

ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE UM FORNO DE FUSÃO DE VIDRO

Mauricio Radino Rouse
mauricio.rouse@gmail.com

Euryale de Jesus Zerbin
ejzerbini@yahoo.com

Este trabalho apresenta um estudo de um forno elétrico do tipo "pot furnace" existente numa fábrica de vidro cristal localizada na cidade de São Paulo. Depois de iniciada a produção notou-se uma ocorrência muito grande de um defeito denominado corda no vidro. Esse é um defeito superficial no vidro e é constituído por zonas onde se detectam variações significativas de índices de refração. Suas causas mais comuns são: Falta de homogeneidade na matéria prima, ataque químico do refratário no vidro fundido e ausência de homogeneidade da temperatura do vidro fundido que vai ser trabalhado. Para a análise do problema foram tomadas algumas medidas: uma análise semiquantitativa, por fluorescência de raios-X, de amostras da matéria prima e do vidro produzido no forno que está sendo analisado, cálculo da temperatura de fusão a partir da composição obtida por meio da análise e também um modelo matemático utilizando volumes finitos em coordenadas cilíndricas simulando a região do cadinho em diversas condições. Observou-se que a composição fornecida pelo fabricante da matéria prima é diferente daquela obtida através da análise experimental, que a temperatura de fusão do pellet utilizado no forno deveria ser mais baixa, que ocorreu transporte de massa, SiO_2 , do cadinho para o vidro, que o forno possui uma grande inércia para a transferência de calor por condução e também que não há não uniformidade de temperatura no cadinho. A solução obtida foi a troca do cadinho, confirmando a suspeita inicial que a corda foi causada pela contaminação do vidro pelo cadinho.

Palavras chave: Vidro soprado (Defeito), Forno elétrico, Transferência de calor.

1. Definição do problema:

O objetivo da fábrica de vidro proprietária do forno que está sendo analisado é produzir um vidro de alta qualidade, para a confecção de vasos e outros objetos com a utilização do vidro cristal. Este vidro apresenta óxido de chumbo em sua composição (PbO) e suas principais características são um brilho e transparência maiores do que aqueles encontrados nos vidros comerciais simples. Outras características importantes são: menor temperatura de fusão, maior densidade e maior tempo de trabalho.

No decorrer da produção foi constatada uma ocorrência muito grande de cordas nas peças produzidas. Este defeito é superficial e facilmente detectado pelos clientes. Assim, a venda do produto ao preço planejado fica prejudicada e o número de reclamações e de devoluções, caso o defeito não seja detectado antes da venda, aumenta significativamente.

2. O Forno

O forno em questão é do tipo "pot furnace" e é composto por um cadinho, seis resistências elétricas e material refratário envolvendo todo o sistema. O forno tem uma boca de entrada onde é adicionada a matéria prima e o vidro é retirado. Normalmente, a matéria prima é carregada no forno à tarde, é fundida durante a noite e o vidro é retirado no período da manhã do dia seguinte. Durante a fusão a temperatura do forno chega a 1450°C , mas essa temperatura varia de acordo com o tipo de vidro que está sendo fundido. Na retirada, e no processamento do vidro, a temperatura do forno é aproximadamente igual a 900°C .

O método de trabalho consiste em: o vidreiro recolhe o vidro por meio de uma vara metálica, denominada cana, e então esse vidro é depositado ou soprado dentro de um molde. O forno apresenta um sistema de controle, onde são inseridos os programas de aquecimento inicial, fusão, resfriamento e trabalho. O sensor deste forno é um termopar localizado em seu interior. Atualmente, este tipo de forno é utilizado para produzir pequenas produções de vidros especiais.

3. Matéria Prima

Normalmente, nas fábricas de vidro, a matéria prima utilizada é elaborada na própria fábrica e é comumente denominada de "batch" (batelada). O "batch" nada mais é do que uma mistura de óxidos e areias e as proporções dos componentes da mistura definem as propriedades do vidro que vai ser produzido. Todo o preparo de um "batch" deve ser realizado com matérias primas puras (no nível industrial) e com quantidades controladas já que qualquer erro ou impureza pode danificar todo o ciclo de produção [4].

A matéria prima utilizada no processo que está sendo analisado é fornecida por um produtor externo e é constituída por pequenas esferas de cor alaranjada e que apresentam diâmetro médio igual a 20 mm. Estas esferas também recebem o nome de bolas ou "pellets". Assim, a matéria prima é comprada pronta e toda uma estrutura de manuseio da matéria prima na fábrica é eliminada. Outras vantagens do uso do pellet são: o armazenamento e transporte da matéria prima se torna mais fácil, os "pellets" podem ser estocados por um tempo maior porque retêm pouca água. A desvantagem da utilização dos "pellets" é que sua composição não é controlada pelo fabricante do vidro e qualquer não uniformidade gera muitos problemas entre o fornecedor e os consumidores.

3.1. Defeitos no vidro

3.1.1. Corda

A corda é comumente definida como uma falta de homogeneidade no vidro. Suas causas mais comuns são: a variação na composição básica do vidro, uma reação química do vidro com o material do pote, uma falha na preparação da matéria prima; ou uma falta de homogeneidade de temperatura no banho de vidro fundido. O banho de vidro pode apresentar um movimento convectivo, e nestes casos, o chumbo pode decantar acarretando uma falta de homogeneidade no material retirado do forno pelo vidreiro. As cordas também podem surgir na superfície do vidro quando este está sendo processado. As cordas, do ponto de vista óptico, são zonas que apresentam índices de refração diferentes e, assim, produzem distorções da luz visível [4].



Figura 3 - Cordas no vidro [4].

3.2. Cálculo da temperatura de fusão em função da composição do vidro [5]

A temperatura de referência é a temperatura mais baixa na qual todos os grãos de areia tenham se dissolvido.

Os fatores que influenciam o cálculo da temperatura de fusão de um vidro composto por várias substâncias são inúmeros, por essa razão foi sugerida a equação a seguir.

$$T_m = 1400 + C_1P_1 + C_2P_2 + C_3P_3 + \dots C_nP_n \quad (1)$$

Onde,

T_m = a temperatura de fusão de referência.

C_1 = Constante numérica para os óxidos.

P = Porcentagem em massa do óxido.

4. Medidas tomadas.

A primeira parte do projeto foi composta pelo levantamento das propriedades do vidro, das características do forno, das complexidades do processo produtivo e dos motivos que levam a formação dos defeitos no vidro acabado. Ao mesmo tempo, algumas medidas foram tomadas para verificar algumas causas do defeito da corda.

4.1. Análise por fluorescência de raios-X

Uma das primeiras medidas adotadas para o estudo do problema foi a realização de uma análise química semiquantitativa, por fluorescência de raios-X, da matéria prima e do vidro trabalhado (a amostra do vidro trabalhado foi retirada de um lote típico).

Tabela 1 - Dados da análise química e do fornecedor de matéria prima

Análise Química			Fornecedor
Composição	Pellets (%wt)	Vidro retirado do forno (%wt)	Pellets (%wt)
SiO ₂	41,00	52,80	58
B ₂ O ₃ *	1,00	-	1
Na ₂ O	4,97	3,54	3
BaO	3,04	2,54	2
K ₂ O	15,50	10,10	11
PbO	33,40	30,10	24
Al ₂ O ₃	0,02	0,05	-
Sc ₂ O ₃	0,05	0,56	-
Fe ₂ O ₃	0,06	-	-
ZrO ₂	0,11	0,08	-
SbO ₃	0,80	0,80	-
CaO	-	0,02	-
Rb ₂ O	-	0,04	-
SrO	-	0,03	-
WO ₃	-	0,17	-

* Dado fornecido, pré-estabelecido.

Os dados da Tab. 1 mostram a composição alegada do “*pellet*”. Observe que ocorreu um transporte de massa de sílica do pote para o vidro, já que a composição do pellet continha 41% de SiO₂ e o vidro 52,80% SiO₂.

Esse ataque químico pode ser observado na foto a seguir. Durante a operação da fábrica um dos cadinhos trincou e precisou ser trocado. Foi observado um elevado grau de ataque no cadinho.



Figura 1 - Vista de um pedaço do cadinho atacado pelo vidro

Outra conclusão é a comparação dos dados fornecidos pelo fabricante da matéria prima com o obtido por meio da análise. Essa comparação mostra que a composição fornecida pelo fabricante difere muito daquela encontrada através da análise do material do “*pellet*”. Isso não indica que o problema da corda seja provocado pela natureza da matéria prima, pois o fato de o vidro ter uma composição diferente não necessariamente indica que ele venha a ter corda ou não. A corda é um defeito recorrente em todos os tipos de vidro, no entanto a programação de temperaturas do forno, como curva de fusão e temperatura de trabalho, pode não estar adequada ao que essa composição de vidro apresenta.

A temperatura de fusão fornecida pelo fabricante, e usada atualmente, é 1400°C, chegando aos 1450°C no período de refino. A temperatura calculada pelo método da temperatura de referência para a composição fornecida pelo fabricante é muito próxima daquela adotada e indicada pelo fornecedor de vidro. No entanto, a temperatura de referência calculada pela composição obtida em laboratório de uma amostra dos “*pellets*” indica que a temperatura de referência de fusão deveria ser 1277°C. Observe que este valor é menor do que o utilizado e indicado pelo fornecedor de vidro.

4.2. Modelagem e Simulação Matemática do Forno

A modelagem matemática do forno consiste na discretização e simulação da região do cadinho. Essa discretização é a implementação de uma malha de volumes finitos em coordenadas cilíndricas na região do cadinho, considerando tanto a parede do refratário como o vidro já fundido. Essa malha criada será implementada no programa Scilab.

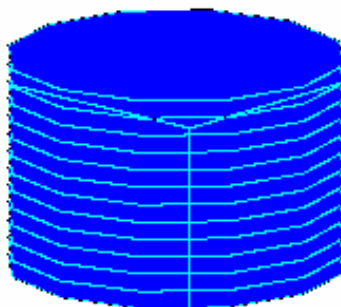


Figura 2 - Malha gerada no Scilab

No programa o cadinho foi considerado adiabático. As trocas de calor ocorrem apenas no topo da malha, na sua área exposta às resistências, e dentro do próprio cadinho. Nas bordas laterais e no fundo a troca de calor foi considerada desprezível.

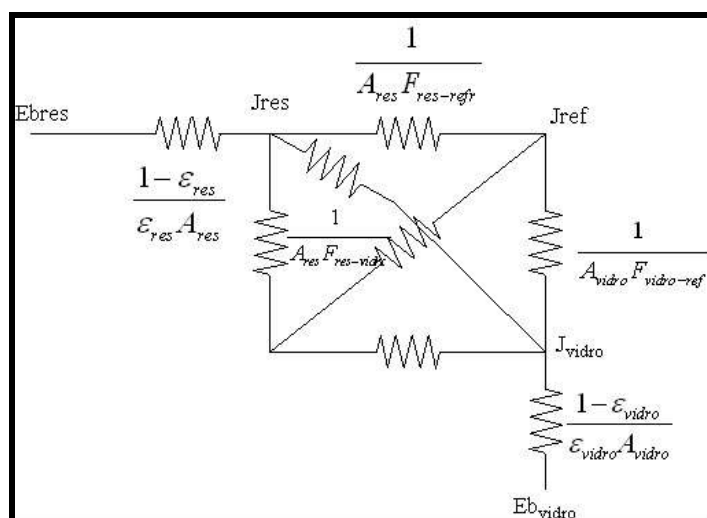


Figura 3 - Circuito Térmico para Radiação

Tabela 4.2.1 - Características resistências

Resistência	
número	6
d(m)	1,00E-02
L(m)	1,10E+00
Area de resistência(m)	2,07E-01

Tabela 4.2.2 - Propriedades: Radiação

Propriedades de radiação	
ϵ_{vidro}	0,9
ϵ_{res}	0,9
F _{vidro-res}	0,05
F _{vidro-ref}	0,85
F _{res-ref}	0,92

4.2.1. Simulação com Radiação e Condução.

O gráfico a seguir é resultado de três simulações, uma de 46800s, outra de 28800s e uma terceira de 3600s, e mostra como a temperatura é afetada de acordo com o tempo de simulação. A distribuição de temperatura na simulação de 3600s é muito similar à distribuição de temperatura apenas considerando a condução. Uma temperatura alta no topo, que cai drasticamente ao longo da coordenada z. Já com a simulação de 46800s a mudança de temperatura é muito mais suave. Embora a condução seja lenta ela existe e alguma hora a temperatura tende ao completo equilíbrio.

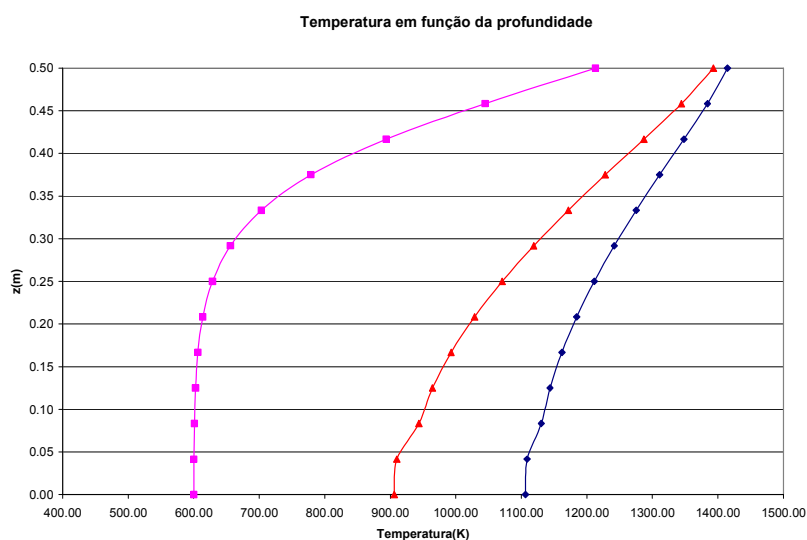


Figura 4 - Distribuição de temperatura em função da temperatura para diversos tempo de simulação

4.2.2. Porta Aberta

Nessa simulação será considerada uma perda de calor para a porta. O gráfico mostrado abaixo apresenta a distribuição de temperatura para o caso onde a porta ficou aberta por dez minutos. Observa-se que a primeira camada é levemente afetada (o ponto 0.25 é o que está mais próximo à porta). Deixar a porta aberta durante 10 min é um caso extremo e que dificilmente ocorre na fábrica, pois o vidreiro recolhe um tarugo de vidro e rapidamente fecha a porta do forno, por meio de um pedal que controla um sistema pneumático. Portanto mesmo com a porta aberta não há grande variação de temperatura dentro do cadinho.

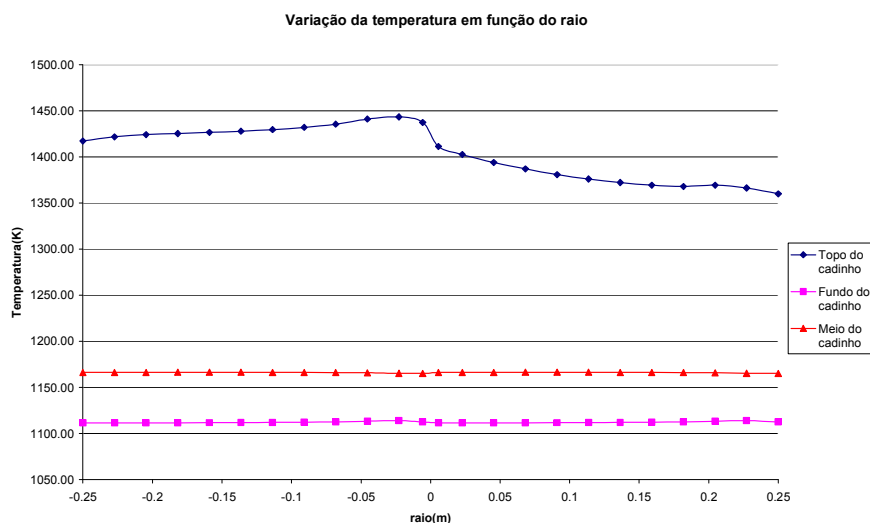


Figura 5 - Distribuição de temperatura do cadinho em função do raio considerando a porta aberta durante 10 min

5. Conclusão:

Diversas etapas foram seguidas para a análise do problema do defeito de corda nas peças produzidas pela fábrica de cristal. Primeiro se iniciou um estudo das causas mais recorrentes das cordas na indústria vidreira: falta de homogeneidade da matéria-prima, falta de homogeneidade térmica dentro do cadinho, contaminação do vidro pelo cadinho.

A primeira etapa do estudo da causa do defeito foi uma análise semiquantitativa por fluorescência de raios-X que indicou uma composição de matéria prima diferente da que era anunciada pelo fabricante, que acarretava em uma temperatura de fusão praticada mais alta do que a recomendada, houve também transporte de massa de SiO_2 do cadinho para o vidro. A segunda etapa foi um modelo matemático e simulação do forno. As primeiras simulações consideravam apenas o efeito de condução e indicam que o forno tem uma inércia muito grande para que toda a temperatura se homogeneizasse no interior do cadinho. Um comentário importante para essa observação é que a fusão do vidro ocorre de forma gradual, ou seja, a matéria prima é adicionada aos poucos. O cadinho é carregado com uma pequena massa de pellet, espera-se um tempo para que eles fundam e então uma nova carga é adicionada, sucessivamente até que o pote esteja cheio. Com a implementação do efeito de radiação observou-se que a temperatura se homogeneizava de acordo com a passagem do tempo de simulação (figura 4). Após isso foi implementada uma simulação de um caso crítico, deixando-se a porta do forno aberta durante 10min. Observou-se que a temperatura permanece pouco alterada (figura 5).

Conclui-se então que o defeito de corda no vidro não foi causado pela não uniformidade de temperatura no cadinho.

Portanto a causa do defeito é a contaminação do vidro pelo cadinho. Durante a operação da fábrica o cadinho precisou ser substituído, optando-se então por um de diferente fornecedor, resultando em uma melhora significativa do vidro, pois o problema da corda foi eliminado.

6. Referência:

1. NEWTON, R.; DAVISON, S., "*Conservation of Glass*"; BUTTERWORTH-HEINEMANN LTD, 1989
2. RAWSON, H.; "*Glasses and their applications*" THE INSTITUTE OF METALS, EUA, 1991
3. GUSHCHIN, S.N.; LISIENKO, V.G.; KUT'IN, V.B.; BODNAR, P.N.; "*Improvement of operation of open flame glass-melting furnaces(a review)*" GLASS AND CERAMICS, Vol 58, Nos1-2, 2001.
4. PFAENDER, H.G.; SCHROEDER, H.; "*Schott Guide to Glass*" VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY, New York, 1983.
5. CHENGYU, W.; YING, T.; "*Calculation of the melting temperatures of silicate glasses*" GLASS TECHNOLOGY, Vol 24, Nos5, October 1983.
6. CALLISTER, W.D. JR.; "*Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução*". LTC EDITORA, RJ, 2002

8. Direitos autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

ANALYSIS AND SIMULATION OF A GLASS FURNACE

Mauricio Radino Rouse
mauricio.rouse@gmail.com

Euryale de Jesus Zerbine
ejzerbini@yahoo.com

This paper presents the study of a pot glass furnace installed in a factory located in the city of Sao Paulo. After the start up it was noticed an optical defect on the glass surface, named cord (striae), occurring in a very high fashion. These superficial defects are zones of glass of different refractive indexes. Their usual causes are: lack of homogeneity in the raw material, chemical attack by the pot to the melt, lack of thermal homogeneity in the melt. For the analyses of the problem some measures were taken: semi-quantitative analyses by X-ray fluorescence on samples of the pellets and of the glass produced in the furnace, calculation of the melting temperature given by the composition resulted from the analysis and also a mathematical modeling simulating the region of the pot, in cylindrical coordinates, in different conditions. It was observed that the composition of the pellets supplied by the manufacturer is somewhat different from the one obtained from the experimental analysis. The melt temperature of the glass, calculated by its composition obtained by the chemical X ray fluorescence results suggest that the melt temperature in the furnace should be lower. Another conclusion from the analysis was that a mass transport of SiO_2 occurred from the pot to the glass. The conclusions obtained from the mathematical modeling were: the furnace has a big inertia for conduction heat transfer and also that there are no lack of temperature homogeneity in the melt, eliminating this possibility to be the cause of the cord. The solution for the cord problem was the replacement of the pot, confirming the initial suspect that the cord was caused by the contamination of the glass by the material of the pot.

Keywords: Blown glass (defect), Electric Furnace, Heat Transfer.