozimento calculado de algumas amostras, com os seus graus de recozimento real.

As combinações dos tratamentos serão realizadas da seguinte forma:

Tabela 4 – Combinações dos tratamentos com datas e horários.

Teste	T2	T6	V	E	Data	Hora
1	MAX	MAX	MAX	MAX	01/04/03	11:30
2	MAX	MAX	MAX	MIN	01/04/03	
3	MIN	MAX	MAX	MAX	01/04/03	15:30
4	MIN	MAX	MAX	MIN	01/04/03	
5	MIN	MIN	MAX	MAX	01/04/03	17:45
6	MIN	MIN	MAX	MIN	01/04/03	
7	MAX	MIN	MAX	MAX	02/04/03	7:30
8	MAX	MIN	MAX	MIN	02/04/03	
9	MAX	MIN	MIN	MAX	02/04/03	11:30
10	MAX	MIN	MIN	MIN	02/04/03	
11	MAX	MAX	MIN	MAX	02/04/03	15:00
12	MAX	MAX	MIN	MIN	02/04/03	
13	MIN	MAX	MIN	MAX	02/04/03	18:00
14	MIN	MAX	MIN	MIN	02/04/03	
15	MIN	MIN	MIN	MAX	03/04/03	7:30
16	MIN	MIN	MIN	MIN	03/04/03	

Para a realização do experimento será selecionado o artigo que possui as espessuras de 5 mm no fundo e de 3 mm na parede. Os testes serão aplicados conforme a data da fabricação deste artigo. Conforme a Tabela 4, tanto as etapas, como as datas e os horários serão respeitados, pois, foram combinados anteriormente, com o chefe de produção do processo.



Figura 28 – Foto do corte da parede do artigo em vidro.



Figura 29 – Foto do artigo em vidro a ser analisado.

ORTIZ (1996), define como número de retiradas, 03 amostras para cada teste de ensaio, conforme a Norma ASTM C 224 (1996) que estabelece o seguinte

procedimento de leitura de grau de Recozimento para amostragem nos processos contínuos de fabricação de vidro:

- selecionar a amostra de um lote utilizando um procedimento consistente com o propósito da amostra.

- coletar as unidades compondo a amostra, de acordo com os princípios da amostragem aleatória, onde não podem ser retiradas todas as unidades do mesmo lado ou posição do lote.

Tabela 5 – Número mínimo de amostras de lotes –ASTM C 224 (1996).

Classificação do ensaio	Número mínimo de amostra	Frequência	Lote (numero mínimo de embalagens)
Grau de recozimento	3(as três amostras devem representar as duas posições laterais (lados) e a central do forno de recozimento)	3 horas ou menos	20

De acordo com a norma, serão retiradas as amostras pelo operador da linha nos horários e dias marcados, como verificamos na Tabela 5, para todas as fases do experimento.

A Figura 30 mostra o local da retirada das amostras no forno de recozimento. Pode-se identificar todas as fases do processo:

- A- Forno tanque;
- B- Garganta;
- C- Distribuidor;
- D- Fornecedora;
- E- Máquina I.S.;
- F- Transportadores;

G- Forno de recozimento;

H- Área fria, local da retirada das amostras R1, R2 e R3.

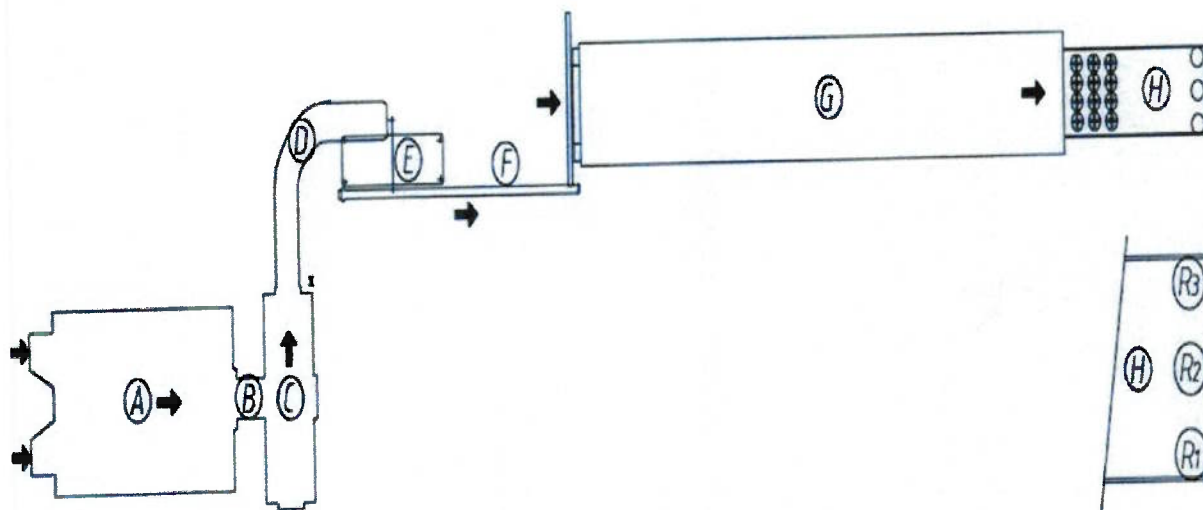


Figura 30 – Esquema que localiza a retirada das amostras R1, R2, e R3.

As leituras do grau de recozimento serão realizadas no polariscópio tipo IM - 100 do fabricante STRAINOPTIC TECHNOLOGY, pelo chefe de produção da linha para padronização das leituras, logo após a coleta das amostras.

Para o experimento, utilizar-se-á o forno de recozimento do fabricante “DELTEC” com as seguintes características:

- Largura – 2,40 m
- Tipo de aquecimento: gás natural
- Zonas de aquecimento: 03 zonas
- Energia gerada: 211.500 kcal/h

O forno de recozimento usado possui 10,5 anos de utilização. As manutenções preventivas recomendadas pelo fabricante foram todas realizadas até o presente momento de acordo com o histórico do plano de manutenções deste forno de recozimento.

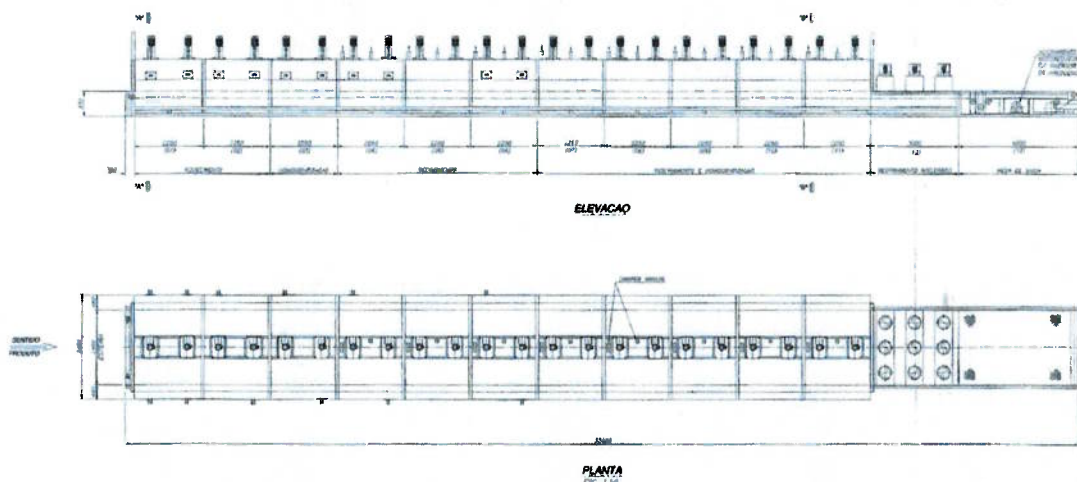


Figura 31 – Forno de recozimento “DELTEC” usado no experimento.



Figura 32 – Foto da vista lateral do forno utilizado para o teste.

Será calculada a economia de gás natural gerada pelo estudo do novo modelo do experimento proposto através do cálculo do consumo de gás natural no forno de recozimento.

Resumindo, os “seis Ms” que foram definidos no planejamento são:

- Matéria prima→ artigo em vidro oco,
- Máquina → forno de recozimento” DELTEC” de 2,4 metros de largura,
- Método→ Delineamento de Experimento,
- Medição→ grau de retardamento ótico do recozimento, espessura do vidro, temperatura da esteira, temperatura do vidro e consumo de gás natural,
- Meio-ambiente→ gás natural,
- Mão de obra→ operador da linha e o chefe de produção do processo.

2.2.2 – “DO” – Realização do Experimento

Os resultados das leituras do grau de retardamento ótico do recozimento das amostras nas datas e horários combinados foram:

Tabela 6 – Resultado das leituras do grau de recozimento das amostras.

Teste	1D	1E	R1	2D	2E	R2	3D	3E	R3
1	27.0	40.0	33.5	28.0	45.0	36.5	28.0	43.0	35.5
2	26.0	38.0	32.0	24.0	30.0	27.0	25.0	33.0	29.0
3	31.0	47.0	39.0	31.0	47.0	39.0	31.0	46.0	38.5
4	28.0	39.0	33.5	24.0	42.0	33.0	24.0	44.0	34.0
5	30.0	50.0	40.0	28.0	50.0	39.0	28.0	51.0	39.5
6	26.0	42.0	34.0	27.0	43.0	35.0	26.0	42.0	34.0
7	27.0	45.0	36.0	26.0	45.0	35.5	27.0	45.0	36.0
8	22.0	34.0	28.0	23.0	34.0	28.5	22.0	34.0	28.0
9	28.0	40.0	34.0	26.0	41.0	33.5	27.0	41.0	34.0
10	22.0	40.0	31.0	22.0	37.0	29.5	25.0	35.0	30.0
11	23.0	37.0	30.0	23.0	37.0	30.0	23.0	38.0	30.5
12	21.0	34.0	27.5	21.0	37.0	29.0	21.0	34.0	27.5
13	26.0	44.0	35.0	27.0	46.0	36.5	26.0	45.0	35.5
14	24.0	38.0	31.0	24.0	38.0	31.0	24.0	38.0	31.0
15	30.0	47.0	38.5	30.0	48.0	39.0	28.0	48.0	38.0
16	24.0	42.0	33.0	24.0	43.0	33.5	24.0	42.0	33.0

Na Tabela 6 é mostrado o resultado das médias das leituras do grau e retardamento ótico das amostras R1, R2 e R3 com as respectivas leituras no polarímetro tanto do lado direito quanto do lado esquerdo do analisador.

De acordo com o planejado, foi utilizado o polariscópio tipo IM-100 do fabricante STAINOPTIC TECHNOLOGY.



Figura 33 – Leitura do grau de recozimento, posição “zero”.



Figura 34 – Foto da posição de leitura “32.0” lado direito.

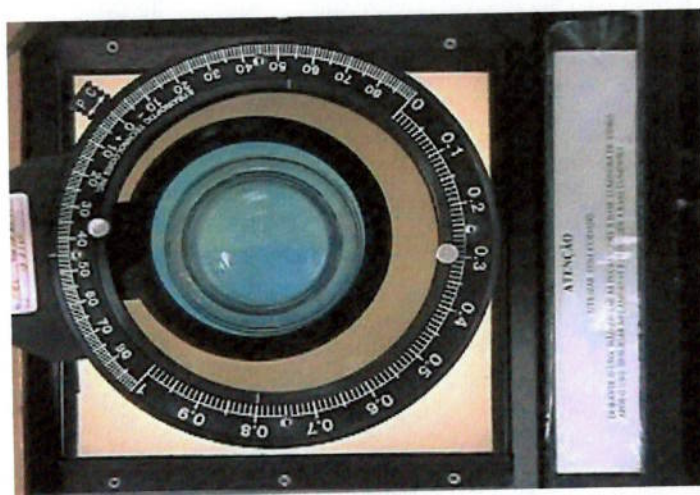


Figura 35 – Foto da posição de leitura “37.0” lado esquerdo.

Após os resultados do experimento, utilizou-se o Programa “MINITAB Release 13.3” para o “Windows 2000” na Sessão cinco: “Designing an Experiment” conforme planejado. A aplicação será passo a passo para analisar os resultados do experimento.

Tabela 7 – Matriz do Experimento.

T2	T6	V	E	R1	R2	R3	R	StdOrder	RunOrde	Blocks	CenterPt
1	1	1	1	3,35	3,65	3,55	3,51667	1	1	1	1
-1	1	1	1	3,90	3,90	3,85	3,88333	2	2	1	1
-1	-1	1	1	4,00	3,90	3,95	3,95000	3	3	1	1
1	-1	1	1	3,60	3,55	3,60	3,58333	4	4	1	1
1	-1	-1	1	3,40	3,35	3,40	3,38333	5	5	1	1
1	1	-1	1	3,00	3,00	3,05	3,01667	6	6	1	1
-1	1	-1	1	3,50	3,65	3,55	3,56667	7	7	1	1
-1	-1	-1	1	3,85	3,95	3,80	3,86667	8	8	1	1
1	1	1	-1	3,20	2,70	2,90	2,93333	9	9	1	1
-1	1	1	-1	3,35	3,30	3,40	3,35000	10	10	1	1
-1	-1	1	-1	3,40	3,50	3,40	3,43333	11	11	1	1
1	-1	1	-1	2,80	2,85	2,80	2,81667	12	12	1	1
1	-1	-1	-1	3,10	2,95	3,00	3,01667	13	13	1	1
1	1	-1	-1	2,75	2,90	2,75	2,80000	14	14	1	1
-1	1	-1	-1	3,10	3,10	3,10	3,10000	15	15	1	1
-1	-1	-1	-1	3,30	3,35	3,30	3,31667	16	16	1	1

2.2.3 – “CHECK” – Análise dos Resultados.

Após a montagem da matriz do experimento obtiveram-se os resultados do programa “MINITAB Release 13” no APÊNDICE 1.

Na análise de variância, segundo CALEGARE (2001), quando os tratamentos forem diferentes, o teste a ser utilizado será o teste “F”, (da distribuição “F” de Snedecor), porque comparar-se-á as variâncias obtidas no experimento:

- variância de regressão
- variância residual.

Após introduzirmos os dados, a primeira etapa nos mostra todos os coeficientes dos fatores e todas as interações com os seus respectivos coeficientes. É necessário definir o nível de significância segundo BREYFOGLE III (1999), que será utilizado para que o modelo tenha a precisão desejada.

No teste de hipótese deve-se considerar:

H_0 = HIPÓTESE NULA - Não existe influência dos tratamentos no grau de recozimento.

H_1 = HIPÓTESE ALTERNATIVA – Existe influência dos tratamentos no grau de recozimento.

Para o estudo em questão, definimos o nível de significância de $\alpha = 5\%$ ou $\alpha = 0,05$ por ser normalmente usado nos estudos de confiabilidade. A região de aceitação é o intervalo em que aceitamos como verdadeira; a hipótese nula e a região crítica é o intervalo em que rejeitamos a hipótese nula.



Figura 36 – Gráfico de região de aceitação ou rejeição de H_0 . (CALEGARE, 2001)

As situações que podem ocorrer num teste de hipótese para a decisão de aceitar ou rejeitar H_0 segundo BUSSAB e MORETTIN (2003) são:

Tabela 8 – Situação que podem ocorrer num teste de hipótese.

Realidade	Aceitar H_0	Rejeitar H_0
H_0 verdadeira	Decisão correta $P = 1 - \alpha$	Decisão incorreta Erro tipo I : $P = \alpha$
H_0 falsa	Decisão incorreta Erro tipo II : $P = \beta$	Decisão correta $P = 1 - \beta$

Os tipos de erro que se pode cometer quando se realiza um teste de hipótese são:

- Erro tipo I: é o erro que cometemos quando rejeitamos uma hipótese que é verdadeira. Sua probabilidade, simbolizada por α , é definida pelo nível de significância exigida no teste.

- Erro tipo II: é o erro que se comete quando se aceita como verdadeira uma hipótese que é falsa. Sua probabilidade é simbolizada por β .

O programa “Minitab 13.3” apresenta duas tabelas:

- Estimativa dos efeitos e os coeficientes para R, ou o grau de Recozimento.
- Análise de variância para o grau de Recozimento (ANOVA).

A primeira fase do programa apresenta todos os termos com os seus respectivos coeficientes, bem como o quadro da ANOVA com a interação de 4º grau, que é a interação de todas as variáveis. Nesta etapa, deve-se eliminar a interação de 4º grau (a interação das quatro variáveis), pois a soma dos quadrados desta interação é demasiadamente baixa (0,00111) em relação à soma total dos quadrados, tornando-a desprezível para o modelo. A partir da 2ª etapa, segundo MEET MINITAB (2000), apresenta-se os valores de T (valores estatísticos, para testar as hipóteses nulas de que os coeficientes são nulos), juntamente com o P (p-valor ou probabilidade de

significância ou nível descritivo, segundo BUSSAB e MORETTIN (2003)), e o surgimento de erro residual no modelo em consequência da transferência da interação de 4º grau para o erro residual. É necessário testar as hipóteses nulas que os efeitos dos tratamentos influenciam no recozimento, eliminando os tratamentos com os valores de “P” acima de 0,05, isto é, os valores acima do nível de significância estipulado. Essa eliminação, passo a passo, deve ser feita de modo a anular os valores de “P” que não correspondam à precisão estipulada. Os tratamentos com valores de “P” acima de 0,05, significa que não se pode rejeitar a hipótese nula, portanto, aceita-se a hipótese nula H_0 para estes casos. Com isso, não se pode concluir a sua influência no recozimento do vidro.

Por ordem de eliminação são:

Tabela 9 – Eliminação dos termos acima de $\alpha = 5\%$.

Termo	P
T6*V*E	0,705
T2*T^6	0,333
T2*V	0,332
T2*E	0,329
T2*T6*V	0,082
T2*T6*E	0,139
T6*E	0,058

Para a análise do nível de competência do experimento segundo BREYFOGLE III (1999) é necessário calcularmos o Coeficiente de explicação do modelo:

$$R^2 = SS_{\text{regression}} / SS_{\text{total}} \quad (10)$$

R^2 - Coeficiente de explicação do modelo

$SS_{\text{regression}}$ – soma dos quadrados devido à regressão..

SS_{total} – soma total dos quadrados

$$R^2 = 2,071110 / 2,09472 = 0,9887$$

Um alto percentual indica um bom prognóstico do experimento. Neste caso, pode-se concluir que, este experimento obteve um bom resultado, pois a percentagem do Coeficiente de explicação do modelo foi de **98,87%**. As variáveis que possuem maior nível de efeito no recozimento são a espessura E de forma direta e T2 de forma inversa, de acordo com a figura A3 do **APÊNDICE 1**.

O resultado também demonstrou que, as variáveis isoladas e com as suas respectivas interações possuindo maiores influências (em ordem decrescente) no recozimento são:

- Espessura com 47,7%
- T2 com 34,5%
- Velocidade com 5,8%
- T6 com 4,3%
- A interação entre T6 e a Velocidade com 3,0%
- A interação entre Velocidade e Espessura com 1,9%
- A interação entre T2, Velocidade e Espessura com 1,6%

As interações entre as variáveis são apresentadas na figura A1 do **APÊNDICE 1**, onde T2 possui pequena ou nenhuma interação com as demais variáveis.

Com o resultado obtido podemos montar a seguinte equação:

$$R = (3,3458 - T2*0,2125 - T6*0,075 + V*0,0875 + 0,25*E + 0,0625*T6*V + 0,05*V*E + 0,0458*T2*V*E) * 10 \quad (11)$$

Para utilizarmos a equação é necessário transformarmos os valores de T2, T6, V e E para a escala de -1 a +1 conforme a tabela a seguir:

Tabela 8 - Valores de transformação de escala

	Escala	
Valores	+1	-1
T2 (°C)	540	504
T6 (°C)	500	460
V(m/min)	0,74	0,59
E (mm)	5,0	3,0

2.2.3.1 – Cálculo de economia de energia.

Segundo CARO(2003), no cálculo de economia de energia deve-se utilizar os produtos mais fabricados na linha de produção (informação verbal). O grau de retardamento está dentro da faixa comercialmente recomendada para artigos de embalagem de vidro oco que se encontra entre 30,0° e 36,0°(número de têmpera entre 4 e 5). Para o cálculo da economia de energia utilizaremos 9.400 kcal/m³ (poder calorífico do gás natural) com o custo de R\$ 0,5754/m³ ou US\$ 0,1984 /m³ conforme dado fornecido pela COMGÁS (2003).

Estudaremos 03 casos entre produtos diferentes a seguir:

- Produto 0001

Grau de recozimento especificado : R=33,0

Temperatura da zona nº 6: T6=490° C

Velocidade de esteira: V=0,579m/min

Espessura máxima do artigo: E= 4mm

Valores transformados na escala (-1 ,+1)

T6= 0,5

$$V = -1,26667$$

$$E = 0$$

Resultado de T2 = -0,6687

Transformação do valor de T2 calculado (valor ideal): **510,63 ° C**

Cálculo da energia requerida para recozer o produto 0001 utilizando T2 do SET-UP atual:

Peso da esteira (kg/min) = 32,28

Peças por minuto (velocidade de produção): 150

Peso do produto(g): 260

Peso de vidro por min (kg/min) : 39

Temperatura do SET-UP (° C) = 540

Temperatura do artigo na entrada do forno de recozimento (°C) = 480

Temperatura da esteira na entrada do forno de recozimento (°C) = 240

Energia requerida para aquecer a esteira (kcal/min) = 1346,27 (93,88 KW/hora)

Energia requerida para aquecer o vidro (kcal/min) = 585 (40,79 KW/hora)

Energia total requerida para o aquecimento (kcal/min) = 2.160,05 (150,62 KW/hora)

Consumo de gás natural (m³/hora) = 13,78

Cálculo energia requerida para recozer o produto 0001 utilizando para T2 calculado:

Energia requerida para aquecer a esteira (kcal/min) = 1.214,47 (84,68 KW/hora)

Energia requerida para aquecer o vidro (kcal/min) = 298,65 (20,82 KW/hora)

Energia total requerida para o aquecimento (kcal/min) = 1.741,90 (121,46 KW/hora)

Consumo de gás natural (m³/hora) = 11,12

Economia de gás natural por dia (m³/dia) = 63,87

Economia de gás natural por ano (m³/ano) = 23.314,64

Custo economizado anualmente (US\$/ano):4.625,62

- Produto 0002

Grau de recozimento especificado : $R=36,0$

Temperatura da zona nº 6: $T_6=460^\circ \text{C}$

Velocidade de esteira: $V=0,66\text{m/min}$

Espessura máxima do artigo: $E= 5\text{mm}$

Valores transformados na escala (-1 ,+1):

$$T_6= -1,0000$$

$$V= -0,0667$$

$$E= 1,0000$$

Resultado de $T_2 = 0,3052$

Transformação do valor de T_2 calculado(valor ideal): **$527,18^\circ \text{C}$**

Cálculo da energia requerida para recozer o produto 0002 utilizando T_2 do SET-UP atual:

Peso da esteira (kg/min) = 37,38

Peças por minuto (velocidade de produção): 150

Peso do produto(g): 260

Peso de vidro por min (kg/min) : 39

Temperatura do SET-UP ($^\circ \text{C}$) = 550

Temperatura do artigo na entrada do forno de recozimento ($^\circ \text{C}$) = 497

Temperatura da esteira na entrada do forno de recozimento ($^\circ \text{C}$) = 228

Energia requerida para aquecer a esteira (kcal/min) = 1.673,05 (116,66 KW/hora)

Energia requerida para aquecer o vidro (kcal/min) = 516,75 (36,03 KW/hora)

Energia total requerida para o aquecimento (kcal/min) = 2.418,58 (168,65 KW/hora)

Consumo de gás natural (m^3/hora) = 15,43

Cálculo energia requerida para recozer o produto 0002 utilizando para T_2 calculado:

Energia requerida para aquecer a esteira (kcal/min) = 1.554,48 (108,39 KW/hora)

Energia requerida para aquecer o vidro (kcal/min) = 294,25 (20,51 KW/hora)

Energia total requerida para o aquecimento (kcal/min) = 2.077,51 (144,87 KW/hora)

Consumo de gás natural (m³/hora) = 13,26

Economia de gás natural por dia (m³/dia) = 52,06

Economia de gás natural por ano (m³/ano) = 19.002,76

Custo economizado anualmente (US\$/ano): 3.775,85

- Produto 0003

Grau de recozimento especificado : R=36,0

Temperatura da zona nº 6: T6=460° C

Velocidade de esteira: V=0,56m/min

Espessura máxima do artigo: E= 4,0mm

Valores transformados na escala (-1 ,+1):

T6= -1,0000

V= -1,4000

E= 0

Resultado de T2 = -1,008

Transformação do valor de T2 calculado : **504,864 ° C**

Cálculo da energia requerida para recozer o produto 0003 utilizando T2 do SET-UP atual:

Peso da esteira (kg/min) = 31,7184

Peças por minuto (velocidade de produção): 133

Peso do produto(g): 285

Peso de vidro por min (kg/min) : 37,90

Temperatura do SET-UP (° C) = 540

Temperatura do artigo na entrada do forno de recozimento (°C) = 480

Temperatura da esteira na entrada do forno de recozimento (°C) = 210

Energia requerida para aquecer a esteira (kcal/min) = 1.454,53 (101,41 KW/hora)

Energia requerida para aquecer o vidro (kcal/min) = 568,50 (39,64 KW/hora)

Energia total requerida para o aquecimento (kcal/min) = 2.251,81 (157,02 KW/hora)

Consumo de gás natural (m³/hora) = 14,37

Cálculo energia requerida para recozer o produto 0003 utilizando para T2 calculado:

Energia requerida para aquecer a esteira (kcal/min) = 1.299,65 (90,62 KW/hora)

Energia requerida para aquecer o vidro (kcal/min) = 235,54 (16,42 KW/hora)

Energia total requerida para o aquecimento (kcal/min) = 1.763.97 (123,00 KW/hora)

Consumo de gás natural (m³/hora) = 11,25

Economia de gás natural por dia (m³/dia) = 74.653

Economia de gás natural por ano (m³/ano) = 27.248,52

Custo economizado anualmente (US\$/ano):5.414,28

Aplicando-se o modelo em todos os produtos a serem recozidos neste forno de recozimento, haverá uma economia entre US\$ 3.770,00 e US\$ 5.400,00 por ano.

2.2.3.2 – Validação do modelo.

Conforme sugestão de CARO (2003), para a validação do modelo é necessário testá-lo, comparando o resultado do modelo com o valor real, para isso, será verificado com diferentes espessuras, com diferentes condições de temperaturas T2 e T6 e diferentes velocidades da esteira do forno de recozimento (informação verbal). Nas medições de espessura o dispositivo empregado para verificação de espessura foi da marca “PANAMETRICS”, modelo Magna Mike 8000, com a esfera de 3/16 “ medindo até 6,35mm de espessura. Acima desta espessura foi utilizado o medidor da marca ”KOREI SEIKI “que mede até 15mm.

As diferentes condições utilizadas são demonstradas na Tabela 11:

Tabela 11 – Condições com as respectivas variáveis.

Condição A:

Variável	Valor Real	Valor transformado
T2 (° C)	549	+1,500
T6 (° C)	503	+1,150
V (m/min)	0,549	-1,540

Condição B:

Variável	Valor Real	Valor transformado
T2 (° C)	550	+1,555
T6 (° C)	489	+0,450
V (m/min)	0,549	-1,540

Condição C:

Variável	Valor Real	Valor transformado
T2 (° C)	529	+0,388
T6 (° C)	467	-0,850
V (m/min)	0,70	+0,466

Condição D:

Variável	Valor Real	Valor transformado
T2 (° C)	523	+0,055
T6 (° C)	450	-1,500
V (m/min)	0,69	+0,333

Condição E:

Variável	Valor Real	Valor transformado
T2 (° C)	540	+1,000
T6 (° C)	483	+0,150
V (m/min)	0,698	+0,440

Aplicando essas condições nas seguintes espessuras obtivemos o seguinte:

Tabela 12 – Resultado da verificação do erro do modelo X real

Espessura (mm)	Condição	R calculado	R real	Erro (%) = $\frac{R_{cal}-R_{real}}{R_{real}} * 100$
1,6	A	25,3	22,0	15,0
2,9	A	26,2	27,0	2,96
3,5	B	28,6	28,0	2,14
3,7	D	33,6	34,0	1,18
3,8	D	30,5	30,5	0,28
4,5	E	33,1	33,0	0,3
4,7	C	35,3	35,0	0,85
4,9	D	37,1	37,0	0,3
6,0	B	29,2	29,0	0,7
7,0	B	29,9	31,0	3,55
7,5	B	30,2	32,0	5,47
7,7	B	30,4	32,0	5,0
15,0	B	35,0	39,0	10,26

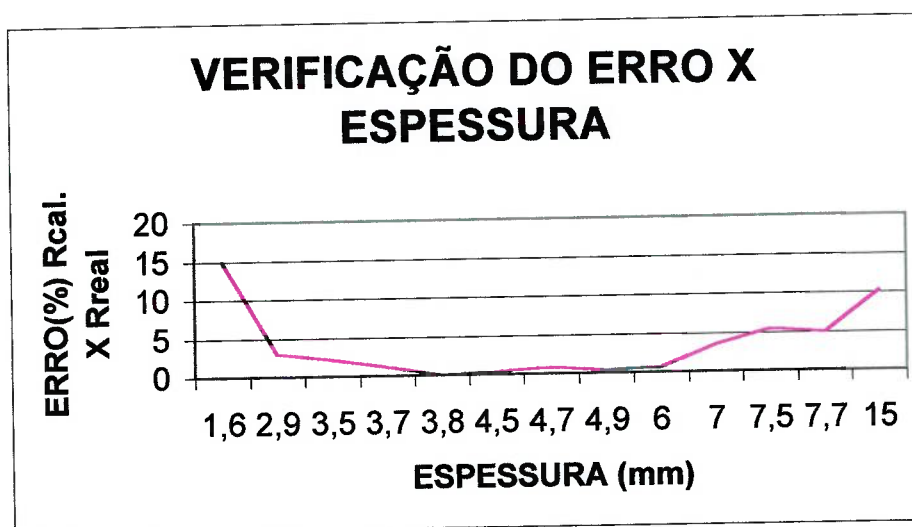


Figura 37 – Gráfico de verificação do Erro (%) X Espessura (mm)

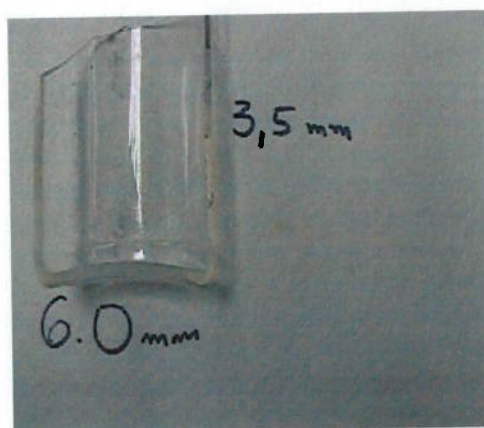


Figura 38- Foto da amostra usada para análise da verificação do erro do modelo.



Figura 39 – Foto do dispositivo para verificação de espessura “PANAMETRICS”, modelo Magna Mike 8000 com a esfera de 3/16 “.



Figura 40 – Foto do medidor de espessura marca “KOEI SEIKI” para medições até 15mm.

De acordo com os resultados da verificação do modelo podemos concluir que o mesmo possui uma grande confiabilidade entre as espessuras de 3,5mm e 6,0mm, podendo assim ser bem aplicável dentro dos limites das variáveis do experimento.

2.2.3.3– Energia consumida nos forno de recozimento.

Segundo GUTIÉRREZ (1981), para calcular a energia necessária no processo de recozimento do vidro no forno de recozimento é preciso calcular a energia requerida para atingir a temperatura especificada no vidro e na esteira de aço inox(em fase de elaboração).

A energia requerida para aquecer o vidro até a temperatura de aquecimento próximo ao ponto de recozimento calcula-se da seguinte forma:

E.V .- Energia requerida para aquecer o vidro (kcal/min)

T.^a - Temperatura de aquecimento próximo a ponto de recozimento (°C)

T.V. -Temperatura do vidro no momento da entrada no forno de recozimento (°C)

A temperatura do artigo, conforme medições, pode variar de 480°C a 520°C, dependendo da velocidade de produção e da massa do artigo. De acordo com VERRATI (1998), para a medição da temperatura será necessária a utilização de um sistema infravermelho do tipo radiômetro empregando emissividade para vidro soda-cal na forma rígida de 0,85 (informação pessoal). O equipamento usado é da marca “RAYTEK” modelo “RAYNGER PM” com faixa espectral selecionada entre 8 e 14 microns. Para baixas temperaturas do vidro (até 800°C) são recomendadas a utilização de radiômetros com esta faixa espectral entre 8 e 14 microns.



Figura 41 – Foto da leitura da temperatura do vidro antes de entrar no forno de recozimento utilizando um sistema infravermelho do tipo radiômetro com emissividade de 0,85.

M.V.-Quantidade de massa de vidro (kg/min)

$$E.V. = (T. ^a - T.V.) * M.V. * 0,25 (\text{Calor Específico do vidro})$$

$$E.V. (\text{BTU/hora}) = E.V. (\text{kcal/min}) * 60 / 0,252$$

$$E.V. (\text{KW/hora}) = E.V. (\text{BTU/hora}) * 0,00029288 \quad (12)$$

A energia requerida para aquecer a esteira (para não ocasionar choque térmico no vidro) calcula-se da seguinte forma:

E.E.- Energia requerida para aquecer a esteira (kcal/min)

T.E.- Temperatura da esteira no momento da entrada no forno de recozimento. No caso da esteira, retornando pela parte externa, a temperatura antes da entrada no forno atinge a temperatura ambiente (em torno de 40°C). Neste caso, são instaladas 02 flautas de gás para proporcionar um pré-aquecimento, evitando assim, o choque térmico no vidro. A temperatura após a passagem pelas 02 flautas atinge entre 200° e 260°. Esta variação é decorrente da velocidade da esteira. Para certificarmos a temperatura exata utilizamos um sistema infravermelho do tipo radiômetro (°C). Segundo VERATTI (1998) para aços com alta oxidação a emissividade utilizada varia entre 0,82 a 0,94 (informação pessoal). No experimento será utilizada a emissividade de 0,90 para a esteira devido a sua alta oxidação decorrente da alta temperatura sofrida durante o processo de recozimento do vidro.



Figura 42 – Foto da esteira retornando pela parte externa do forno.



Figura 43 – Foto da 1ª flauta de aquecimento da esteira



Figura 44 – Foto da 2ª flauta de aquecimento



Figura 45 – Foto da leitura da temperatura da esteira no momento da entrada no forno de recozimento antes da 2ª flauta de aquecimento utilizando um radiômetro com emissividade de 0,90.



Figura 46 – Foto da leitura da temperatura da esteira após a 2ª flauta de aquecimento utilizando um radiômetro com emissividade de 0,90.



Figura 47 – Foto do sistema infravermelho do tipo radiômetro marca “RAYEC” modelo “Raynger PM” para leitura até 700°C (medidor para verificar temperatura do vidro e da esteira no momento da entrada no forno de recozimento)

M.E.- Para se calcular a massa da esteira por minuto devemos considerar a largura da esteira (no nosso caso 2,40m), o tipo da esteira (neste caso utilizaremos o tipo B-36-20 – 23kg/m²) e a velocidade da esteira para podermos obter em kg/min de massa da liga da esteira.

$$E.E. = (T.^a - T.E.) * M.E. * 0,139 \text{ (Calor específico da liga metálica da esteira)}$$

$$E.E. \text{ (BTU/hora)} = E.E. \text{ (kcal/min)} * 60 / 0,252$$

$$E.E. \text{ (KW/hora)} = E.E. \text{ (BTU/hora)} * 0,00029288 \quad (13)$$

Para calcularmos a Energia Total requerida (E.T.) é necessário calcular a perda de energia dissipada por irradiação no forno de recozimento. Essa perda de energia calculada é fornecida pelo fabricante de fornos de recozimento “DELTEC” onde existe a perda de energia por parede de 600kcal/m² /hora nas temperaturas entre 500°C e 600°C, totalizando 13.726,8 kcal/hora ou 228,78 kcal/min (15,95 KW/hora) de perda de energia por módulo.

$$E.T. = E.V. + E.E + 228,78 \text{ (kcal/min)}$$

$$E.T.(\text{BTU/hora}) = E.T.(\text{kcal/min}) * 60 / 0,252$$

$$E.T.(\text{KW/hora}) = E.T.(\text{BTU/hora}) * 0,00029288 \quad (14)$$

Para o cálculo do consumo atual do forno de recozimento que iremos utilizar para o nosso estudo será do fabricante DELTEC : largura 2,40 m com a utilização de gás natural com 03 zonas de aquecimento possuindo 02 queimadores em cada zona do tipo “venturi” onde a vazão máxima é de 3,4m³/h por cada queimador.

2.2.3.4– Verificação da confiabilidade do cálculo do consumo de energia no forno de recozimento

De acordo com a sugestão de SOUZA (2003), será realizada a validação do cálculo do consumo, medindo o consumo de gás natural em relação às temperaturas utilizadas (informação verbal). É necessário servir-se-á de um medidor de vazão para certificarmos o consumo de gás natural nas diferentes temperaturas. As condições do forno de recozimento no momento da coleta dos dados:

- peças por minuto (velocidade de produção): 150;
- peso da esteira (kg/min) = 37, 38;
- peso do produto(g): 260, peso de vidro por min (kg/min): 39;
- temperatura do artigo na entrada do forno de recozimento (°C) = 497;
- temperatura da esteira na entrada do forno de recozimento (°C) = 228.

Tabela 13 – Valores do consumo de gás natural X Temperatura utilizada.

Temperatura (°C)	Consumo de Gás Natural (m³/hora)	Data e hora do início da leitura	Número do relógio no início da leitura	Data e hora do término da leitura	Número do relógio no término da leitura
540	14,01	09/06/03 9:37	155.431,76	10/06/03 10:00	155.773,37
525	13,58	11/06/03 10:00	156.099,29	12/06/03 10:00	156.425,21
520	13,46	12/06/03 17:00	156.519,71	13/06/03 17:00	156.842,75
515	13,38	16/06/03 08:00	157.685,69	17/06/03 09:00	158.020,19
510	11,94	18/06/03 09:00	158.308,19	19/06/03 09:00	158.594,75
505	10,95	19/06/03 17:00	158.686,75	20/06/03 18:00	158.960,50

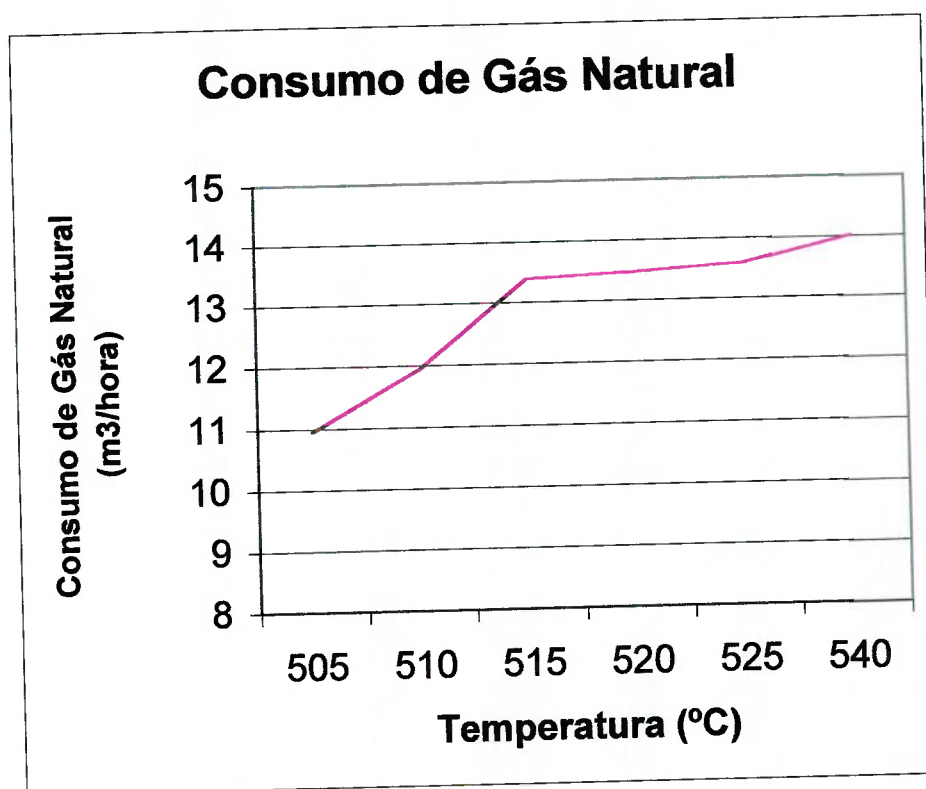


Figura 48 – Gráfico do consumo de gás natural X temperatura utilizada.

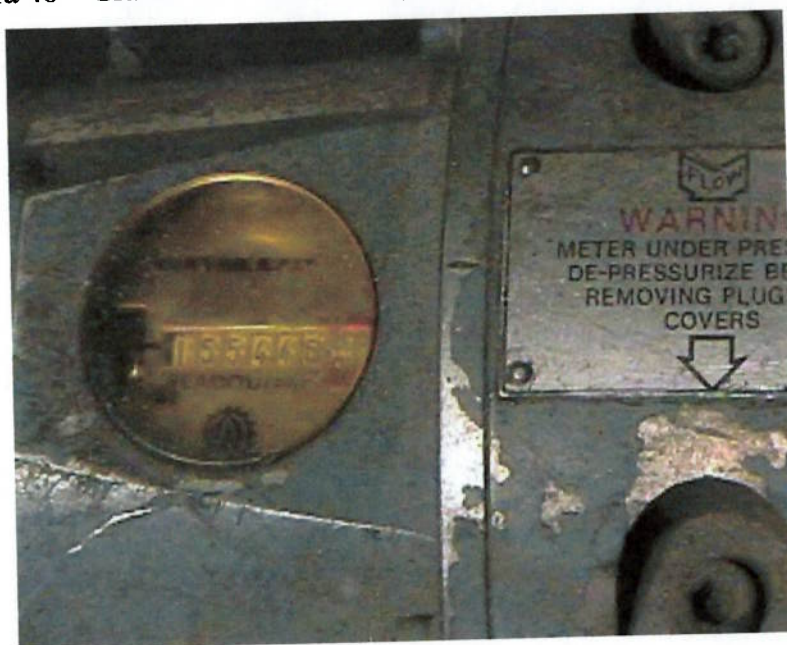


Figura 49 – Foto do relógio de marcação do consumo de gás natural.



Figura 50 – Foto do medidor com capacidade de 1,5m³ a 30,0 m³.



Figura 51 – Foto do medidor de vazão instalado para leitura do consumo de gás natural.

Comparando-se os resultados do estudo de economia verifica-se o consumo calculado X consumo real:

Tabela 14 – Resultado da verificação do erro entre o consumo calculado e o consumo real.

Temperatura (°C)	Consumo real (m³/hora)	Consumo calculado (m³/hora)	Erro%: $\left \frac{\text{Cons.real} - \text{Cons.calc.}}{\text{Cons.real}} \right * 100$
540	14,01	14,48	3,35
525	13,58	13,05	3,90
520	13,46	12,57	10,11
515	13,38	12,09	9,64
510	11,94	11,62	2,68
505	10,95	11,14	1,73

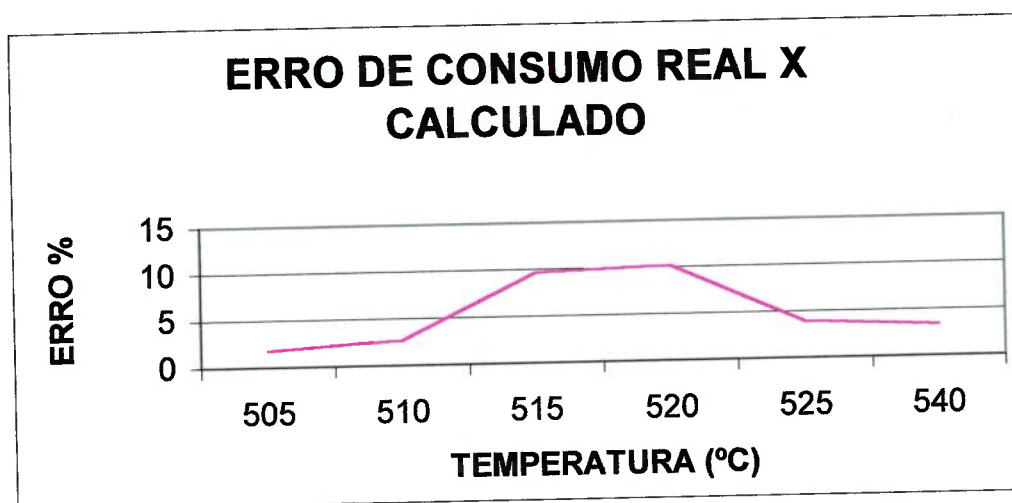


Figura 52 – Gráfico do erro de consumo real X calculado.

Pelos resultados pode-se concluir que os cálculos de consumo de gás natural possuem grande confiabilidade nas temperaturas abaixo de 510°C, sendo a faixa de temperatura desejada para o estudo da economia.

2.2.4– “ACT” – Aplicação do resultado do experimento em prática.

A validação do modelo do experimento realizado e a verificação da confiabilidade do cálculo do consumo de gás natural no forno de recozimento mostraram que a proposta apresentada no planejamento de economia foi atingida. Portanto, o modelo será implantado no processo, alterando o manual de instrução de “Recozimento do vidro” neste forno de recozimento para todos os produtos nele recozidos. Realizar-se-á treinamento para todos os envolvidos como chefes e operadores da linha de produção.

Novos experimentos em outros 09 fornos de recozimento serão planejados com o mesmo “PDCA”, com o objetivo de atingir a mesma eficácia do modelo aplicado, com a expectativa de alcançar um potencial de economia de até US\$ 50.000,00/ano.

CONCLUSÃO

A energia requerida no processo de recozimento dos produtos em vidro oco pode ser otimizada através da aplicação do Delineamento de Experimentos, como foi demonstrado neste trabalho. Para a realização do estudo é necessário definir as variáveis a serem consideradas, planejar o experimento de acordo com as quatro fases da Gestão pela Qualidade Total (PDCA), e os conceitos da ferramenta proposta, analisar os resultados e validá-los, verificando-os na prática. O resultado do modelo proposto oferece grande confiabilidade devido ao Coeficiente de explicação do modelo ter atingido um percentual de 98,87%. Pode-se concluir, que as variáveis que mais influenciam no grau de recozimento são a espessura do artigo (47,7%) e a temperatura máxima de aquecimento (34,5%). A equação gerada pelo estudo oferece condições para calcular qual a temperatura máxima que deverá ser utilizada, através da atribuição do grau de recozimento desejado. Após o estudo de 03 produtos chegou-se à possibilidade de uma economia de aproximadamente até US\$ 5.000,00/ ano neste forno de recozimento. A confiabilidade da equação foi acurada, verificando-se o erro entre o grau de recozimento calculado e o grau de recozimento real de diferentes espessuras. Os consumos de gás natural calculado para diferentes temperaturas foram comparados aos consumos do forno, utilizando-se um medidor de vazão. Pode-se concluir que os valores calculados aproximam-se aos valores reais, principalmente, abaixo de 510°C de temperatura. Tratando-se de um processo contínuo e com grande repetibilidade, é de grande importância a aplicação para a economia de energia, principalmente, se for estendido a outros nove fornos de recozimento. No entanto, devido as diferentes características como, tamanho, largura, situação dos termopares de leitura das temperaturas, etc. deve-se criar um modelo próprio para cada forno de recozimento, estimando-se a economia de aproximadamente US\$50.000,00 anuais. Para a aplicação efetiva deste procedimento é necessário treinar todos os envolvidos no processo e alterar o procedimento de instrução de “Recozimento do vidro”. Em decorrência deste trabalho, outros experimentos poderão ser realizados, utilizando as espessuras acima de 15 milímetros. Aplicando-se em produtos domésticos como copos de fundo grossos e taças, nos quais o recozimento nestes produtos é mais trabalhoso.

APÊNDICE 1

Welcome to Minitab, press F1 for help.

Fractional Factorial Fit: R versus T2; T6; V; E

Estimated Effects and Coefficients for R (coded units)

Term	Effect	Coef
Constant		3,3458
T2	-0,4250	-0,2125
T6	-0,1500	-0,0750
V	0,1750	0,0875
E	0,5000	0,2500
T2*T6	0,0167	0,0083
T2*V	-0,0167	-0,0083
T2*E	-0,0167	-0,0083
T6*V	0,1250	0,0625
T6*E	-0,0500	-0,0250
V*E	0,1000	0,0500
T2*T6*V	0,0333	0,0167
T2*T6*E	-0,0333	-0,0167
T2*V*E	0,0917	0,0458
T6*V*E	0,0083	0,0042
T2*T6*V*E	-0,0167	-0,0083

Analysis of Variance for R (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS
F P				
Main Effects	4	1,93500	1,93500	0,483750
* *				
2-Way Interactions	6	0,11583	0,11583	0,019306
* *				
3-Way Interactions	4	0,04278	0,04278	0,010694
* *				
4-Way Interactions	1	0,00111	0,00111	0,001111
* *				
Residual Error	0	0,00000	0,00000	0,000000
Total	15	2,09472		
Alias Structure				
I				
T2				
T6				
V				
E				
T2*T6				
T2*V				

T2*E
 T6*V
 T6*E
 V*E
 T2*T6*V
 T2*T6*E
 T2*V*E
 T6*V*E
 T2*T6*V*E

Fractional Factorial Fit: R versus T2; T6; V; E

Estimated Effects and Coefficients for R (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		3,3458	0,008333	401,50	0,002
T2	-0,4250	-0,2125	0,008333	-25,50	0,025
T6	-0,1500	-0,0750	0,008333	-9,00	0,070
V	0,1750	0,0875	0,008333	10,50	0,060
E	0,5000	0,2500	0,008333	30,00	0,021
T2*T6	0,0167	0,0083	0,008333	1,00	0,500
T2*V	-0,0167	-0,0083	0,008333	-1,00	0,500
T2*E	-0,0167	-0,0083	0,008333	-1,00	0,500
T6*V	0,1250	0,0625	0,008333	7,50	0,084
T6*E	-0,0500	-0,0250	0,008333	-3,00	0,205
V*E	0,1000	0,0500	0,008333	6,00	0,105
T2*T6*V	0,0333	0,0167	0,008333	2,00	0,295
T2*T6*E	-0,0333	-0,0167	0,008333	-2,00	0,295
T2*V*E	0,0917	0,0458	0,008333	5,50	0,114
T6*V*E	0,0083	0,0042	0,008333	0,50	0,705

Analysis of Variance for R (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS
F P				
Main Effects	4	1,93500	1,93500	0,483750
435,37 0,036				
2-Way Interactions	6	0,11583	0,11583	0,019306
17,37 0,182				
3-Way Interactions	4	0,04278	0,04278	0,010694
9,62 0,237				
Residual Error	1	0,00111	0,00111	0,001111
Total	15	2,09472		

Alias Structure

I
 T2
 T6
 V
 E
 T2*T6
 T2*V
 T2*E
 T6*V
 T6*E
 V*E
 T2*T6*V
 T2*T6*E
 T2*V*E
 T6*V*E

Fractional Factorial Fit: R versus T2; T6; V; E

Estimated Effects and Coefficients for R (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		3,3458	0,006588	507,86	0,000
T2	-0,4250	-0,2125	0,006588	-32,26	0,001
T6	-0,1500	-0,0750	0,006588	-11,38	0,008
V	0,1750	0,0875	0,006588	13,28	0,006
E	0,5000	0,2500	0,006588	37,95	0,001
T2*T6	0,0167	0,0083	0,006588	1,26	0,333
T2*V	-0,0167	-0,0083	0,006588	-1,26	0,333
T2*E	-0,0167	-0,0083	0,006588	-1,26	0,333
T6*V	0,1250	0,0625	0,006588	9,49	0,011
T6*E	-0,0500	-0,0250	0,006588	-3,79	0,063
V*E	0,1000	0,0500	0,006588	7,59	0,017
T2*T6*V	0,0333	0,0167	0,006588	2,53	0,127
T2*T6*E	-0,0333	-0,0167	0,006588	-2,53	0,127
T2*V*E	0,0917	0,0458	0,006588	6,96	0,020

Analysis of Variance for R (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS
F P				
Main Effects	4	1,93500	1,93500	0,483750
696,60 0,001				
2-Way Interactions	6	0,11583	0,11583	0,019306
27,80 0,035				
3-Way Interactions	3	0,04250	0,04250	0,014167
20,40 0,047				
Residual Error	2	0,00139	0,00139	0,000694
Total	15	2,09472		

Alias Structure

I
 T2
 T6
 V
 E
 T2*T6
 T2*V
 T2*E
 T6*V
 T6*E
 V*E
 T2*T6*V
 T2*T6*E
 T2*V*E

Fractional Factorial Fit: R versus T2; T6; V; E

Estimated Effects and Coefficients for R (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		3,3458	0,007217	463,61	0,000
T2	-0,4250	-0,2125	0,007217	-29,44	0,000
T6	-0,1500	-0,0750	0,007217	-10,39	0,002
V	0,1750	0,0875	0,007217	12,12	0,001
E	0,5000	0,2500	0,007217	34,64	0,000
T2*V	-0,0167	-0,0083	0,007217	-1,15	0,332
T2*E	-0,0167	-0,0083	0,007217	-1,15	0,332
T6*V	0,1250	0,0625	0,007217	8,66	0,003
T6*E	-0,0500	-0,0250	0,007217	-3,46	0,041
V*E	0,1000	0,0500	0,007217	6,93	0,006
T2*T6*V	0,0333	0,0167	0,007217	2,31	0,104
T2*T6*E	-0,0333	-0,0167	0,007217	-2,31	0,104
T2*V*E	0,0917	0,0458	0,007217	6,35	0,008

Analysis of Variance for R (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS
F P				
Main Effects	4	1,93500	1,93500	0,483750
580,50 0,000				
2-Way Interactions	5	0,11472	0,11472	0,022944
27,53 0,010				
3-Way Interactions	3	0,04250	0,04250	0,014167
17,00 0,022				
Residual Error	3	0,00250	0,00250	0,000833
Total	15	2,09472		

Alias Structure

I
 T2
 T6
 V
 E
 T2*V
 T2*E
 T6*V
 T6*E
 V*E
 T2*T6*V
 T2*T6*E
 T2*V*E

Fractional Factorial Fit: R versus T2; T6; V; E

Estimated Effects and Coefficients for R (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		3,3458	0,007512	445,42	0,000
T2	-0,4250	-0,2125	0,007512	-28,29	0,000
T6	-0,1500	-0,0750	0,007512	-9,98	0,001
V	0,1750	0,0875	0,007512	11,65	0,000
E	0,5000	0,2500	0,007512	33,28	0,000
T2*E	-0,0167	-0,0083	0,007512	-1,11	0,329
T6*V	0,1250	0,0625	0,007512	8,32	0,001
T6*E	-0,0500	-0,0250	0,007512	-3,33	0,029
V*E	0,1000	0,0500	0,007512	6,66	0,003
T2*T6*V	0,0333	0,0167	0,007512	2,22	0,091
T2*T6*E	-0,0333	-0,0167	0,007512	-2,22	0,091
T2*V*E	0,0917	0,0458	0,007512	6,10	0,004

Analysis of Variance for R (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS
F P				
Main Effects	4	1,93500	1,93500	0,483750
535,85 0,000				
2-Way Interactions	4	0,11361	0,11361	0,028403
31,46 0,003				
3-Way Interactions	3	0,04250	0,04250	0,014167
15,69 0,011				
Residual Error	4	0,00361	0,00361	0,000903
Total	15	2,09472		

Alias Structure

I
 T2
 T6
 V
 E
 T2*E
 T6*V
 T6*E
 V*E
 T2*T6*V
 T2*T6*E
 T2*V*E

Fractional Factorial Fit: R versus T2; T6; V; E

Estimated Effects and Coefficients for R (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		3,3458	0,007683	435,49	0,000
T2	-0,4250	-0,2125	0,007683	-27,66	0,000
T6	-0,1500	-0,0750	0,007683	-9,76	0,000
V	0,1750	0,0875	0,007683	11,39	0,000
E	0,5000	0,2500	0,007683	32,54	0,000
T6*V	0,1250	0,0625	0,007683	8,13	0,000
T6*E	-0,0500	-0,0250	0,007683	-3,25	0,023
V*E	0,1000	0,0500	0,007683	6,51	0,001
T2*T6*V	0,0333	0,0167	0,007683	2,17	0,082
T2*T6*E	-0,0333	-0,0167	0,007683	-2,17	0,082
T2*V*E	0,0917	0,0458	0,007683	5,97	0,002

Analysis of Variance for R (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS
F				
P				
Main Effects	4	1,93500	1,93500	0,483750
512,21				
0,000				
2-Way Interactions	3	0,11250	0,11250	0,037500
39,71				
0,001				
3-Way Interactions	3	0,04250	0,04250	0,014167
15,00				
0,006				
Residual Error	5	0,00472	0,00472	0,000944
Total	15	2,09472		

Alias Structure

I
 T2
 T6
 V
 E
 T6*V
 T6*E
 V*E
 T2*T6*V
 T2*T6*E
 T2*V*E

Fractional Factorial Fit: R versus T2; T6; V; E

Estimated Effects and Coefficients for R (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		3,3458	0,009772	342,40	0,000
T2	-0,4250	-0,2125	0,009772	-21,75	0,000
T6	-0,1500	-0,0750	0,009772	-7,68	0,000
V	0,1750	0,0875	0,009772	8,95	0,000
E	0,5000	0,2500	0,009772	25,58	0,000
T6*V	0,1250	0,0625	0,009772	6,40	0,001
T6*E	-0,0500	-0,0250	0,009772	-2,56	0,043
V*E	0,1000	0,0500	0,009772	5,12	0,002
T2*T6*E	-0,0333	-0,0167	0,009772	-1,71	0,139
T2*V*E	0,0917	0,0458	0,009772	4,69	0,003

Analysis of Variance for R (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS
F P				
Main Effects	4	1,93500	1,93500	0,483750
316,64 0,000				
2-Way Interactions	3	0,11250	0,11250	0,037500
24,55 0,001				
3-Way Interactions	2	0,03806	0,03806	0,019028
12,45 0,007				
Residual Error	6	0,00917	0,00917	0,001528
Total	15	2,09472		

Alias Structure

I
 T2
 T6
 V
 E
 T6*V
 T6*E
 V*E
 T2*T6*E
 T2*V*E

Fractional Factorial Fit: R versus T2; T6; V; E

Estimated Effects and Coefficients for R (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		3,3458	0,01102	303,51	0,000
T2	-0,4250	-0,2125	0,01102	-19,28	0,000
T6	-0,1500	-0,0750	0,01102	-6,80	0,000
V	0,1750	0,0875	0,01102	7,94	0,000
E	0,5000	0,2500	0,01102	22,68	0,000
T6*V	0,1250	0,0625	0,01102	5,67	0,001
T6*E	-0,0500	-0,0250	0,01102	-2,27	0,058
V*E	0,1000	0,0500	0,01102	4,54	0,003
T2*V*E	0,0917	0,0458	0,01102	4,16	0,004

Analysis of Variance for R (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS
F				
P				
Main Effects	4	1,93500	1,93500	0,483750
248,79 0,000				
2-Way Interactions	3	0,11250	0,11250	0,037500
19,29 0,001				
3-Way Interactions	1	0,03361	0,03361	0,033611
17,29 0,004				
Residual Error	7	0,01361	0,01361	0,001944
Total	15	2,09472		

Alias Structure

I
T2
T6
V
E
T6*V
T6*E
V*E
T2*V*E

Fractional Factorial Fit: R versus T2; T6; V; E

Estimated Effects and Coefficients for R (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		3,3458	0,01358	246,35	0,000
T2	-0,4250	-0,2125	0,01358	-15,65	0,000
T6	-0,1500	-0,0750	0,01358	-5,52	0,001
V	0,1750	0,0875	0,01358	6,44	0,000
E	0,5000	0,2500	0,01358	18,41	0,000
T6*V	0,1250	0,0625	0,01358	4,60	0,002
V*E	0,1000	0,0500	0,01358	3,68	0,006
T2*V*E	0,0917	0,0458	0,01358	3,37	0,010

Analysis of Variance for R (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS
F	P			
Main Effects	4	1,93500	1,93500	0,483750
163,91	0,000			
2-Way Interactions	2	0,10250	0,10250	0,051250
17,36	0,001			
3-Way Interactions	1	0,03361	0,03361	0,033611
11,39	0,010			
Residual Error	8	0,02361	0,02361	0,002951
Total	15	2,09472		

Alias Structure

I
T2
T6
V
E
T6*V
V*E
T2*V*E

Executing from file: C:\ARQUIVOS DE
PROGRAMAS\MTBWIN\MACROS\FFMain.MAC
Macro is running ... please wait

Main Effects for R

Executing from file: C:\ARQUIVOS DE
PROGRAMAS\MTBWIN\MACROS\FFInt.MAC
Macro is running ... please wait

Interaction Plot for R

Executing from file: C:\ARQUIVOS DE
PROGRAMAS\MTBWIN\MACROS\FFCube.MAC
Macro is running ... please wait

Cube Plot for R

Saving file as: H:\QUALIDAD\6sigma\flavio3.MPJ

General Linear Model: R versus T2; T6; V; E

Factor	Type	Levels	Values
T2	random	2	-1 1
T6	random	2	-1 1
V	random	2	-1 1
E	random	2	-1 1

Analysis of Variance for R, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
T2	1	0,72250	0,72250	0,72250	113,64	0,000
T6	1	0,09000	0,09000	0,09000	1,44	0,442
V	1	0,12250	0,12250	0,12250	1,27	0,395 x
E	1	1,00000	1,00000	1,00000	25,00	0,126
T6*V	1	0,06250	0,06250	0,06250	9,83	0,012
V*E	1	0,04000	0,04000	0,04000	6,29	0,033
Error	9	0,05722	0,05722	0,00636		
Total	15	2,09472				

x Not an exact F-test. Macro is running ... please wait Setting up plot ...

Results for: Worksheet 2

Macro is running ... please wait

Setting up plot ...

Pie Chart: Source

Macro is running ... please wait

Setting up plot ...

Pie Chart: Source

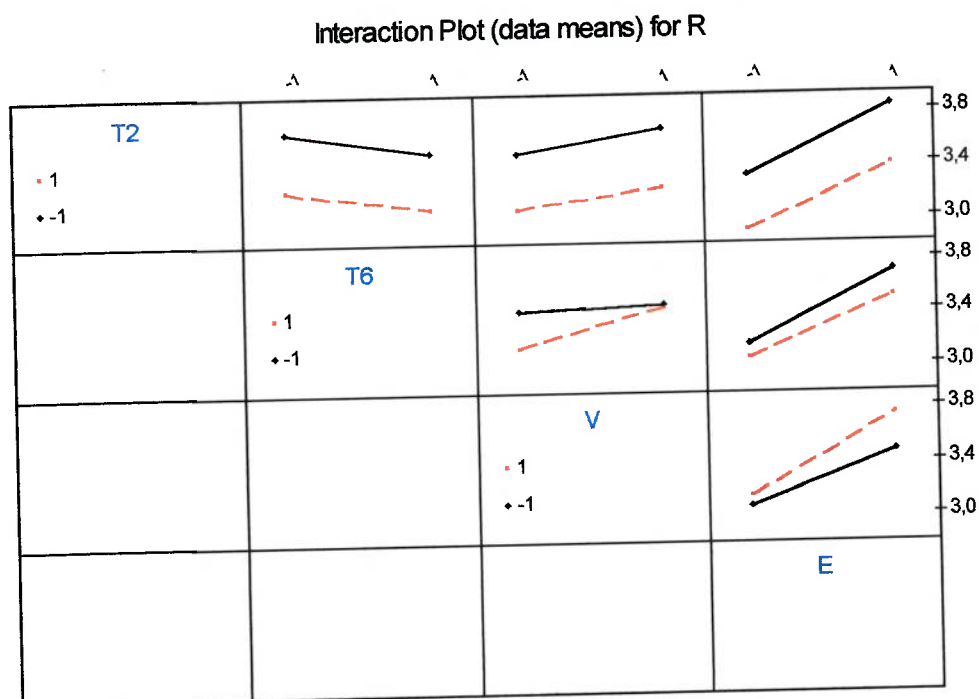


Figura 53 - Gráfico do Experimento fatorial mostrando sem e com interações entre os termos.

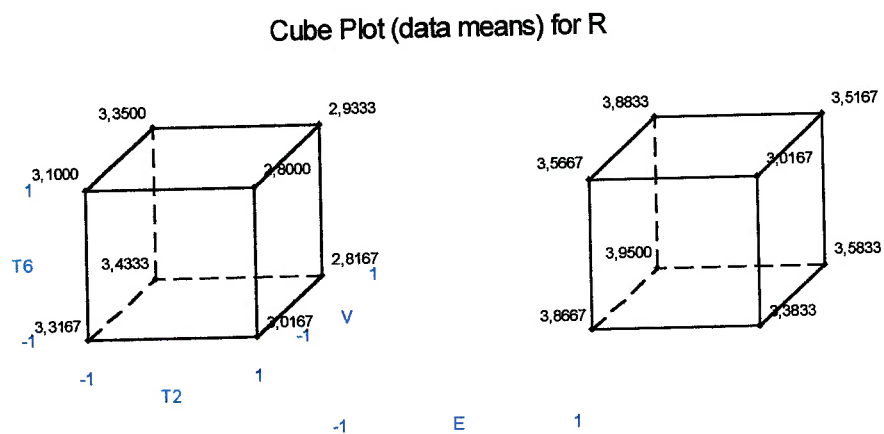


Figura 54 – Diagrama de Cubo das Interações.

Main Effects Plot (data means) for R

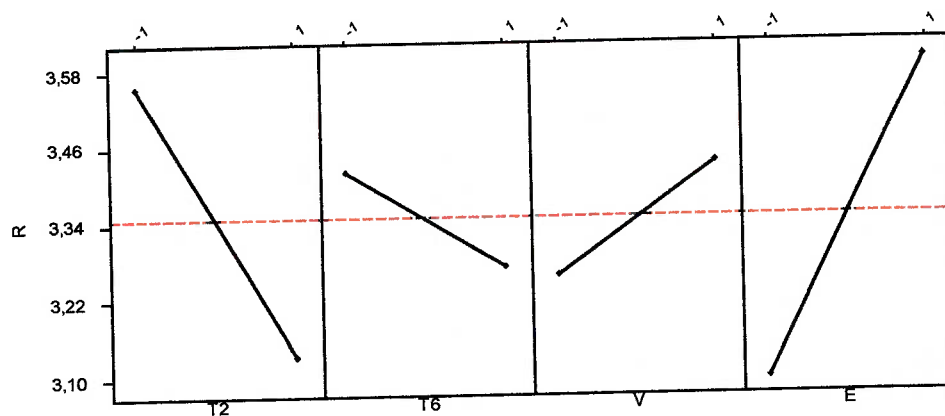


Figura 55 - Nível dos Efeitos das variáveis no recozimento.

Pie Chart of Source

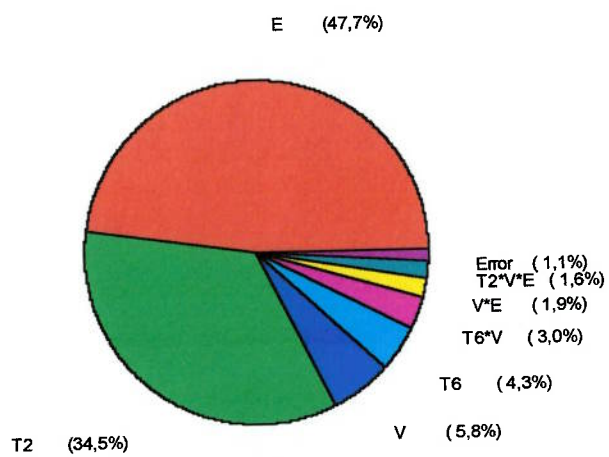


Figura 56 – Gráfico de Pizza da influência de cada termo.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- BREYFOGLE III , FORREST W., Implementing Six Sigma. Smarter Solutions Using Statistical Methods, pág. 47 a 61 e pág. 361 a 401, New York, NY 10158-0012. John Wiley & Sons. Inc. 1999. ISBN 0-471-29659-7.
- BUSSAB, WILTON DE O.; MORETTIN, PEDRO ^a, Estatística básica, 5ª edição 2003 cap. 4, pág. 69 a 91; cap. 15, pág. 410 a 431; cap. 16, pág. 436 a 470. Editora Saraiva, São Paulo, ISN 85-02-03497-9.
- CALEGARE, ÁLVARO JOSÉ. Introdução ao Delineamento de Experimento. 1ª edição, pág. 1 a 115, 2001. , São Paulo, Editora Edgard Blücher LTDA.
- CARO, SAMUE, Cálculo da economia de energia e validação do modelo, São Paulo, 17 mar. 2003/Entrevista/.
- COMGÁS - Companhia de fornecimento de gás – Custo em R\$ do m³ de gás natural. São Paulo 14 jul. 2003/ Entrevista/
- DELTEC, fabricante de fornos de recozimento, Cálculo de perda de energia nos módulos, São Paulo. 23 ago. 2003/Entrevista/
- GUTIÉRREZ, A., Apostila da Viton Ind. e Com. de economia pela eficiência nas operações em fornos de recozimento ou decoração de artigos de vidros (em fase de elaboração) , São Paulo, 1981.
- MEET MINITAB RELEASE 13, Statistical software, for Windows 95/98/2000 and Windows NT, pág. 1-1 a 12-17 February 2000, Minitab Inc. 1999. ISBN 0-925636-42-8.
- NORTON, FREDERICK HARWOOD, Introdução à tecnologia cerâmica, Cap. 17 e 18, pág. 200 a 223, 1ª edição, 1973, São Paulo, Editora Edgard Blücher LTDA.
- ORTIZ, SYLVIO ALVES, Avaliação da qualidade de embalagens de vidro pág. 4 .Campinas, CETEA/ITAL, 1996 ISBN – 85.7029-020-9.
- SOUZA, GILBERTO F.M.- Verificação da confiabilidade do cálculo do consumo de energia. São Paulo. Universidade de São Paulo. 14 jul 2003./Entrevista/
- STRAINOPTICS TECHNOLOGY CO, Manual de Instrução, Fotoelasticidade- Princípios e técnicas de medição (IM-100) 1998 New York. USA.

- TOOLEY, DR. FAY V., The Handbook of Manufacture. Section 10, pag.682-1682-13, Section 14, pag.799 an 832,3° Edition .New York, NY 1007.Ashlee Publishing Co.Inc.1984.Volume II.ISBN0-911993-21-5.
- VAN VLACK , LAURENCE HALL, Propriedades dos materiais cerâmicos,Cap.4, pág.55, 1° edição,1973, São Paulo, Editora Edgard Blücher LTDA.
- VERATTI, ATTÍLIO BRUNO, Termografia, Icon tecnologia e Serviços S/C Ltda. Disponível em: www.intermulti.com.br/icon/. Acesso em 27ago.de 2003.