

# OTIMIZAÇÃO NO CONSUMO DE ENERGIA EM FORNOS DE RECOZIMENTO PARA VIDROS OCOS UTILIZANDO TÉCNICAS DE DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS

**Flávio Fukugava**

Nadir Figueiredo IND. COM. S/A  
Av. Morvan Dias de Figueiredo, 3535 – Vila Maria – São Paulo - SP  
FLAFUKU@aol.com

**Adherbal Caminada Netto**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 – Cidade Universitária – São Paulo - SP  
[adherbal@usp.br](mailto:adherbal@usp.br)

**Gilberto Francisco Martha de Souza**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 – Cidade Universitária – São Paulo - SP  
[gfmsouza@usp.br](mailto:gfmsouza@usp.br)

***Resumo.** Este trabalho apresenta a aplicação da técnica de delineamento de experimentos para definir um procedimento de obtenção de uma relação matemática entre variáveis que controlam o processo de recozimento do vidro, as quais são a temperatura de aquecimento máximo, a temperatura no início do resfriamento, a espessura do vidro e a velocidade de passagem do vidro no forno. A metodologia é aplicada na análise do processo de recozimento de vidros ôcos em fornos que utilizam gás natural como combustível, possibilitando a previsão do grau de recozimento em função das variáveis de processo. Verificou-se que a temperatura de aquecimento máximo e a espessura do vidro são as variáveis que exercem maior influência neste processo. Adicionalmente, a relação entre estas variáveis permitiu a alteração da temperatura de recozimento, sem causar variação na qualidade do produto, possibilitando a redução do consumo de gás natural.*

*Palavras chave:* vidro, recozimento, delineamento experimentos, gás natural, otimização.

## 1. Introdução

Para a produção de recipientes, garrafas, louça em geral e vidro plano para janelas é usado o tipo de vidro sílica-cal-soda com uma pequena adição de alumina. O equipamento empregado para a fusão dos componentes do vidro é o forno-tanque contínuo. Nele, as matérias primas são continuamente alimentadas num extremo e o vidro refinado é continuamente retirado no outro extremo. O vidro, ainda no estado líquido, passa através de uma fornecedora, que produz “gotas” (“gobs”) de vidro, uniformes em peso e na forma e com temperatura da ordem de 1130°C, pelo controle de escoamento através de um orifício de material refratário, que alimentam as máquinas de conformação de peças de vidro.

O vidro é conformado no estado viscoso, e existe uma série de métodos empregados nesta operação de conformação, sendo que a seleção de um determinado método de conformação para uma linha de produção específica está associada com as características do produto a ser fabricado. Para a produção de recipientes, o processo utilizado é o prensado-soprado. A temperatura da gota no início do processo de conformação deve estar em torno de 1130°C e até o término da conformação do produto em vidro, a temperatura atinge valores em torno de 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 emprego do processo de recozimento para aliviar estas tensões residuais, tornando o produto conformado seguro comercialmente.

Este termo seguro refere-se à possibilidade do mesmo vir a fraturar, mesmo durante a sua utilização em conformidade com as condições de projeto, em função da sua fragilidade, devido à presença de tensões residuais. Esta fragilidade pode ser reduzida com o alívio destas tensões residuais introduzidas pelo processo de conformação.

Devido à enorme variedade de artigos em vidro, geralmente, nos fornos de recozimento, utiliza-se para a operação de alívio de tensões temperaturas em torno de 550° C. Esta temperatura é comumente denominada de “Annealing Point” ou ponto de recozimento. Este ponto de recozimento depende da composição do vidro, sendo que grande parte dos produtos em vidro oco para uso comercial é do tipo sílica-soda-cal ou à base de Sódio e Cálcio.

Os fornos de recozimento são estruturas horizontais de grandes dimensões, onde os produtos de vidro, já conformados, passam por um ciclo de aquecimento e resfriamento controlados. Estes fornos utilizam gás natural como combustível. Tendo em vista a importância da operação de recozimento para a garantia da qualidade e da segurança de

produtos de vidro, as variáveis que influenciam este processo devem ser cuidadosamente controladas. Entretanto, o consumo de energia destes fornos pode ser considerado bastante elevado, dado que os mesmos operam continuamente, em função da necessidade de manutenção de temperaturas elevadas e de magnitude constante no tempo no seu interior.

Com o objetivo de otimizar o consumo de gás natural destes fornos de recozimento, este trabalho apresenta uma proposta de análise experimental, visando a avaliação do efeito das variáveis utilizadas no controle do processo de recozimento sobre a distribuição de tensões residuais no vidro sílica-soda-cal, cuja magnitude é definida através de um grau de têmpera. Com o emprego da técnica de Delineamento de Experimentos, pode-se definir uma equação de regressão múltipla que relaciona as variáveis acima citadas com o grau de têmpera do vidro.

A análise da influência das variáveis de controle do processo de recozimento sobre o grau de têmpera obtido nos vidros deve ser executada através de um estudo experimental, uma vez que não existem modelos publicados em literatura técnica que permitam avaliar a relação acima citada. Segundo Calegare (2001), o Delineamento de Experimentos é um processo científico com aplicação ampla em vários campos do conhecimento para definição da forma de execução de um experimento, que tenha como objetivo revelar uma possível relação entre as variáveis de controle de um processo, ou seja, aquelas que podem ter sua magnitude definida quando da execução do planejamento do processo, bem como podem ser monitoradas e controladas por um operador ou sistema de aquisição e registros de sinais, e os resultados obtidos após a execução do processo, ou simplesmente efeitos do processo, representados por um conjunto de características mensuráveis do produto físico, verificando-se a veracidade de possíveis conjecturas sobre o mesmo.

No caso em estudo, busca-se uma relação entre as variáveis controladas no processo de recozimento e o resultado do mesmo, ou seja, o alívio de tensões no vidro, expresso pelo número de têmpera. Para o processo de recozimento, pode-se tomar as seguintes variáveis de controle: i) as temperaturas de aquecimento máximo (T2) e inicial de resfriamento controlado (T6), expressas em ° C; ii) a velocidade da passagem do vidro em cada zona de aquecimento e resfriamento (V) e iii) a espessura do vidro (E).

Esta metodologia é empregada na análise do processo de recozimento de vidros empregado por uma planta industrial localizada no estado de São Paulo. De posse da equação de regressão múltipla, executa-se uma alteração nas variáveis de controle do processo visando à redução das temperaturas no interior do forno, de forma a reduzir o consumo de gás natural dos mesmos, sem reduzir a qualidade do produto final, caracterizada pelo alívio das tensões residuais.

## 2. Processo de Recozimento do Vidro

Tal como citado no item introdutório deste trabalho, a operação de recozimento de componentes de vidro tem por objetivo reduzir as tensões residuais existentes ao longo da espessura da parede. O recozimento é dependente da temperatura máxima no interior do forno e, tipicamente, após esta operação obtém-se o diagrama de tensões residuais apresentado na Figura 1. O mesmo indica a variação da magnitude das tensões residuais, cujo valor é representado esquematicamente em linhas cheias, em uma secção transversal do vidro resfriado com velocidade uniforme a partir de uma temperatura de elevada magnitude, no caso 700°C. As abscissas representam as distâncias tomadas na direção normal à superfície do vidro e as ordenadas representam a magnitude da tensão residual

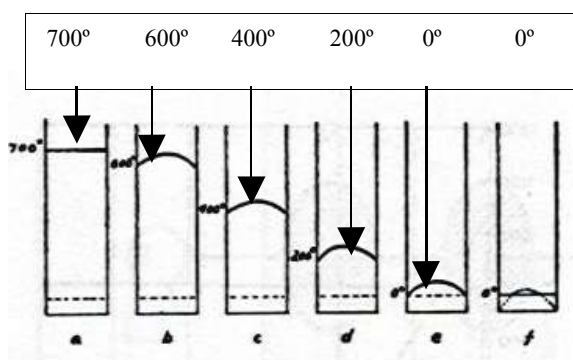


Figura 1. Variação das tensões residuais ao longo do processo de recozimento.

Para verificar a magnitude das tensões residuais acumuladas no processo de fabricação do vidro oco deve-se utilizar técnicas experimentais, recomendando-se a análise por foto-elasticidade. O equipamento necessário para isso é o polarímetro. Este equipamento baseia-se no princípio de que a luz se propaga no vácuo ou no ar a uma velocidade (C) de  $3 \times 10^8$  m/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 tornam-se 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 à diferença das tensões principais. 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  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  e as velocidades da luz vibrando nestas direções forem  $V_x$  e  $V_y$  respectivamente, o tempo necessário para cada um deles atravessar a chapa será de  $t/V$  e o retardamento relativo entre estes dois fechos de luz será a diferença entre os tempos necessários para estes atravessarem o material com uma dada espessura. O polarímetro permite a verificação do retardamento entre estes fechos de luz a partir da medição do ângulo entre a direção de propagação dos fechos de luz e uma direção de referência do analisador do polariscópio.

O nível de tensões residuais no vidro está associado com este retardamento, sendo definido a partir dos valores constantes da Tab. 1, apresentada pela norma ASTM C148, (ASTM, 1991a).

Para calcular a magnitude da tensão residual ( $\sigma_{residual}$ ) atuante em um componente de vidro é necessário aplicar a seguinte equação:

$$\sigma_{residual} = \frac{N.F}{E} \tag{1}$$

onde  $N$  é a ordem de fringência,  $F$  é a constante de tensão do material óptico (para o vidro soda-cal = 1250 psi/fringência ou 8,61 MPa/fringência) e  $E$  é a espessura do material.

Tabela 1. Designação de “Têmpera” - ASTM C 148.

Número de têmpera	Rotação do analisador em graus (°)	Retardamento (nm)	Ordem de fringência (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

De acordo com a Strainoptics Technology Co. (1998), para o uso comercial de potes de vidro o valor de tensão residual máxima é de 10 MPa, com ângulo de rotação do analisador de até 42,0°, isto é, o número de têmpera usado para uso comercial é até nº 6. O valor mínimo comercialmente usado é o nº 4, correspondendo a uma magnitude da tensão residual de 5,5 MPa.

O forno de recozimento é o equipamento usado para aliviar as tensões do vidro, podendo utilizar energia elétrica ou gás natural como fonte de energia. Atualmente, as 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”).

Os fornos de recozimento que utilizam energia elétrica como fonte de energia estão sendo gradativamente descartados, devido ao alto custo operacional comparado com os acionados por gás natural, que são analisados no caso exemplo deste trabalho.

O forno de recozimento que utiliza gás natural é dividido em três partes: I) zona de aquecimento (19,3% do comprimento total); ii) zona de resfriamento controlado (53,7% do comprimento total) e iii) zona de resfriamento até a temperatura ambiente.(27% do comprimento total)

Através dos fornos de recozimento, o vidro seguirá uma curva temperatura-tempo pré-estabelecida, sofrendo um processo de aquecimento e resfriamento controlado, conforme a curva indicada na Fig. 2, para um vidro soda-cal. Segundo Tooley (1984), a curva consiste em: 1) reaquecimento do vidro, elevando a temperatura do vidro próximo ao ponto de recozimento; 2) manutenção 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 que induzirá tensões residuais permanentes e 4) resfriamento acelerado controlado do ponto de tensão até a temperatura ambiente.

Tal como afirmado no item introdutório, o objetivo do trabalho é analisar as variáveis de controle do processo de recozimento, de forma a otimizar o consumo de gás natural empregado na operação do forno.

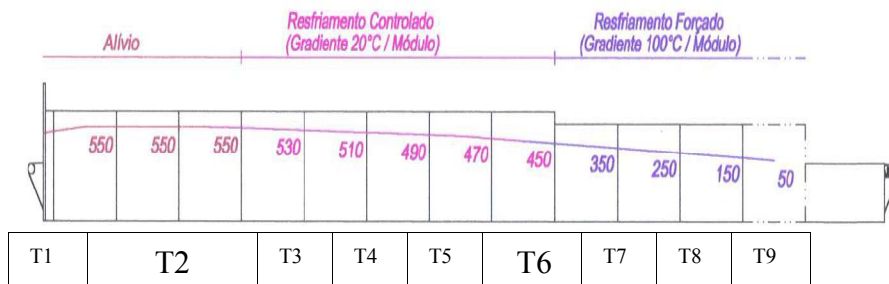


Figura 2. Curva de resfriamento típica do vidro soda-cal, Tooley (1984).

### 3. Planejamento da Análise Experimental com o Emprego de Conceitos de Delineamento de Experimentos

Um processo de manufatura tem por objetivo a obtenção de um produto que atenda aos requisitos de projeto do mesmo, sendo, genericamente, este processo composto por equipamentos, insumos materiais, métodos ou procedimentos de execução do mesmo, condições ambientais, mão de obra e sistema de medições. Qualquer variação nestes elementos provoca uma variação nas características do produto final. Especificamente, neste trabalho, busca-se a obtenção de uma relação que especifique um efeito sobre um produto, caracterizado pela variação no grau de recozimento, em função de variáveis que controlam o método de execução da operação de alívio de tensões. Para este fim emprega-se a técnica denominada de Delineamento de Experimentos, amplamente empregada na Engenharia da Qualidade, para estabelecer uma relação entre variações de variáveis de controle de um processo e um efeito sobre o produto produzido. Para tanto, desenvolvem-se experimentos para coletar dados que representam efeitos no produto em função de variáveis de controle do processo. Esses dados são empregados para estabelecer uma regressão múltipla que permite avaliar a alteração em uma característica do produto, no caso em estudo o grau de recozimento, em função da alteração na magnitude das variáveis de controle. A Fig. 3 mostra uma representação esquemática do Delineamento de Experimentos.

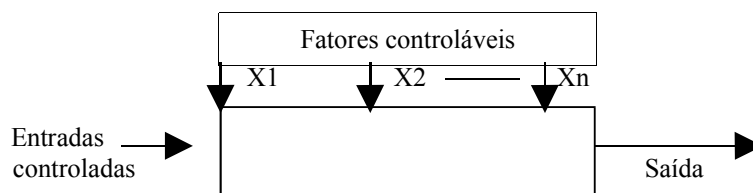


Figura 3. Modelo geral de um processo para Delineamento de Experimentos, Calegare (2001).

Os fatores controláveis no problema de previsão do grau de recozimento do vidro são:

- as temperaturas de aquecimento máximo T2 e de resfriamento forçado T6 (em ° C);
- a velocidade da passagem do vidro em cada zona de aquecimento e resfriamento.(em m/min);
- a espessura do vidro.(em mm).

Para determinação dos efeitos das variáveis propõe-se a execução de um experimento do tipo 2 fatorial, que se caracteriza pela utilização de apenas 02 níveis para cada variável, ou seja: para cada uma das variáveis controladas, utilizam-se dois valores, limitantes superiores e inferiores para a magnitude das mesmas, a fim de caracterizar a relação das mesmas com o grau de recozimento do vidro.

Os valores máximos e mínimos das temperaturas T2 e T6, da velocidade V e da espessura devem ser definidos através dos valores que não prejudicam a eficiência de produção, uma vez que os dados experimentais devem ser tomados durante a operação normal da linha. No caso da temperatura T2 os limites são especificados em função das características do processo de recozimento, ou seja, se a mesma estiver muito acima do limite especificado (acima do "annealing point"), pode-se marcar os produtos com o formato da esteira e quando esta temperatura estiver muito abaixo do limite especificado, o artigo não será recozido, podendo posteriormente ocorrer quebra espontânea.

Para execução das tomadas de dados experimentais deve-se aplicar uma combinação destas quatro variáveis, isto é, fixando-se um conjunto de valores das variáveis de controle, deve-se tomar amostras de vidro recozido conforme esta condição específica e verificar o grau de recozimento, expresso pelo número de têmpera, sendo cada execução do experimento denominada de teste. Executando-se este procedimento para vários conjuntos de variáveis, conforme combinações apresentadas na Tab. 2, indicando um total de 16 testes, obtém-se um conjunto de valores que permitem definir uma regressão múltipla que permite a previsão do grau de recozimento em função da magnitude das variáveis de controle.

Na execução de cada um dos testes deve-se coletar três amostras de vidro recozido na saída do forno, conforme sugestão da norma técnica ASTM C224 (1991b), 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 2. Combinação de valores das variáveis de controle proposta para a análise experimental.

Teste	T2	T6	V	E
1	MAX	MAX	MAX	MAX
2	MAX	MAX	MAX	MIN
3	MIN	MAX	MAX	MAX
4	MIN	MAX	MAX	MIN
5	MIN	MIN	MAX	MAX
6	MIN	MIN	MAX	MIN
7	MAX	MIN	MAX	MAX
8	MAX	MIN	MAX	MIN
9	MAX	MIN	MIN	MAX
10	MAX	MIN	MIN	MIN
11	MAX	MAX	MIN	MAX
12	MAX	MAX	MIN	MIN
13	MIN	MAX	MIN	MAX
14	MIN	MAX	MIN	MIN
15	MIN	MIN	MIN	MAX
16	MIN	MIN	MIN	MIN

OBS.: MIN a indicação do valor mínimo para a variável  
 MÁX a indicação do valor máximo para a variável.

Propõe-se que, para cada um dos testes indicados na Tab. 2, sejam tomadas amostras localizadas nas duas extremidades laterais e no centro da correia transportadora, na área fria do forno, tal como indicado na Fig. 4. O grau de recozimento de cada amostra é medido com o auxílio de um polariscópio. Para definição da regressão múltipla que expressa a relação entre as variáveis de controle e o grau de recozimento, propõe-se o uso da média aritmética dos valores do grau de recozimento obtidos para as amostras retiradas na área fria.

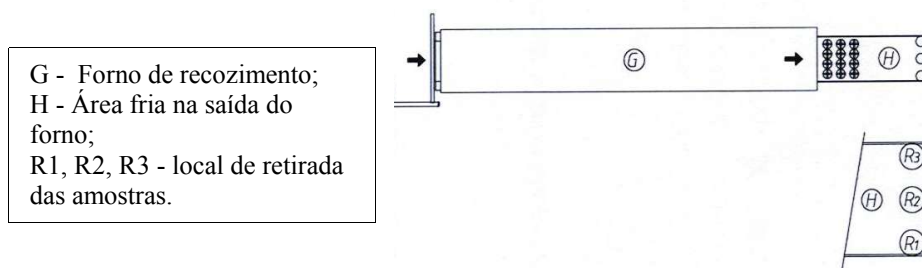


Figura 4. Esquema que localiza a retirada das amostras R1, R2, e R3.

A regressão múltipla obtida a partir da análise dos dados experimentais tem por objetivo fornecer um instrumento de previsão da variabilidade do grau de recozimento em função da variação da magnitude das variáveis de controle, sendo os coeficientes dos mesmos calculados com o emprego do método dos mínimos quadrados. Este método tem por objetivo minimizar a soma dos quadrados das distâncias entre os valores experimentais e os valores previstos pela regressão, para o grau de recozimento do vidro, obtido a partir de um conjunto de valores das variáveis aleatórias.

#### 4. Execução do Experimento e Análise de Resultados Experimentais

##### 4.1. Considerações Iniciais

O modelo acima proposto para determinação da temperatura máxima de aquecimento foi utilizado para determinar as condições de recozimento recomendadas para uma planta fabril de vidros ocós.

Para a execução do experimento, utilizou-se o forno de recozimento do fabricante “DELTEC” com as seguintes características: i) Largura: 2,40 m; ii) Tipo de aquecimento: gás natural; iii) Zonas de aquecimento: 03 zonas; iv) Energia gerada: 211.500 kcal/h.

O forno empregado nesta análise possui 10,5 anos de utilização. As manutenções preventivas recomendadas pelo fabricante foram todas realizadas, sendo o desempenho do equipamento superior ao mínimo exigido para a manutenção do mesmo em operação.

Para a análise experimental foi considerada a produção de vidros ocios, com espessuras variando entre 3,0 e 5,0 mm, representando produtos típicos de produção da unidade industrial analisada. Adicionalmente, em função das características da operação de recozimento dos mesmos, definiu-se os valores máximos e mínimos para as variáveis de controle, apresentados na Tab. 3.

Tabela 3. Variação empregada para as variáveis de controle do processo de recozimento.

Variáveis	Valor Máximo	Valor Mínimo
Temperatura T2 (°C)	540	504
Temperatura T6 (°C)	500	460
Velocidade da Esteira (V) (m/min)	0,74	0,59
Espessura do vidro (mm)	5	3

Para análise do grau de recozimento das amostras empregou-se um polariscópio tipo IM - 100 do fabricante Strainoptic Technology Co. (1998), sendo as leituras executadas pelo chefe de produção da linha para padronização das mesmas.

Para execução dos 16 testes indicados na Tab. 2 foram alteradas as condições de operação do forno e empregado um intervalo de tempo de uma hora entre a alteração das condições de operação e a tomada da amostra, a fim de obter-se a completa estabilização do processo. Os resultados obtidos estão indicados na Tab. 4, sendo R o valor do grau de recozimento dividido por 10, correspondendo ao valor do ângulo de rotação do polarímetro dividido por 10. Os valores da variável de processo estão expressos em termos de valores normalizados, ou seja, o valor +1 corresponde ao valor máximo e o valor -1 corresponde ao valor mínimo.

Tabela 4. Resultados da análise experimental para o grau de recozimento.

T2	T6	V	E	R
1	1	1	1	3,51667
-1	1	1	1	3,88333
-1	-1	1	1	3,95000
1	-1	1	1	3,58333
1	-1	-1	1	3,38333
1	1	-1	1	3,01667
-1	1	-1	1	3,56667
-1	-1	-1	1	3,86667
1	1	1	-1	2,93333
-1	1	1	-1	3,35000
-1	-1	1	-1	3,43333
1	-1	1	-1	2,81667
1	-1	-1	-1	3,01667
1	1	-1	-1	2,80000
-1	1	-1	-1	3,10000
-1	-1	-1	-1	3,31667

#### 4.2. Análise de Resultados

A análise dos dados foi executada com o emprego do programa “MINITAB Release 13”.(Minitab 1999). Inicialmente executa-se a determinação da interação entre as variáveis de controle e o grau de recozimento, considerando-as de forma isolada e combinada, até termos de quarto grau, em função da utilização de quatro variáveis de controle no experimento. Na Fig. 5 tem-se a indicação destes efeitos, considerando as variáveis isoladas e combinadas, até termos de segundo grau.

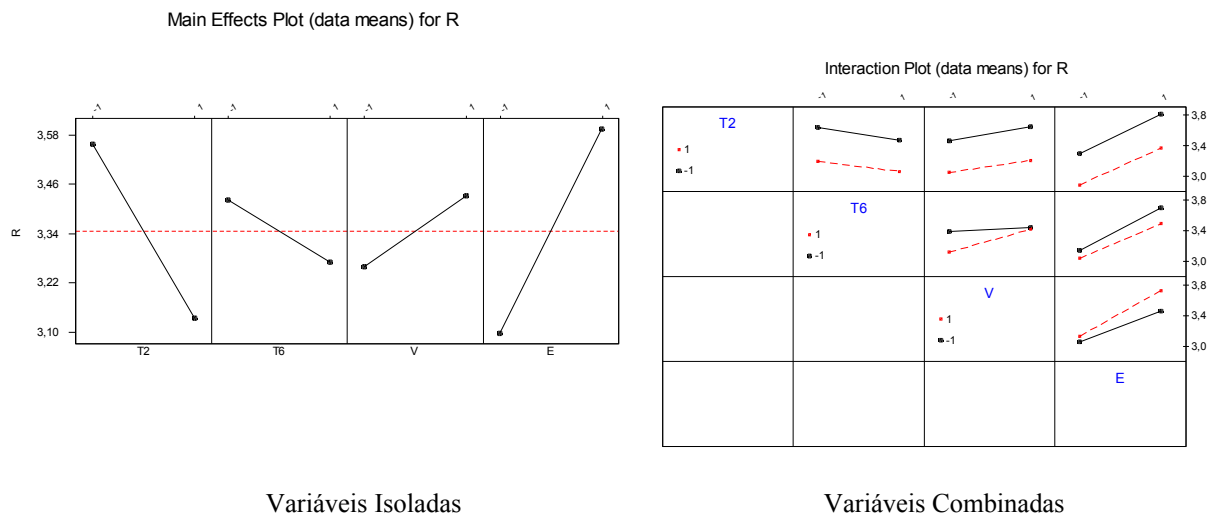


Figura 5. Efeito da alteração das variáveis de controle sobre o grau de recozimento do vidro oco.

Uma vez determinados os efeitos destas combinações de variáveis de controle, verifica-se o grau de influência de cada um deles sobre o grau de recozimento, utilizando-se a técnica dos testes de hipóteses, com nível de significância de 5%, baseando-se no estudo da variância do grau de recozimento em função da alteração das variáveis de controle. Com este teste eliminam-se combinações de variáveis aleatórias que pouco influenciam o grau de recozimento, tais como a de quarto grau e algumas combinações de segundo e terceiro graus. A partir destas eliminações determinam-se os coeficientes do polinômio obtido através da técnica de regressão múltipla, que permite as estimativas do grau de recozimento do vidro oco, indicado na eq. (2):

$$R = (3,3458 - T2*0,2125 - T6*0,075 + V*0,0875 + 0,25*E + 0,0625*T6*V + 0,05*V*E + 0,0458*T2*V*E) * 10 \quad (2)$$

O coeficiente de determinação da regressão é 98,87%, ou seja, para o conjunto de valores experimentais considerados no estudo, a expressão apresentada na eq. 2 explica cerca de 99% da variabilidade do grau de recozimento em função da alteração das variáveis de controle.

Adicionalmente, na Fig. 6 tem-se o grau de influência de cada termo da regressão sobre o grau de recozimento, verificando-se uma grande influência dos termos de primeiro grau relativos à espessura e à temperatura de aquecimento máximo.

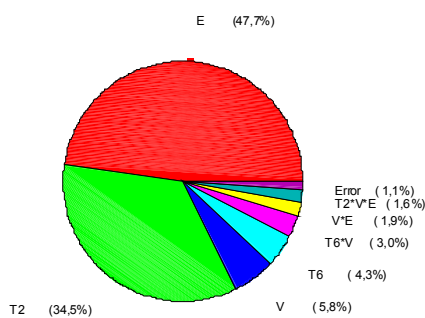


Figura 6. Grau de influência dos termos do polinômio interpolador do grau de recozimento.

Para verificação da validade da relação proposta na eq. (2) executou-se experimentos onde se impunha um valor para as variáveis de controle e definiu-se os valores estimados para o grau de recozimento, comparando-os com os obtidos experimentalmente. Na Tab. 5 indica-se os valores empregados na validação do modelo. Foram executados ensaios com vidros de diversas espessuras, calculando-se o erro associado com a previsão da regressão, o qual é expresso pela relação porcentual entre o valor estimado e o valor obtido experimentalmente. A variação deste erro é indicado na Fig. 7. Para valores de espessura entre 3 e 5 mm, para os quais a regressão foi proposta, tem-se um erro de estimação inferior a 5%, indicando a validade do modelo ora proposto. O alto percentual do coeficiente de explicação

do modelo, juntamente com o erro de apenas 5% entre o valor estimado e o valor obtido experimentalmente, permite supor a linearidade entre os níveis.

Tabela 5. Condições experimentais empregadas para validação do modelo proposto na eq.(2).

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

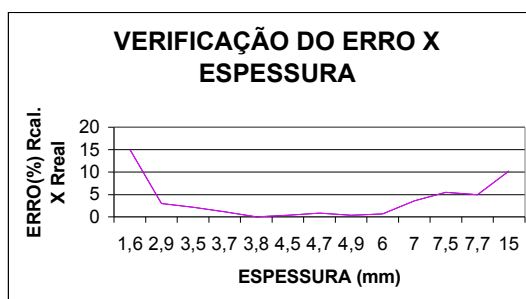


Figura 7. Variação dos erros de estimação do grau de recobrimento em função da espessura do vidro oco.

### 4.3. Estudo do consumo de gás natural

Considerando que a temperatura máxima de aquecimento exerce significativa influência sobre o grau de recozimento e também sobre a energia necessária para obter-se o aquecimento do forno, pode-se estudar a variação do consumo de gás natural do forno em função da variação da temperatura máxima de aquecimento, mantendo-se os requisitos de grau de recozimento para o produto.

A energia necessária para operar o forno é utilizada para aquecer a esteira, para aquecer o vidro e para compensar a perda de energia por irradiação do forno.

A energia necessária para aquecer a esteira e o vidro é calculada a partir do calor específico dos materiais, da temperatura de entrada dos mesmos no forno e da temperatura máxima de aquecimento. Já a perda por irradiação do forno em estudo, obtida em catálogo do fabricante, é da ordem de 15,95 KW/hora. O consumo de gás natural é função da energia necessária para manter o forno operando, sendo calculado em função do poder calorífico do gás natural, da ordem de 9400 kcal/m<sup>3</sup>.

Executou-se o estudo do consumo do gás natural considerando que o vidro deve ter grau de recozimento correspondente a 33 graus, valor médio do ângulo do polarímetro para o grau de recozimento 5. Para um dado grau de recozimento, especifica-se, com o emprego da eq. (2), o valor da temperatura máxima de aquecimento a ser utilizada no processo de alívio de tensões residuais. Com este valor de T2, faz-se a previsão da energia necessária para o



aquecimento e prevê-se o consumo de gás natural. Para verificação da economia de gás, compara-se os valores obtidos com os que são necessários para manter o valor de T2 atualmente empregados pela empresa. Os resultados da análise são mostrados na Tab. 6.

Tabela 6. Cálculo da redução do consumo de gás natural em função da variação da temperatura de aquecimento máximo

Dados	CASO 1	CASO 2	CASO 3
Massa da esteira (kg/minuto)	32,28	37,28	31,72
Massa do vidro (kg/minituo)	39	39	37,90
Temperatura do vidro na entrada do forno (° C)	480	497	480
Temperatura da esteira na entrada do forno (° C)	240	228	210
Temperatura T2 ("set-up" atual) (° C)	540	550	540
Energia requerida para aquecer a esteira (KW/hora)	93,88	116,66	101,41
Energia requerida para aquecer o vidro (KW/hora)	40,79	36,03	39,64
Energia total requerida para o aquecimento (KW/hora)	150,62	168,65	157,02
Consumo de gás natural (m <sup>3</sup> /hora)	13,78	15,43	14,37
Temperatura T2 ("set-up" atual) (° C)	510,63	527,18	504,86
Energia requerida para aquecer a esteira (KW/hora)	84,68	108,39	90,62
Energia requerida para aquecer o vidro (KW/hora)	20,82	20,51	16,42
Energia total requerida para o aquecimento (KW/hora)	121,46	144,87	123
Consumo de gás natural (m <sup>3</sup> /hora)	11,12	13,26	11,25
Economia de gás natural (m <sup>3</sup> /hora)	2,66	2,17	3,12
Economia de gás natural (m <sup>3</sup> /ano)	23314,64	19002,76	27248,52
Economia de custo de gás natural (US\$/ano)	4625,62	3775,85	5414,28

Verifica-se que o modelo proposto neste estudo indica a possibilidade de grande redução do consumo de gás natural, possibilitando uma economia superior a US\$ 3.700,00/ano em gastos com gás natural, considerando-se uma tarifa de US\$ 0,20/m<sup>3</sup> (Comgás 2003), dependendo do produto fabricado.

Estas condições de processo estão sendo atualmente utilizadas pela empresa, havendo uma boa consonância entre os valores previstos para consumo de gás e os valores que estão sendo obtidos experimentalmente, com erro máximo de 10%, tal como indicado na Fig.8.

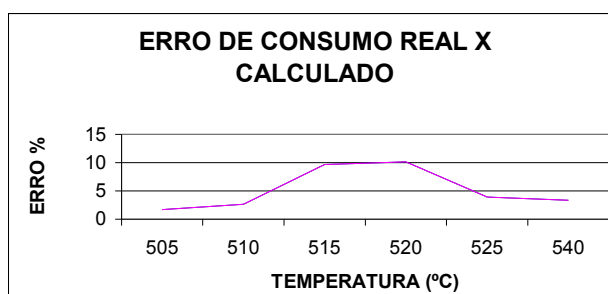


Figura 8. Erro de estimação do consumo de gás natural em função da temperatura de aquecimento máximo.

## 6. Conclusões

Este trabalho apresenta um método para previsão do grau de recozimento de componentes de vidro oco em função de variáveis que controlam este processo, as quais são: temperatura de aquecimento máximo, temperatura inicial de resfriamento controlado, espessura do vidro, e velocidade de passagem dos componentes no interior do forno de recozimento. A relação entre as variáveis e o grau de recozimento foi obtida com o emprego de uma análise experimental baseada na técnica de delineamento de experimentos. O método foi empregado em uma planta industrial, havendo uma boa consonância entre as previsões teóricas e os resultados obtidos em medições reais, em um forno industrial.

Baseando-se nas previsões teóricas, procurou-se estimar qual seria a temperatura de aquecimento máxima recomendada para um determinado produto, visando à obtenção de um grau de recozimento específico. Obtiveram-se estimativas inferiores aos valores empregados como referência no processo de fabricação destes produtos. Tal fato indicou a possibilidade de redução desta temperatura sem afetar a qualidade do produto final. A redução da mesma implica na possibilidade de redução do consumo de gás natural necessário para a operação do forno, o que implica em economia de recursos.

Executou-se uma análise destinada a verificar o montante de recursos financeiros que poderiam ser economizados com o emprego de uma nova temperatura máxima de aquecimento. Após o estudo de três produtos, chegou-se à possibilidade de uma economia de aproximadamente até US\$ 5.000,00/ ano no forno de recozimento analisado neste estudo. Os valores estimados foram novamente comparados com dados experimentais, havendo indicação da possibilidade de redução do consumo de gás natural.

## **6. Referências**

- ASTM, 1991a, "ASTM C-148: Standard Test Methods for Polariscopes Examination of Glass Containers", Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.02, pp. 63-64.
- ASTM, 1991b, "ASTM C-224: Standard Practice for Sampling Glass Containers", Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.02, pp. 14-16.
- Calegare, A. J., 2001, "Introduction to Design of Experiments", Ed. Edgard Blücher, S. Paulo, Brazil, 115 p.
- Comgás, 2003, "COMGÁS – Gas Distribution Company: Costs of Natural Gas", Private communication, S. Paulo, Brazil.
- Strainoptics Technology Co., 1998, "Instruction Manual Photoelasticity: Principles and Measurement Techniques (IM-100)" New York, USA, 53p.
- Tooley, D.R. and Fay, V., 1984, "The Handbook of Manufacture", Ashlee Publishing Co. Inc., New York, USA, 1702p.
- Minitab, 1999, "MEET MINITAB RELEASE 13, Statistical software, for Windows 95/98/2000 and Windows NT", Minitab Inc., USA, 210p.

## **OPTIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION IN GLASSWARE ANNEALING OVENS USING DESIGN OF EXPERIMENTS TECHNIQUES**

Flávio Fukugava  
Nadir Figueiredo IND. COM. S/A  
Av. Morvan Dias de Figueiredo, 3535 – Vila Maria – São Paulo - SP  
FLAFUKU@aol.com

Adherbal Caminada Netto  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 – Cidade Universitária – São Paulo - SP  
adherbal@usp.br

Gilberto Francisco Martha de Souza  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 – Cidade Universitária – São Paulo - SP  
gfmsouza@usp.br

### **Abstract**

The manufacturing of glass holloware involves many steps, from glass production to final product quality control. One of the most important manufacturing steps is the glassware annealing process, aiming at residual stress intensity minimization in order to reduce the possibility of piece failure during customers' regular use. The annealing is made with gas powered furnaces, in a continuous process. In view of the great amount of money spent with gas, the optimization of the annealing process may result in great monetary savings for the plant. This paper discusses the experimental procedure used to define the basic random variables that have influence on the glassware annealing process and the importance of those variables on process optimization. Design of Experiments techniques are used to define a polynomial equation that allows one to investigate the existing relationship between several variables such as heating temperature, cooling temperature, speed of passage through the oven, product thickness, maximum heating temperature, and the annealing grade which is the reference for checking the residual stress intensity relief achieved by the heat treatment process. The experimental methodology is applied in a glassware manufacturing plant, and led to the conclusion that maximum heating temperature and glass thickness are the most influential variables as far as the annealing process is concerned. Therefore, using the polynomial model developed in this study the maximum heating temperature can be minimized in order to achieve the standard residual stress intensity for the glassware industry. As a result, the reduction in maximum heating temperature leads to a reduction in natural gas consumption.

Keywords: Design of Experiments, holloware, annealing, natural gas, optimization