

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE FORNO ELÉTRICO DE FUSÃO
DE VIDRO**

Maurício Radino Rouse

**São Paulo
2006**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE FORNO ELÉTRICO DE FUSÃO
DE VIDRO**

**Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia**

Maurício Radino Rouse

Orientador: Prof. Dr. Euryale de
Jesus Zerbini

Área de concentração:
Engenharia Térmica;
Transferência de calor.

**São Paulo
2006**

FICHA CATALOGRÁFICA

Rouse, Maurício Radino

**Análise e simulação de forno de fusão de vidro / M.R. Rouse.
-- São Paulo, 2006.**

65 p.

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1.Vidro soprado (Defeito) 2.Forno elétrico 3.transferência de
calor I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departa-
mento de Engenharia Mecânica II.t.**

RESUMO

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 a distribuição de temperatura no cadinho é bastante uniforme. A solução obtida foi a troca do cadinho, confirmando a suspeita inicial que a corda foi causada pela contaminação do vidro pelo cadinho.

ABSTRACT

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.

SUMÁRIO

RESUMO.....	4
ABSTRACT	5
SUMÁRIO.....	6
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS.....	9
1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA:.....	10
2. A FÁBRICA:.....	11
2.1. O FORNO.....	10
2.1.1. O cadinho:	12
2.1.2. Resistência elétrica:	13
2.1.3. Matéria Prima.....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:.....	15
3.1. VIDRO.....	15
3.2. VISCOSIDADE.....	16
3.3. CONFORMAÇÃO DO VIDRO.....	19
3.4. DEFEITOS NO VIDRO.....	21
3.4.2. Marcas de Forma	21
3.4.3. Pedras.....	22
3.5. CÁLCULO DA TEMPERATURA DE FUSÃO EM FUNÇÃO DA COMPOSIÇÃO DO VIDRO..	22
3.6. MODELO MATEMÁTICO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM FORNOS DE VIDRO.....	24
3.7. EQUAÇÕES DAS DIFERENÇAS FINITAS (O MÉTODO DO BALANÇO DE ENERGIA). [7]	27
3.8. RADIAÇÃO	29
3.8.1. Emissão (E)	29
3.8.2. Irradiação(G)	30
3.8.3. Radiosidade(J).....	30
3.8.4. Radiação do Corpo Negro.....	30
3.8.5. Lei de Stefan-Boltzmann.....	30
3.8.6. Propriedades da Radiação	31
3.8.7. Troca de calor por radiação térmica entre duas superfícies.	32
4. MEDIDAS TOMADAS:.....	33
5. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO FORNO:	38
5.1. MODELAGEM MATEMÁTICA DO FORNO.	39
5.2. SIMULAÇÕES.....	43
5.2.1. Teste.....	44
5.2.2. Tranco.....	44
5.2.3. Radiação.....	46

5.2.4. Porta Aberta	50
6. CONCLUSÃO:	52
7. CRONOGRAMA:	54
8. BIBLIOGRAFIA:	55
ANEXO A.....	56
<i>Linha de programação.....</i>	<i>56</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Vasos produzidos e lapidados.....	10
Figura 2.1 - Retirada do vidro do forno.....	11
Figura 2.2 - Preparação para a forma("Bolinha").....	11
Figura 2.3 - Sopragem do vidro na forma de ferro fundido	10
Figura 2.4 - Após a passagem pela forma	10
Figura 2.5 - Vista em corte do forno	12
Figura 2.6 - Cadinho de 80L, idêntico ao utilizado no forno.	13
Figura 3.1 - Gráfico da temperatura em função do volume específico [6].....	15
Figura 3.2 - Gráfico da viscosidade em função da temperatura (Corning)[2].....	18
Figura 3.3 - Gráfico da viscosidade em função da temperatura para um vidro 24%PbO	19
Figura 3.4 - Cordas no vidro[4].	21
Figura 3.5 - Constantes para a equação da temperatura de referência em função do teor de cada componente no vidro[5].	24
Figura 3.6 - Exemplo do modelo por zona de um forno de vidro para fabricação de garrafas[3]	26
Figura 3.7 - Condução para o nó interno a partir de nós adjacentes.....	29
Figura 3.8 - Propriedades da Radiação	31
Figura 3.9 - Analogia Elétrica	32
Figura 4.1 - Curva de fusão fornecida pelo fabricante da matéria prima	36
Figura 4.2 - Foto superior de um pedaço do cadinho atacado pelo vidro.....	37
Figura 4.3 - Foto frontal de um pedaço do cadinho atacado pelo vidro	37
Figura 5.1 - Vista isométrica do cadinho.....	39
Figura 5.2 - Vista superior da malha do cadinho desenhada no Solid Works.....	40
Figura 5.3 - Vista superior obtida por meio do Scilab.....	41
Figura 5.4 - Malha 3d obtida no programa Scilab	41
Figura 5.5 - Elemento da malha de volumes finitos	42
Figura 5.6 - Gráfico de z em função da temperatura.	44
Figura 5.7 - Gráfico do perfil de temperatura em função da profundidade do cadinho para a temperatura inicial do banho a 600°C e tranco de 1500°C.	45
Figura 5.8 - Circuito equivalente - Radiação.....	46

Figura 5.9 - Temperatura em função do raio(3600).	48
Figura 5.10 - Comparação da variação da temperatura em função da profundidade com diferentes tempos de simulação.	49
Figura 5.11 - Temperatura em função do raio(46800)	50
Figura 5.12 - Temperatura em função do raio para porta aberta durante 10 min.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química - Cadinho	13
Tabela 4.1 - Resultados da análise.....	33
Tabela 4.2 - Composição fornecida pelo fabricante da matéria prima.....	34
Tabela 4.3 - Temperatura de referência de fusão	35
Tabela 5.1 - Medidas do Cadinho.....	43
Tabela 5.2 - Propriedades dos materiais(manual da GE)	43
Tabela 5.3 - Características resistências	46
Tabela 5.4 - Propriedades: Radiação	46

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 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.



Figura 1.1 - Vasos produzidos e lapidados

2. A FÁBRICA:

A fábrica é um pequeno *"glass studio"* com a produção diária de aproximadamente 120 kg de vidro em um forno elétrico do tipo *"pot furnace"*. O processo de fabricação das peças é artesanal. O vidro é soprado individualmente dentro de formas de ferro fundido, ou moldado livremente, utilizando apenas a técnica do vidreiro. Após a sopragem das peças estas são colocadas dentro de um forno de recozimento para que sejam resfriadas até a temperatura ambiente, para que suas tensões residuais sejam eliminadas.



Figura 2.1 - Retirada do vidro do forno



Figura 2.2 - Preparação para a forma("Bolinha")



Figura 2.3 - Sopragem do vidro na forma de ferro fundido



Figura 2.4 - Após a passagem pela forma

2.1. O Forno

O forno em questão é do tipo "*pot furnace*" e é composto por um cadinho, 6 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. O processo de enforma funciona da seguinte maneira: o forno é programado para atingir a temperatura de fusão do pellet. Uma primeira carga da matéria prima é então adicionada, espera-se um tempo, normalmente duas horas, até que o conteúdo esteja fundido, esse processo é repetido inúmeras vezes até que o pote esteja cheio. O vidro é então 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 varia de 900°C-1100°C, dependendo do tipo de trabalho que será realizado no dia.

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.

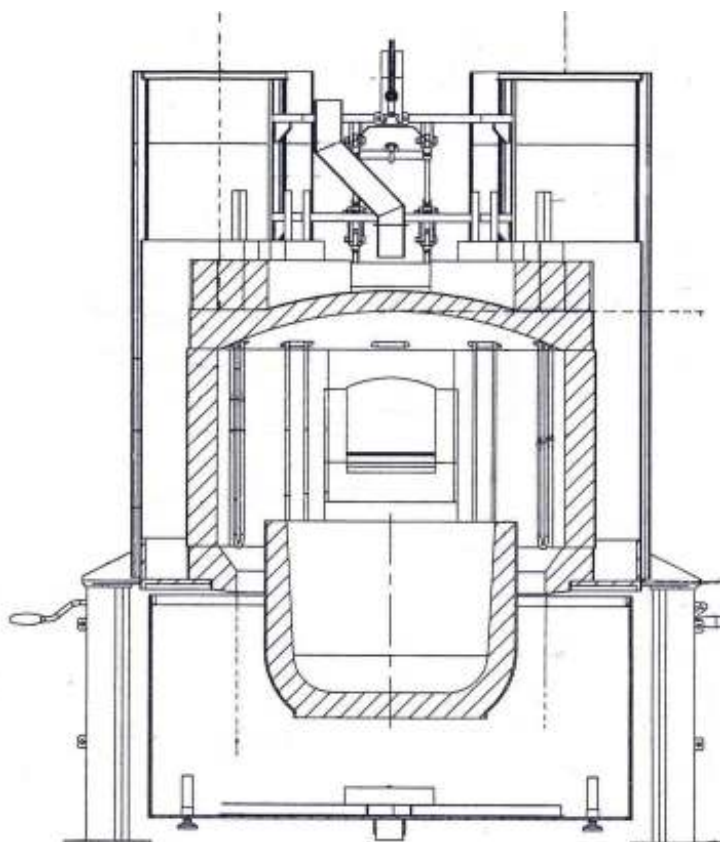


Figura 2.5 - Vista em corte do forno

2.1.1. O cadinho:

É a peça refratária onde é depositada a matéria prima para que vidro seja fundido. É também conhecido como o coração do forno e é composto basicamente de alumina e sílica. O cadinho fica localizado sobre uma base de tijolos refratários no centro do forno.

O cadinho deve ser trocado periodicamente, e seu primeiro aquecimento deve ser feito de forma extremamente lenta para que não ocorram trincas e o vidro não venha a vaziar posteriormente. A composição química do cadinho utilizado é descrita a seguir.

Tabela 2.1 - Composição química - Cadinho

Cadinho	
Descrição	Silimanita
Composição Química	
SiO ₂	41
TiO ₂	0,05
Fe ₂ O ₃	0,7
Al ₂ O ₃	55,5
K ₂ O+Na ₂ O	1,65

**Figura 2.6** - Cadinho de 80L, idêntico ao utilizado no forno.

2.1.2. Resistência elétrica:

O uso de resistências elétricas para a fusão de vidro remonta para o início do século XX. As vantagens do uso da eletricidade são que ela não ataca o meio ambiente no local de consumo, não adiciona impurezas ao vidro e necessita de menor investimento e custos de manutenção [4]. Fornos de fusão de vidro elétricos são muito mais econômicos quando a produção de vidro é pequena [4]. O forno em questão é composto por 6 resistências elétricas, em formato de "U", disposta na lateral do forno,

em toda sua extensão, compostas de "cermet", um material que é composto basicamente de MoSi_2 e componente óxidos principalmente uma fase vítrea.

2.1.3. 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, na forma de areia 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 tornam mais fáceis, os "*pellets*" podem ser estocados por um tempo maior porque retém 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. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:

3.1. Vidro

Os vidros são um grupo familiar de materiais cerâmicos. São silicatos não cristalinos que também contém outros óxidos, notavelmente CaO , Na_2O , K_2O , e Al_2O_3 . As duas principais características dos vidros são a sua transparência ótica e a relativa facilidade com a qual eles podem ser moldados quando aquecidos.

Os materiais vítreos ou não cristalinos não se solidificam a uma temperatura constante. A medida com que a temperatura vai aumentando o vidro se torna cada vez menos viscoso, não existindo uma temperatura definida na qual o líquido se transforma em um sólido. O volume diminui continuamente com a diminuição da temperatura, ocorrendo apenas uma pequena mudança na inclinação da curva, que é conhecida como temperatura de transição vítrea.

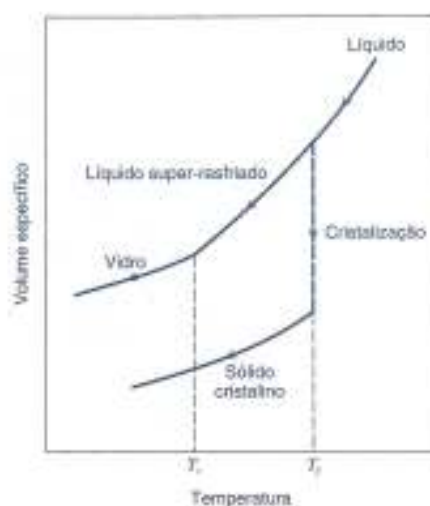


Figura 3.1 - Gráfico da temperatura em função do volume específico [6].

3.2. Viscosidade

O vidro é sempre denominado como um material sólido à temperatura ambiente. No entanto, o vidro se torna um fluido viscoso a temperaturas mais altas (900°C) e pode ser trabalhado de inúmeras formas. A viscosidade de um fluido é uma medida de sua resistência ao fluxo. Os vidros são muito mais viscosos que os líquidos usuais e uma caracterização de sua viscosidade depende de inúmeras variáveis [1]. As variáveis que influem mais significativamente na determinação da viscosidade dos vidros na fase líquida são a composição do vidro e a temperatura.

O modo de variação da viscosidade de um vidro fundido com a temperatura também é de extrema importância em todos os processos relacionados à fabricação do vidro. Alguns pontos operacionais médios normalmente encontrados são:

- Ponto de deformação: Temperatura na qual a viscosidade é $10^{13,5}$ Pa.s. Nessa temperatura qualquer tensão interna é reduzida significativamente em questão de horas [2].
- Ponto de recozimento: Temperatura na qual a viscosidade é 10^{12} Pa.s. Nessa temperatura qualquer tensão interna é reduzida em questão de minutos [2].
- Ponto de amolecimento: temperatura na qual a viscosidade é $10^{6,5}$ Pa.s. Nessa temperatura o vidro deformará rapidamente apenas com seu próprio peso [2].
- Ponto de operação: temperatura na qual a viscosidade é 10^3 Pa.s. O vidro é facilmente deformado nessa viscosidade [6].
- Ponto de fusão: Corresponde à temperatura na qual a viscosidade é 10 Pa.s; o vidro é líquido o suficiente para ser considerado um líquido [6].

A viscosidade varia significativamente com a temperatura e isto ocorre com maior intensidade quando a temperatura é mais baixa. A Figura. 3.2 mostra que alguns tipos de vidro apresentam variação de viscosidade em função da temperatura mais

rapidamente do que outros. Uma maior inclinação na curva viscosidade–temperatura pode ser uma vantagem quando se necessita de um processo de fabricação que seja mais rápido.

Para muitos tipos de vidros, a variação da viscosidade, η , com a temperatura, T , é bem representado pela equação de Fulcher [2]:

$$\eta = Ae^{(B/(T-T_0))} \quad (1)$$

Onde,

- A , B e T_0 são constantes para cada composição de vidro.

O Vidro-sílica tem a maior viscosidade para uma dada temperatura que qualquer outro vidro comercial disponível. A adição de pequenas porcentagens de alguns óxidos alcalino metálicos reduz drasticamente a viscosidade. No vidro em questão, a redução da viscosidade e principalmente a redução na inclinação da curva são características importantíssimas para o processo produtivo.

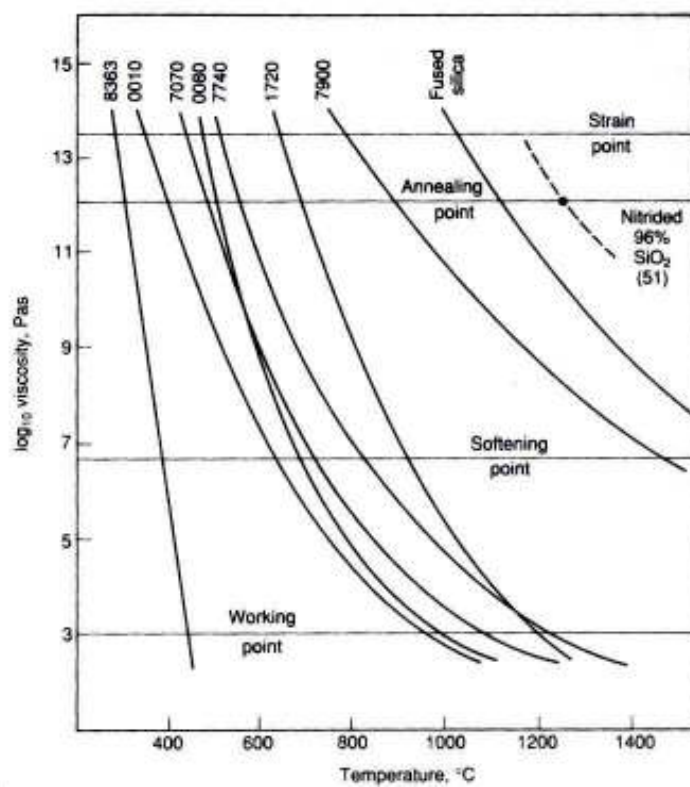


Figura 3.2 - Gráfico da viscosidade em função da temperatura (Corning)[2].



Figura 3.3 - Gráfico da viscosidade em função da temperatura para um vidro 24%PbO

A comparação entre as figuras 3.2 e 3.3 mostra que a inclinação da curva viscosidade em função da temperatura para um vidro com 24% PbO é muito mais suave que para outros vidros comerciais. A temperaturas mais baixas, o cristal de chumbo apresenta uma viscosidade menor e portanto é mais fácil de ser trabalhado pelo vidreiro. Nota-se também um maior intervalo de temperatura, entre 700°C e 1050°C, para uma baixa mudança na viscosidade, isto possibilita um maior tempo para o vidreiro, desde a retirada do vidro líquido do forno de fusão até a entrada no forno de recozimento. Este tempo é denominado tempo de trabalho e é a subtração da temperatura de trabalho com a temperatura de amolecimento.

3.3. *Conformação do Vidro*

O vidro é produzido pelo aquecimento da matéria prima até uma temperatura elevada, acima da qual ocorre a fusão. A homogeneidade é atingida através da fusão e da mistura completa dos produtos.[6]

Quatro diferentes métodos são utilizados na conformação do vidro:

- Prensagem

Utilizada na fabricação de peças com paredes relativamente espessas, como por exemplo, pratos e louças. A peça de vidro é conformada dentro de um molde, normalmente de ferro fundido, revestido com grafita, com a forma desejada. O molde deve ser pré-aquecido para que não ocorram imperfeições na peça. Caso isso não seja feito a peça fica com um aspecto enrugado, pois o vidro esfria e estaciona naquela parte do molde, uma camada superior recobre, e esfria logo em seguida e assim sucessivamente. Usualmente o molde é aquecido pelo próprio vidro, não utilizando as primeiras peças moldadas [6].

- Estiramento

Utilizado para conformar longas peças de vidro, como lâminas, barras, tubos e fibras, as quais possuem uma seção reta constante [6].

- Laminação a quente

É o processo de fabricação do vidro plano [6].

- Insuflamento

O processo de sopro ou insuflamento é o adotado na fábrica, onde as peças são sopradas individualmente dentro de moldes de ferro fundido. No entanto, esse processo foi completamente automatizado para a produção de jarras, garrafas, e lâmpadas de vidros em larga escala [6]. O processo utilizado no sopro é o seguinte: O vidreiro recolhe um tarugo de vidro, e o prepara, formando uma pequena bola. Em seguida ele volta ao forno e recobre essa bola com uma camada de vidro, assim é formado o "gelo" (o fundo espesso de peças de vidro) e as laterais do objeto, sendo então soprado dentro de uma forma.

3.4. Defeitos no vidro

Os defeitos descritos abaixo são aqueles que ocorrem com maior frequência na fábrica, não são todos os defeitos recorrentes em vidro.

3.4.1. 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 3.4 - Cordas no vidro[4].

3.4.2. Marcas de Forma

As marcas de forma, ou riscos de formas são decorrentes de imperfeições na forma de ferro fundido.

3.4.3. Pedras

Quando o forno é aquecido todos os refratários se expandem e alguns fragmentos se soltam contaminando o vidro. Quando o vidro é retirado algumas pedras vêm juntas. Pedra pode ser também resultado do tamanho do grão da matéria prima ser muito grande, ou uma temperatura insuficiente na fusão.

3.5. *Cálculo da temperatura de fusão em função da composição do vidro*

Segundo Chengyu e Ying (1982) como o vidro é um estado não cristalino ele não apresenta uma temperatura de fusão definida. A definição da ASTM diz: a temperatura de fusão do vidro é o intervalo de temperaturas do forno no qual o melt tem uma viscosidade entre 10 a 10^5 Pa.s. Essa definição é o que acontece na maioria das vezes. Enquanto viscosidade é um fator importantíssimo no processo de fusão não é o único e a viscosidade de vidros de baixa viscosidade (como por exemplo o usado, com chumbo) pode ser reduzida para valores mais baixos de 10^2 Pa.s e mesmo assim alguns grãos de areia ainda continuarem não dissolvidos depois de muito tempo de fusão. Isso resulta que uma fusão satisfatória pode não ser atingida mesmo que o critério da viscosidade seja atingido. A temperatura atual de fusão do vidro de sílica é de $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, com uma viscosidade de 5×10^5 Pa.s, muito maior que o 10^2 Pa.s mencionado acima. Esse fato mostra que a temperatura de fusão não é apenas função da viscosidade mas sim influenciado por diversos fatores. Chengyu e Ying definem três temperaturas de fusão no trabalho relatado. A teórica, a prática e a temperatura de referência.

A temperatura teórica é igual ao ponto de fusão termodinâmico. A variação de entalpia e entropia que ocorre durante a mudança de fase é aplicada no cálculo da temperatura de fusão de um vidro formado por um único componente. Esse cálculo não é satisfatório pois a aquisição de dados de entalpia e temperatura não é fácil, além do que o vidro é composto por diversos componentes.[5]

A temperatura de fusão prática é baseada na experiência e é determinada não só pela composição mas também por outros fatores, como matéria-prima, tamanho de grão, constituintes do "batch", quantidade e tamanho dos cacos. Por isso essa temperatura não é adequada para algum cálculo e apenas serve como um marco para as experiências [5].

Para a obtenção da temperatura de referência fez-se necessário a realização de experimentos para a obtenção da temperatura de referência: Um batch com 20g de compostos químicos puros foi preparado em um cadinho dentro de um forno elétrico, aquecido, por um período de 2h, até uma temperatura de teste e mantida essa temperatura por um período de 45 min. A temperatura de referência é a temperatura mais baixa na qual todos os grãos de areia tenham se dissolvido.[5]

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.[5]

$$T_m = 1400 + C_1 P_1 + C_2 P_2 + C_3 P_3 + \dots C_n P_n \quad (2)$$

Onde,

T_m = a temperatura de fusão de referência.

C_1 = Constante numérica para os óxidos.

P = são as quantidades, em porcentagem em massa do óxido.

<i>Oxide</i>	<i>Numerical constant and content</i>		
SiO_2	3.6(> 75%) 5.1(50–60%)	3.6(70–75%) 5.5(40–50%)	4.4(60–70%) 5.9(30–40%)
Al_2O_3	3.0(> 20%) 6.0(5–10%)	4.5(15–20%) 6.5(< 5%)	5.5(10–15%)
B_2O_3	–5.0(> 15%)	–6.0(15–10%)	–7.0(< 10%)
CaO	–5.0		
MgO	–3.0		
PbO	–3.5(> 60%)	–4.0(15–60%)	–3.5(< 15%)
BaO	–3.0(> 15%)	–3.9(10–15%)	–4.5(< 10%)
ZnO	–5.0(> 5%)	–3.5(< 5%)	
SrO	–5.0		
Li_2O	–12.0		
Na_2O	–10.0(> 15%)	–11.0(< 15%)	
K_2O	–9.0(> 15%)	–10.0(5–15%)	

Figura 3.5 - Constantes para a equação da temperatura de referência em função do teor de cada componente no vidro[5].

3.6. Modelo matemático da transferência de calor em fornos de vidro.

Segundo Gushchin et.al (2001), a transferência de calor que ocorre em fornos de fusão depende de um número muito grande de fatores: desenho do forno, queimadores, tipo de combustível, e parâmetros de regime etc. [3].

Na opinião do autor, uma abordagem eficiente inclui uma combinação de estudos de engenharia térmica de fornos industriais e o desenvolvimento de um modelo matemático de transferência de calor nas áreas de trabalho dos fornos, o local onde a matéria prima é fundida. Com essa modelagem fez-se necessário a produção de experimentos para coletar dados e assim conseguir condições de contorno para desenvolver o modelo, bem como dados para assegurar a adequação do modelo com o problema real de transferência de calor [3].

As condições de contorno selecionadas foram as seguintes:

- Temperatura das paredes internas do forno.

- A temperatura dos absorvedores de calor, como o vidro e a porta.
- O consumo de eletricidade e a distribuição das resistências.

Foi medida também a temperatura de escape dos gases, e também a temperatura captada pelos sensores de controle, como os termopares.

Os cálculos analíticos feitos com modelos matemáticos resultam em uma base para uma avaliação qualitativa e quantitativa para a modificação estrutural da área de trabalho do forno, ou mudanças significativas no regime empregado, que usualmente, não podem ser mudados na prática por meio de experiências, já que sempre existe o risco de algum erro ocorrer e a perda no forno ser muito grande. A certeza nos resultados obtidos depende na precisão com que a transferência de calor é modelada matematicamente, e a aquisição correta dos dados nas condições de contorno.[3]

No final de 1960 o método de cálculo por zonas foi desenvolvido, e segundo esse método a área de trabalho do forno é subdividida em n áreas superficiais e m áreas volumétricas, e uma equação não linear é escrita para o balanço térmico e transferência de calor.

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j \\ j=1,2,\dots,n+m}}^{n+m-1} A_{ij} \sum T_i^4 - A_j \sum T_j^4 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{l_i} g_{ij} T_i - g_j T_j - Q_j = 0 \quad (3)$$

Essa forma de escrever a equação foi primeiramente proposta por Lisienko. As duas primeiras somas nessa equação constituem o fluxo de calor por radiação Q_{rj} para a zona j igual a diferença entre o calor absorvido pela área j citada em consequência da radiação transferida das outras áreas i (Q_{abj}) e a própria radiação da zona j .

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j \\ j=1,2,\dots,n+m}}^{n+m-1} A_{ij} \sum T_i^4 - A_j \sum T_j^4 = Q_{rj} = Q_{abj} - Q_{prj} \quad (4)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{li} g_{ij} T_i - g_j T_j \quad (5)$$

A terceira e quarta somas representam o valor do fluxo de calor resultante da zona j com as zonas adjacentes i , como consequência da transferência de calor pelo meio que se move, ou seja transferência de calor por convecção, e a transferência de calor pelas superfícies. Com esse objetivo os coeficientes de transferência de massa e de calor convectivo são introduzidas na equação 3 [3].

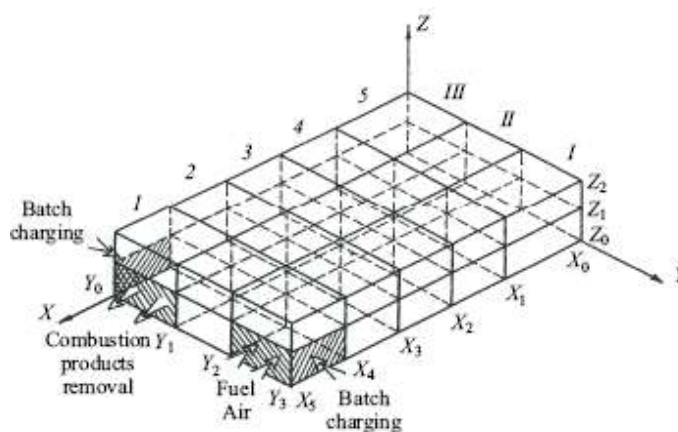


Figura 3.6 - Exemplo do modelo por zona de um forno de vidro para fabricação de garrafas[3]

A experiência acumulada pelos autores indica que o desenvolvimento correto dos modelos representa o modelo real adequadamente, e pode ser usado em estudos detalhados e estimativas do funcionamento do forno.[3]

As informações obtidas nos processos térmicos refletem muito mais completas e corretamente a situação real dentro da região de fusão do que as medições executadas em fornos operando. Essas informações são necessárias para a obtenção de dados no estado atual do forno, e esses dados serão usados como condição de contorno no modelo matemático.[3]

O objetivo principal desse estudo é a transferência de calor externa na área de trabalho do forno. A possibilidade da solução de problemas de transferência de calor

externos permite uma melhor abordagem em problemas de transferência de calor internos, como por exemplo: fusão da matéria prima, aquecimento do vidro fundido, movimentos convectivos dentro do vidro fundido [3] .

Esse modelo tem como objetivo propor modificações em projeto e regimes térmicos em fornos de fusão de vidro para assim obter uma melhora na qualidade dos produtos e uma melhor eficiência térmica.

O modelo que será implementado no trabalho utiliza como base o método das áreas, e o modelo do forno será 3D. No entanto será considerado todo o vidro como fundido e o processo de fusão não será analisado.

3.7. Equações das diferenças finitas (O método do balanço de energia). [7]

Quando a solução desejada não pode ser obtida por via analítica, é necessária a utilização de um procedimento numérico, como o método das diferenças finitas, de solução.

Diferentemente da solução analítica , que permite uma solução para qualquer ponto, a solução numérica permite apenas a determinação da temperatura em pontos discretos. O primeiro passo da solução numérica deve ser, portanto a seleção desses pontos. Isso é feito subdividindo-se o meio de em um número de pequenas regiões. No forno em questão, o cadinho foi dividido em treze partes iguais na altura, doze no raio e doze no ângulo. A seleção dos pontos nodais é raramente arbitrária, dependendo muitas vezes de questões como conveniência geométrica e a precisão desejada. A precisão numérica dos dados depende intensamente do número de pontos nodais designados [7].

A equação das diferenças finitas para um nó pode ser obtida aplicando-se a conservação de energia a um volume de controle em torno da ponto nodal. Para as condições de regime estacionário com geração a equação apropriada é a seguinte:

$$\dot{E}_m + \dot{E}_g = 0 \quad (6)$$

Considere a aplicação da equação 6 em um volume de controle em torno de um nó interno (m, n) da Figura 3.7. Para condições bidimensionais, a troca de energia é influenciada pela condução entre m, n e seus quatro nós adjacentes, bem como pela geração. Assim a equação 6 reduz-se a

$$\sum_{i=1}^4 q_{(i) \rightarrow (m,n)} + \dot{q}(\Delta x \bullet \Delta y \bullet 1) = 0 \quad (7)$$

Onde i se refere aos nós adjacentes, $q_{(i) \rightarrow (m,n)}$ é a taxa de condução entre os nós, considerando a profundidade unitária. Para avaliar os termos da taxa de condução, consideramos que a transferência de calor por condução ocorre exclusivamente através das faixas que são orientadas na direção x ou y. Formas simplificadas da lei de Fourier podem portanto ser utilizadas. Um exemplo seria então

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y \bullet 1) \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (8)$$

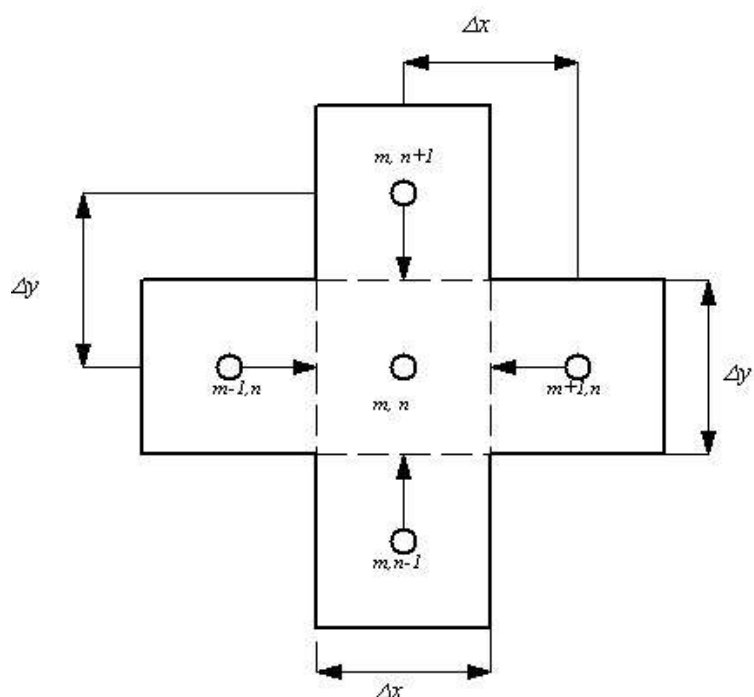


Figura 3.7 - Condução para o nó interno a partir de nós adjacentes.

A grandeza $(\Delta y.1)$ é a área da transferência de calor e o termo $(T_{m-1,n}-T_{m,n})/\Delta x$ é a aproximação por diferenças finitas do gradiente de temperatura no limite entre os nós. Esse procedimento é adotado para cada nó e até as condições de contorno nas bordas do volume de controle.

3.8. Radiação

Serão apresentados apenas os conceitos fundamentais do efeito de radiação

3.8.1. Emissão (E)

O conceito de poder emissivo é introduzido para quantificar a quantidade de radiação emitida por unidade de área de superfície. O poder emissivo hemisférico

espectral E_λ é definido como a taxa na qual a radiação de comprimento de onda λ é emitida em todas as direções a partir de uma superfície por unidade de comprimento onda $d\lambda$ em torno de λ e por unidade de área da superfície.

3.8.2. Irradiação(G)

Irradiação é definida como a taxa na qual a energia radiante de comprimento de onda λ é incidente a partir da direção (θ, Φ) , por unidade de área da superfície interceptadora normal a essa direção, por unidade do ângulo sólido em torno dessa direção e por unidade do intervalo de comprimento de onda $d\lambda$ em torno de λ . A irradiação espectral, G_λ , é definida como a taxa na qual a radiação de comprimento de onda λ é incidente em uma superfície, por unidade de área da superfície e por unidade do intervalo de comprimento de onda $d\lambda$ em torno de λ .

3.8.3. Radiosidade(J)

Esse último item leva em conta toda a energia radiante que deixa a superfície. É definida como a taxa na qual a radiação de comprimento de onda λ deixa a área unitária da superfície por unidade de área da superfície e por unidade do intervalo de comprimento de onda $d\lambda$ em torno de λ .

3.8.4. Radiação do Corpo Negro

Um corpo negro é um corpo que emite e absorve, a qualquer temperatura, a máxima possível radiação térmica em qualquer comprimento de onda

3.8.5. Lei de Stefan-Boltzmann

O poder emissivo de um corpo negro, E_b , pode ser representado por:

$$E_b = \sigma T^4$$

(9)

onde a constante de Stefan-Boltzmann possui o valor de $\rho=5,670 \times 10^{-8}$. Este resultado permite o cálculo da radiação total emitida em todas as direções e sobre todos os comprimentos de onda a partir, simplesmente, do conhecimento da temperatura de corpo negro.

3.8.6. Propriedades da Radiação

Quando a energia radiante atinge uma superfície real, parte é refletida, parte é transmitida e parte é absorvida.

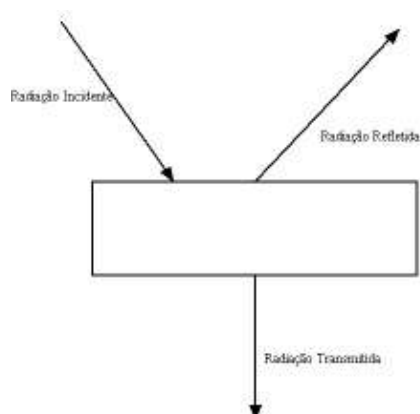


Figura 3.8 - Propriedades da Radiação

Define-se então:

ρ - Refletividade

α - Absortividade

τ - Transmissividade

De forma que

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (10)$$

3.8.7. Troca de calor por radiação térmica entre duas superfícies.

Considerando duas superfícies paralelas, o fluxo líquido de calor será representado por:

$$Q_{1-2} = (J_1 - J_2)A \quad (11)$$

considerando que as duas superfícies sejam paralelas e com mesmas áreas. Considerando também que ambas as superfícies são negras e utilizando a lei de Stefan-Boltzmann, concluímos que:

$$Q_{liq} = \frac{E_n - J}{\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon A}} \quad (12)$$

Assim as equações 11 e 12 foram um sistema de duas equações e duas incógnitas (J_1 e J_2), o qual pode ser resolvido, e utilizando a analogia elétrica.

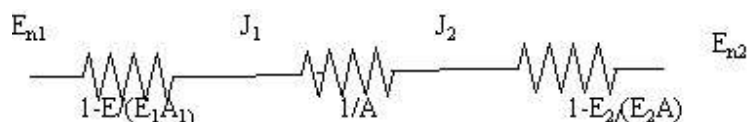


Figura 3.9 - Analogia Elétrica

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 se o que estava sendo analisado correspondia com o que era praticado na fábrica.

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 4.1 - Resultados da análise

Análise Química		
Composição	Pellets (%wt)	Vidro retirado do forno (%wt)
SiO ₂	41,00	52,80
B ₂ O ₃ *	1,00	-
Na ₂ O	4,97	3,54
BaO	3,04	2,54
K ₂ O	15,50	10,10
PbO	33,40	30,10
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

Tabela 4.2 - Composição fornecida pelo fabricante da matéria prima

Composição fornecida pelo catálogo	
Composição	(%wt)
SiO ₂	58
B ₂ O ₃	1
Na ₂ O	3
BaO	2
K ₂ O	11
PbO	24

Os dados da tabela 3 mostram a composição alegada do pellet, já as tabela 1 apresenta os resultados da análise do pellet e do vidro por meio da análise por fluorescência de raios-X

Uma primeira análise seja 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 do resultado obtido por meio da análise do pellet. Isso não indica que o problema de corda seja causa da matéria prima, pois o fato de o vidro ter uma composição diferente não necessariamente indica que ele venha a ter corda ou não. 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.

Chengyu e Ying (1982) propuseram um modelo que calcula uma temperatura de fusão de referência em função da composição química do vidro. Essa temperatura de fusão do vidro é calculada com a equação 2, resultando na tabela a seguir.

Tabela 4.3 - Temperatura de referência de fusão

Composição	Cristal 24%PbO		Análise química	
	(%wt)	Constante	(%wt)	Constante
SiO ₂	58	5,1	41	5,5
B ₂ O ₃	1	-7	1	-7
Na ₂ O	3	-11	4,97	-11
BaO	2	-4,5	3,04	-4,5
K ₂ O	11	-10	15,5	-9
PbO	24	-4	33,4	-4
Al ₂ O ₃	-	-	0,02	6,5
Sc ₂ O ₃	-	-	0,05	-
Fe ₂ O ₃	-	-	0,06	-
ZrO ₂	-	-	0,11	-
SbO ₃	-	-	0,8	-
		T_m= 1440,80°C	T_m= 1277,18°C	

A temperatura de fusão fornecida pelo fabricante, e usada atualmente, do pellet é de 1400°C, chegando aos 1450°C por um período de refino como mostra a curva de fusão a seguir. A temperatura calculada pelo método da temperatura de referência para a composição fornecida pelo fabricante é muito próxima do que é adotado e indicado pelo fornecedor. 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 deva ser 1277°C. Observe que este valor é menor do que o utilizado e indicado pelo fornecedor de vidro.

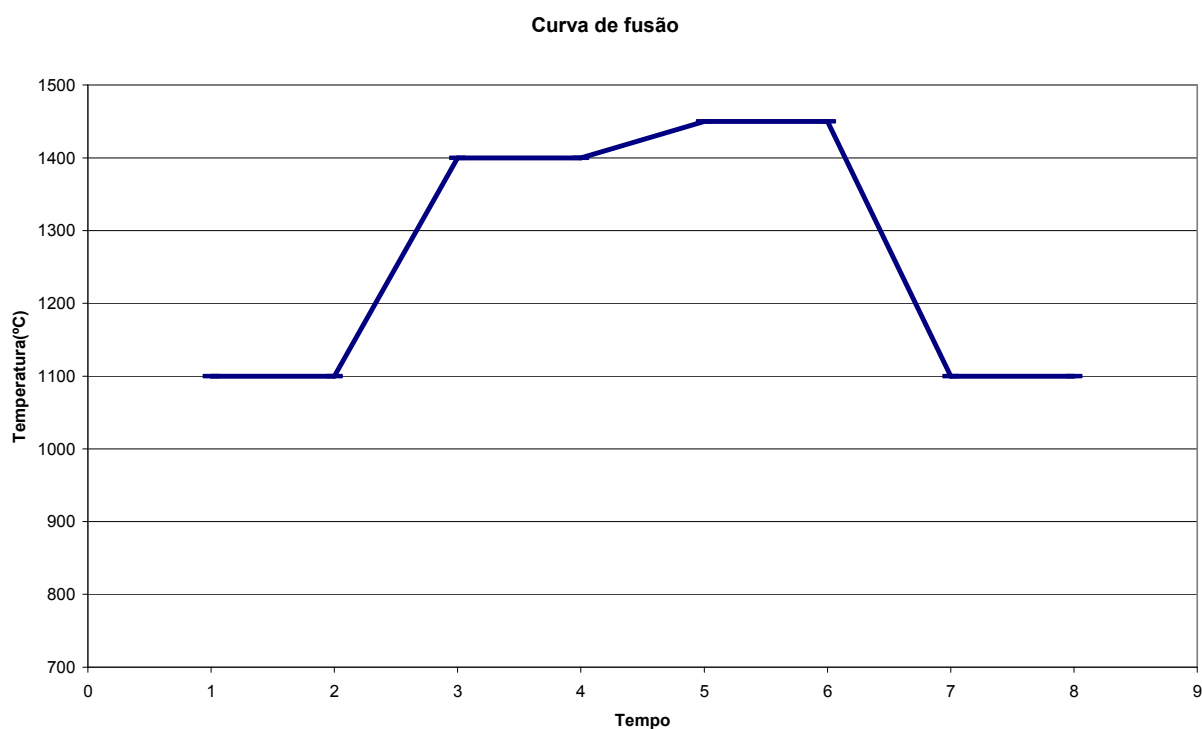


Figura 4.1 - Curva de fusão fornecida pelo fabricante da matéria prima

Outra conclusão do resultado da análise semiquantitativa foi o transporte de massa de SiO_2 que ocorreu para o vidro. O pellet apresenta uma porcentagem em massa de 41%, já o vidro retirado apresenta uma porcentagem em massa de 52,80%. Durante a operação da fábrica um dos cadinhos trincou e precisou ser trocado. Foi observado um elevado grau de ataque no cadinho, como mostram as figuras a seguir.



Figura 4.2 - Foto superior de um pedaço do cadinho atacado pelo vidro



Figura 4.3 - Foto frontal de um pedaço do cadinho atacado pelo vidro

5. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO FORNO:

Após o estudo das propriedades relevantes do vidro, do levantamento dos dados do forno, do estudo dos motivos que levam aos defeitos, do estudo do funcionamento do forno, parte-se agora para a elaboração de um modelo matemático e simulação da distribuição de temperaturas dentro do forno. Essa modelagem consistirá basicamente de:

- Modelo matemático do forno
- Simulação dinâmica do forno
- Análise das não uniformidades de temperatura no vidro

Os resultados que serão levantados nesta fase propiciarão a realização de uma análise global do processo e a proposição de alterações nos processos produtivos que visem à otimização da produção.

Essa parte do trabalho consiste na modelagem matemática e posterior simulação do forno em diversas condições de operação, para o estudo da homogeneidade, e distribuição de temperatura dentro do cadinho.

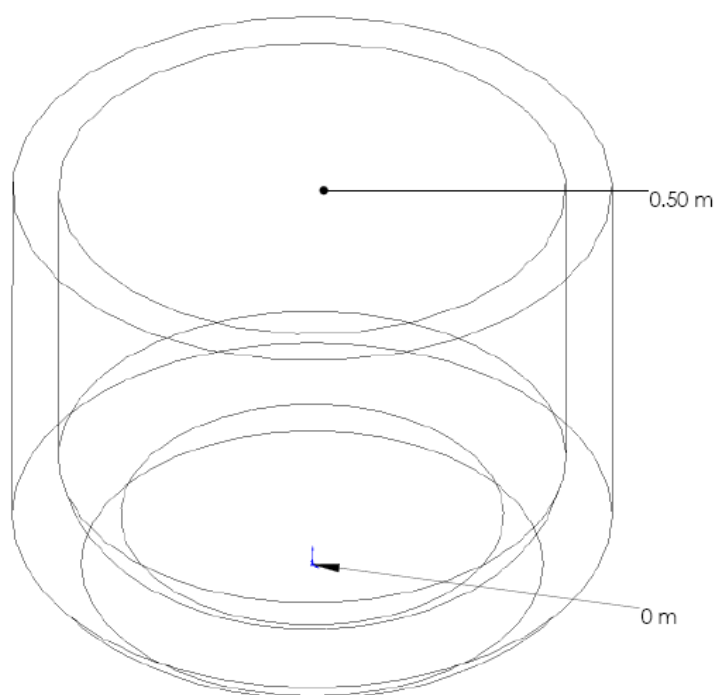


Figura 5.1 - Vista isométrica do cadinho

5.1. Modelagem matemática do forno.

A modelagem matemática do forno consistirá na discretização e simulação da região do cadinho. Essa discretização será 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.

Diferentemente da solução analítica, que permite uma solução para qualquer ponto a solução numérica permite apenas a determinação da temperatura em pontos discretos. O primeiro passo da solução numérica deve ser, portanto a seleção desses pontos. Isso é feito subdividindo-se o meio de em um número de pequenas regiões. No forno em questão o cadinho foi dividido em treze partes iguais na altura, doze no raio e doze no ângulo. A seleção dos pontos nodais é raramente arbitrária, dependendo muitas

vezes de questões como conveniência geométrica e a precisão desejada. A precisão numérica dos dados depende intensamente do número de pontos nodais designados.[7] No problema em questão o cadinho foi modelado como um cilindro. A vista superior da malha gerada é vista na figura a seguir, e o elemento de volumes finitos na figura 4.

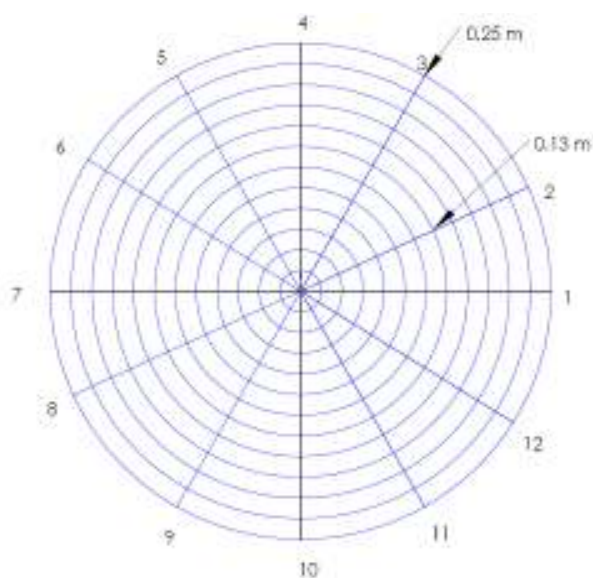


Figura 5.2 - Vista superior da malha do cadinho desenhada no Solid Works

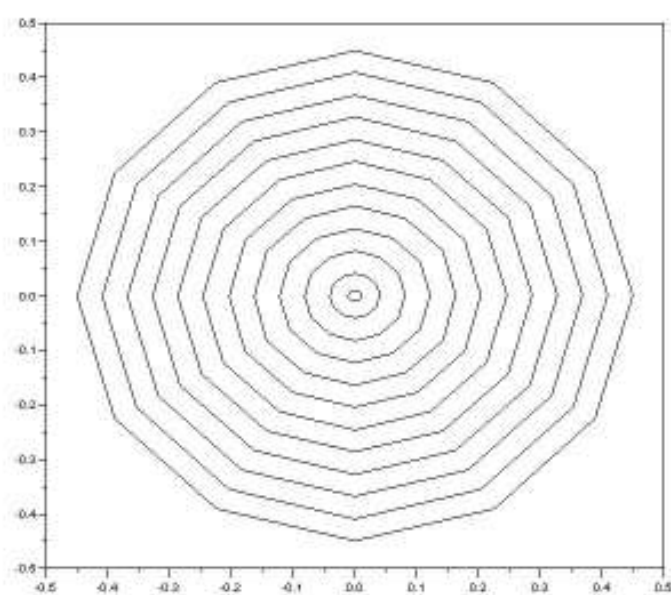


Figura 5.3 - Vista superior obtida por meio do Scilab

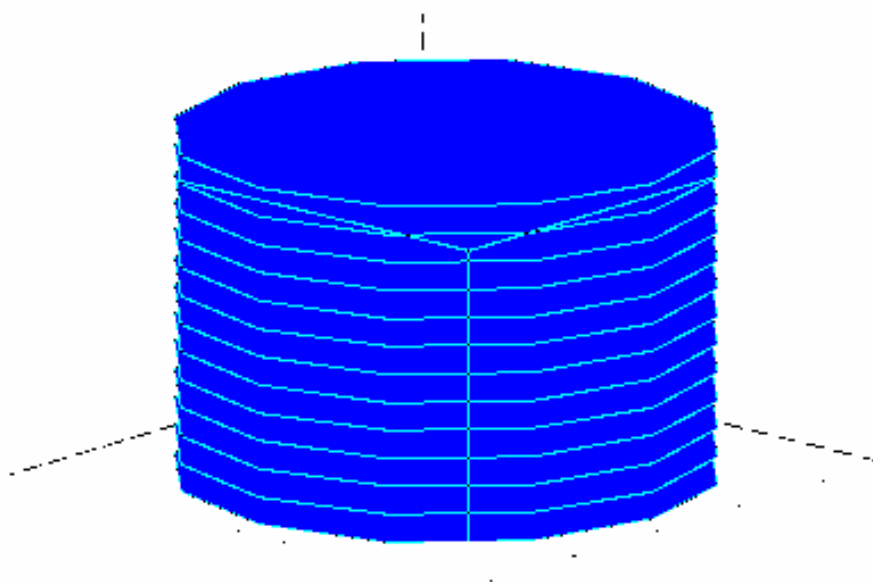


Figura 5.4 - Malha 3d obtida no programa Scilab

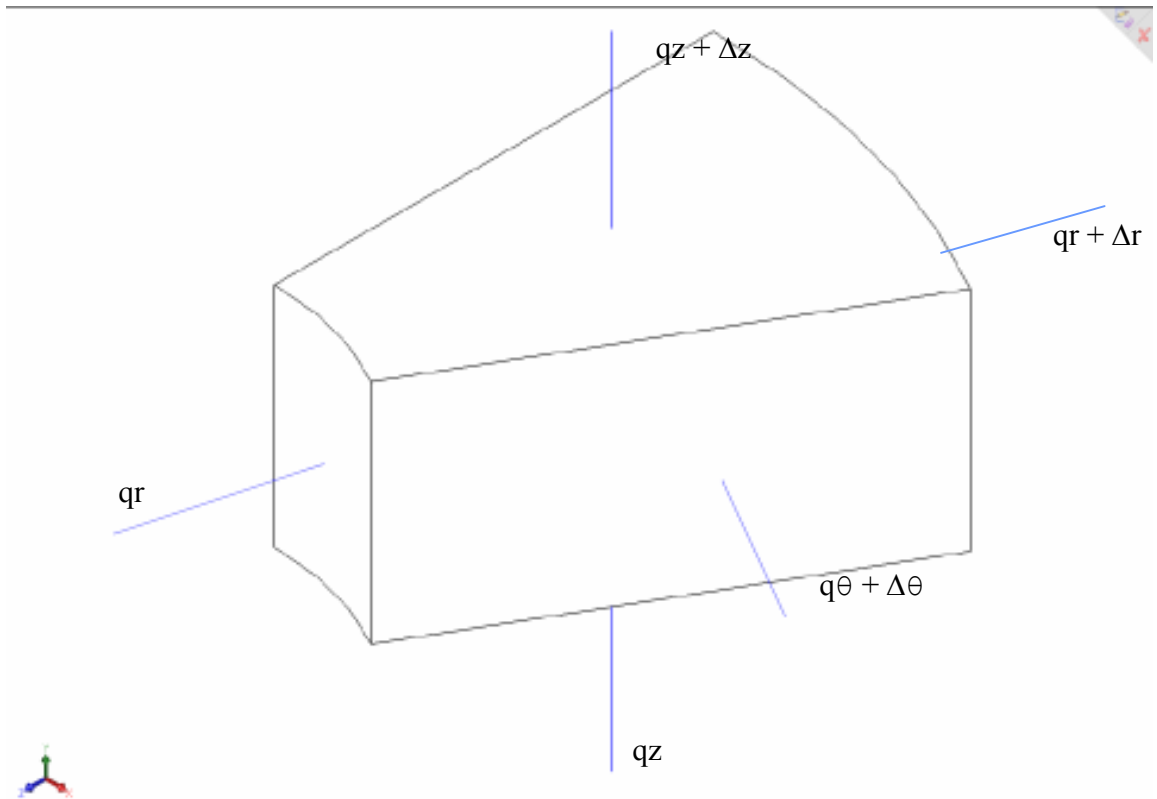


Figura 5.5 - Elemento da malha de volumes finitos

Abaixo são apresentadas as equações dos balanços de energia para o volume finito. Primeiramente a equação para o problema bidimensional e em seguida a modelagem tridimensional que é de fato utilizada no programa. Nesse primeiro momento apenas foi considerada a transferência de calor por condução, descartando a transferência de calor por radiação, que será implementada adiante no projeto.

$$k \frac{r_s \Delta \theta \Delta z}{\delta r_s} (T_s^0 - T_p^0) + k \frac{r_n \Delta \theta \Delta z}{\delta r_n} (T_n^0 - T_p^0) + k \frac{r_n \Delta r z}{r_e (\delta \theta)_e} (T_e^0 - T_p^0) + k \frac{r_n \Delta r z}{r_w (\delta \theta)_w} (T_w^0 - T_p^0) = \rho 0,5 (r_n + r_s) \Delta \theta \Delta r \Delta z \quad (13)$$

Para a modelagem tridimensional

$$\begin{aligned}
& k \frac{r_s \Delta \theta \Delta z}{\delta r_s} (T_s^0 - T_p^0) + k \frac{r_n \Delta \theta \Delta z}{\delta r_n} (T_n^0 - T_p^0) + k \frac{r_e \Delta r z}{r_e (\delta \theta)_e} (T_e^0 - T_p^0) + k \frac{r_n \Delta r z}{r_w (\delta \theta)_w} (T_w^0 - T_p^0) + \\
& k \frac{0,5(rn + rs) \Delta \theta \Delta r}{\delta Z_{cima}} (T_{cima}^0 - T_p^0) + k \frac{0,5(rn + rs) \Delta \theta \Delta r}{\delta Z_{baixo}} (T_{cima}^0 - T_p^0) = \rho 0,5(r_n + r_s) \Delta \theta \Delta r \Delta z c \frac{(T_p - T_p^0)}{\Delta t}
\end{aligned} \quad (14)$$

)

Para a solução do problema foram então introduzidas os dados do forno estudado e as propriedades físicas do cadinho e do vidro fundido.

Tabela 5.1 - Medidas do Cadinho

Medidas do Cadinho	
Diâmetro externo(cm)	50
Altura(cm)	50

Tabela 5.2 - Propriedades dos materiais(manual da GE)

	Propriedades do vidro.	Propriedade do cadinho.
Condutibilidade térmica (W/mK)	7,8	1,8
Densidade (kg/m ³)	2890	2645
Calor específico J/(kg.K)	973	1130

No programa, uma região da superfície externa do cadinho foi considerada adiabáti-ca. 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. Essa é uma primeira aproximação, mas que é plausível já que as paredes externas do forno não ultrapassam a temperatura de 50°C.

5.2. Simulações

Serão implementadas diversas simulações. O primeiro será um teste para verificar a malha, o segundo será apenas de condução, impondo uma temperatura inicial no topo da malha e observando a distribuição de temperaturas no cadinho, o terceiro que

considera o efeito de radiação, e o quarto que é junção de todos os métodos, mas considerando uma perda de calor para a porta aberta do forno.

5.2.1. Teste

A primeira idéia de simulação a ser implementada no programa será o teste, forçando toda a malha a uma temperatura específica, verificando se essa temperatura de fato está implementada em toda malha. Por exemplo o programa rodará com uma temperatura fixa de 600°C e depois será testado se todos os elementos estão a essa temperatura.

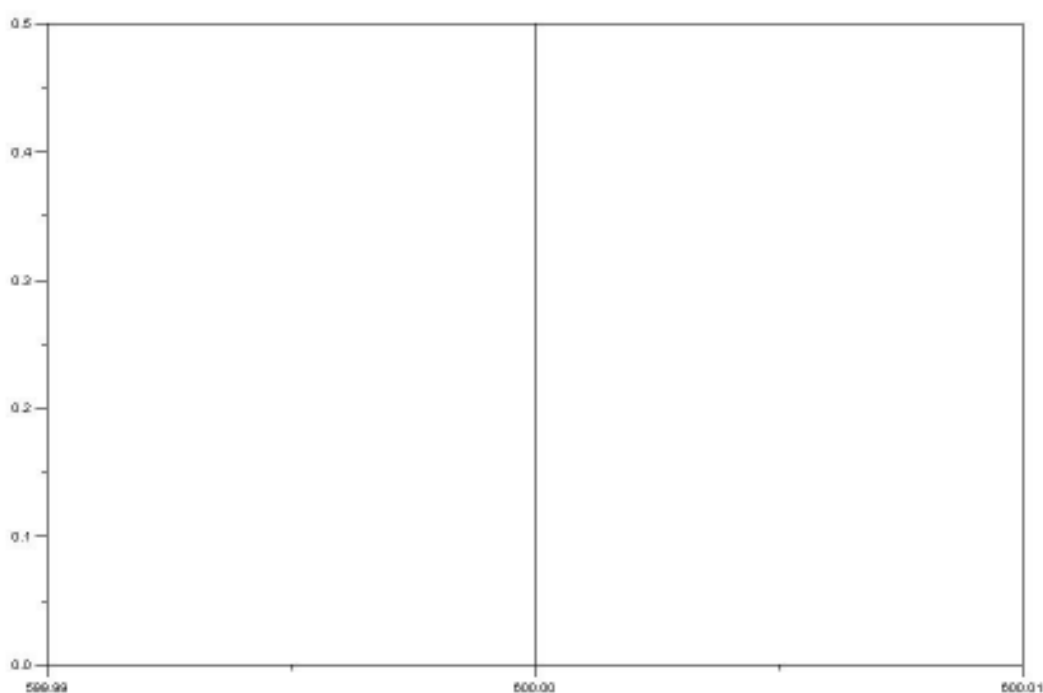


Figura 5.6 - Gráfico de z em função da temperatura.

5.2.2. Tranco

O próximo passo de simulação será alterar a temperatura da primeira camada da malha, a que está localizada mais próxima às resistências. No caso para uma temperatura

maior do que a utilizada no teste anterior. O programa rodará por um certo tempo, nos casos apresentados por 1400 iterações, e um gráfico demonstrará como a temperatura se comporta ao longo do cadinho. Como o problema é simétrico apenas um gráfico é necessário para a visualização do resultado.

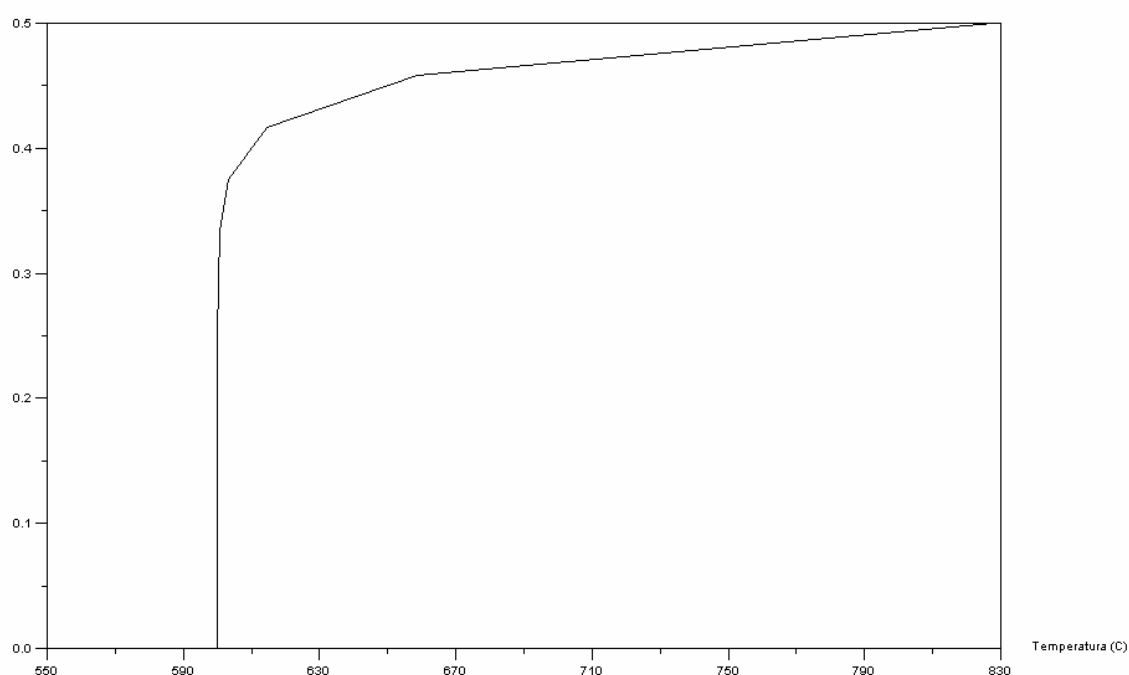


Figura 5.7 - Gráfico do perfil de temperatura em função da profundidade do cadinho para a temperatura inicial do banho a 600°C e tranco de 1500°C.

A primeira conclusão que pode ser inferida desses gráficos é a grande inércia que o forno tem para que todo o seu conteúdo esteja à mesma temperatura. Mesmo após 1400 iterações o fundo do cadinho continua a 600°C. A temperatura muda apenas no topo do cadinho.

5.2.3. Radiação

Para o cálculo da radiação foi considerado o circuito térmico a seguir, cuja solução é:

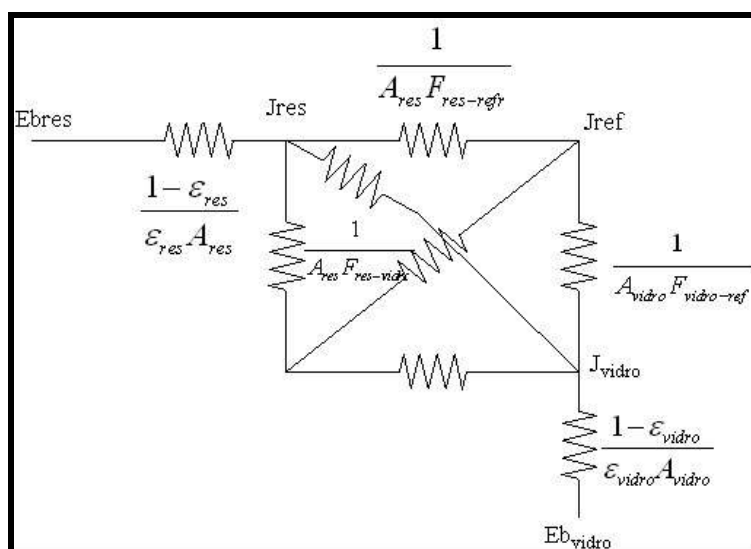


Figura 5.8 - Circuito equivalente - Radiação

Tabela 5.3 - Características resistências

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

Tabela 5.4 - 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

Calculando o valor de cada resistência,

$$\frac{1 - \varepsilon_{res}}{\varepsilon_{res} A_{res}} = 0,5359$$

$$\frac{1}{A_{res} F_{res-refr}} = 5,4221$$

$$\frac{1}{A_{res} F_{res-vidro}} = 60,285$$

$$\frac{1}{A_{vidro} F_{vidro-ref}} = 3,1725$$

$$\frac{1 - \varepsilon_{vidro}}{\varepsilon_{vidro} A_{vidro}} = 0,33487$$

Obter-se-á então o valor da resistência equivalente e assim a resolvendo o problema de radiação.

$$R_{eq} = 8,393 \text{ (1/m}^2\text{)}$$

A seguir são apresentados alguns gráficos que mostram a influência das resistências no forno.

O primeiro gráfico é resultado de uma simulação de 3600s e mostra o efeito de radiação na camada superior do cadinho. A temperatura permanece constante ao longo do raio, com um leve aumento na borda. Já em uma camada à media altura do cadinho a variação de temperatura foi pequena, ou seja pouca influência da radiação. Esse é mais um ponto que corrobora a grande inércia para a transferência de calor dentro do cadinho.

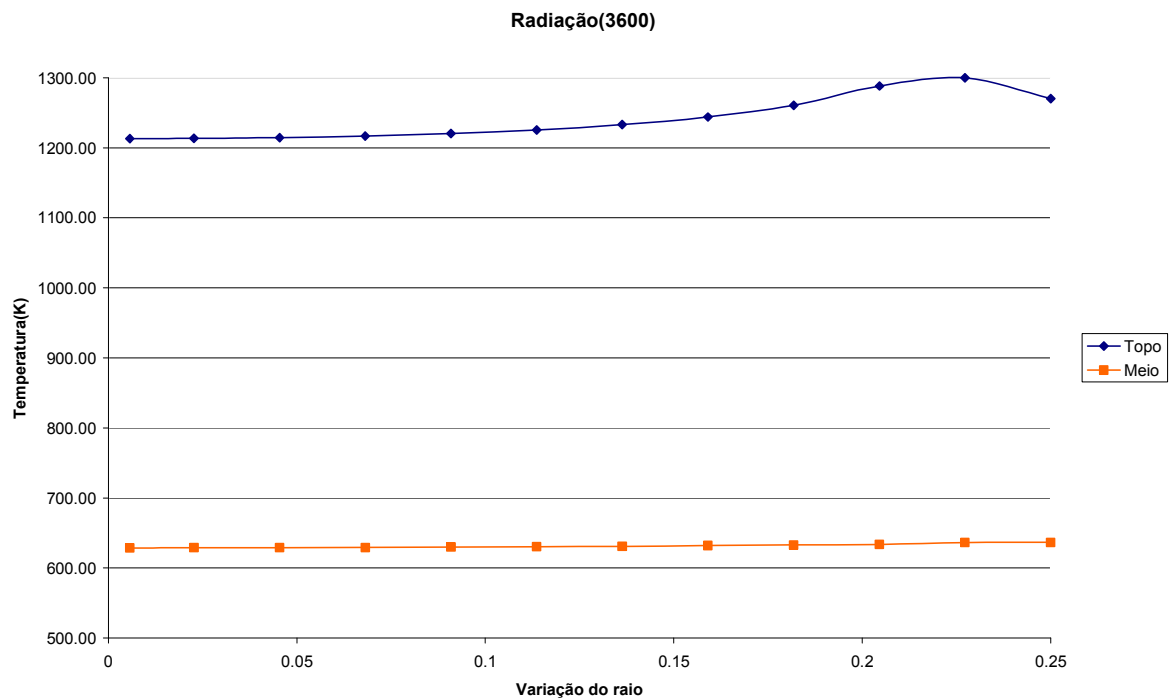


Figura 5.9 - Temperatura em função do raio(3600).

O próximo gráfico é resultado de três simulações, uma de 46.800 s, outra de 28.800s 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.

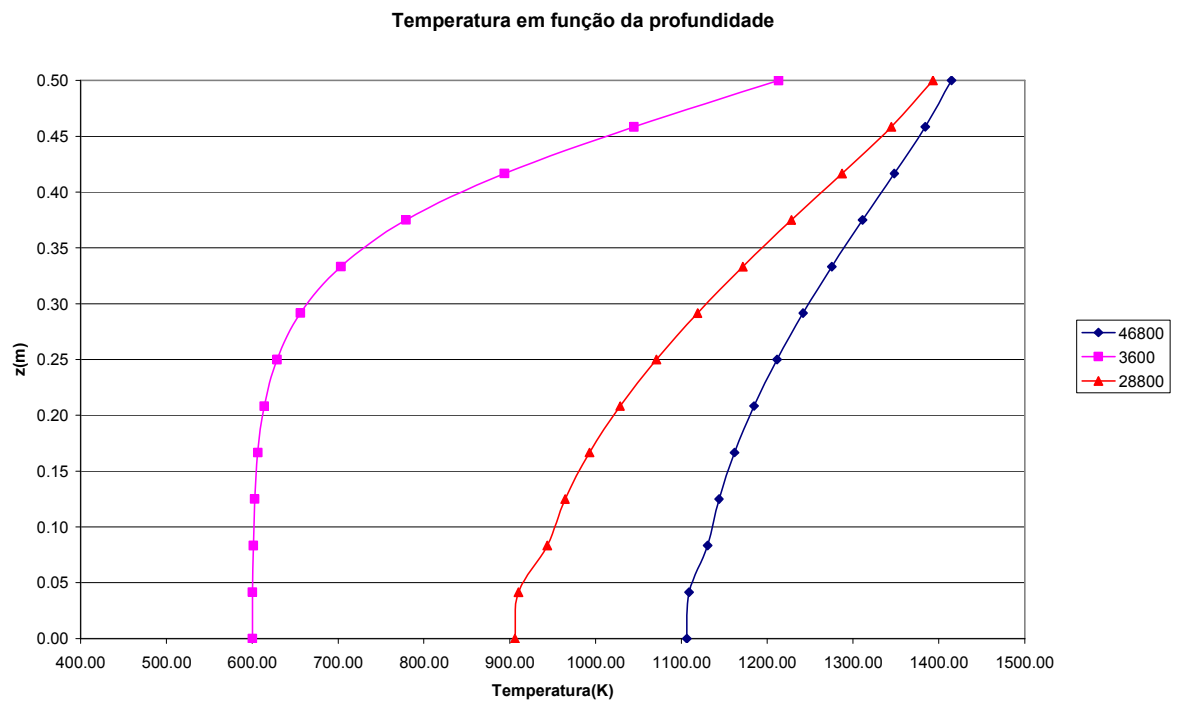


Figura 5.10 - Comparação da variação da temperatura em função da profundidade com diferentes tempos de simulação.

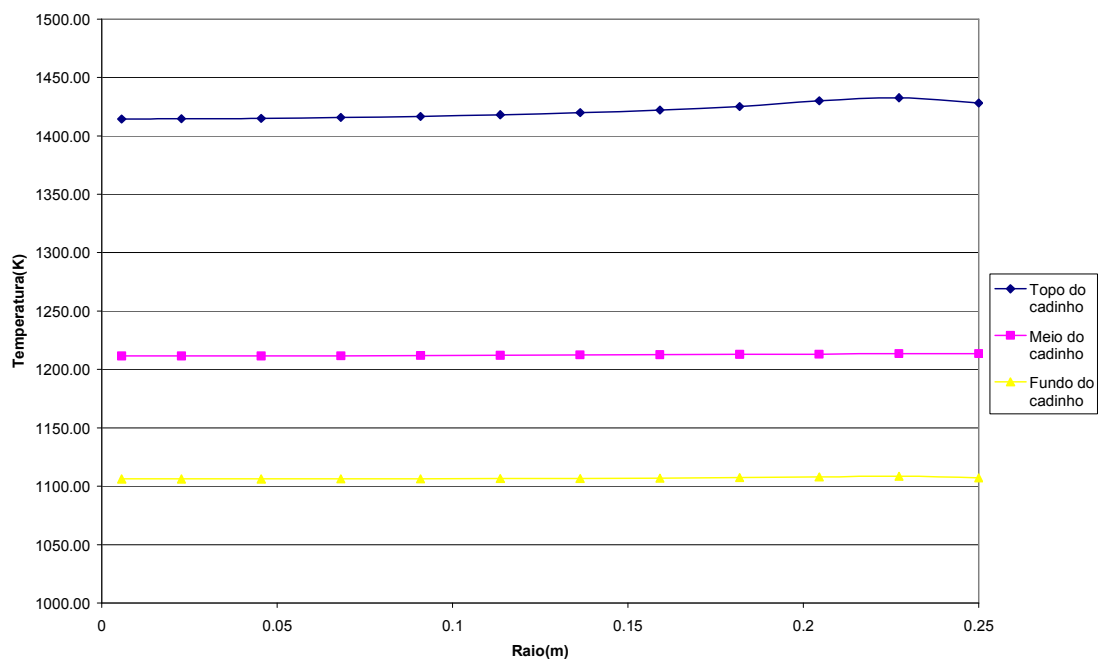


Figura 5.11 - Temperatura em função do raio(46800)

5.2.4. 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.

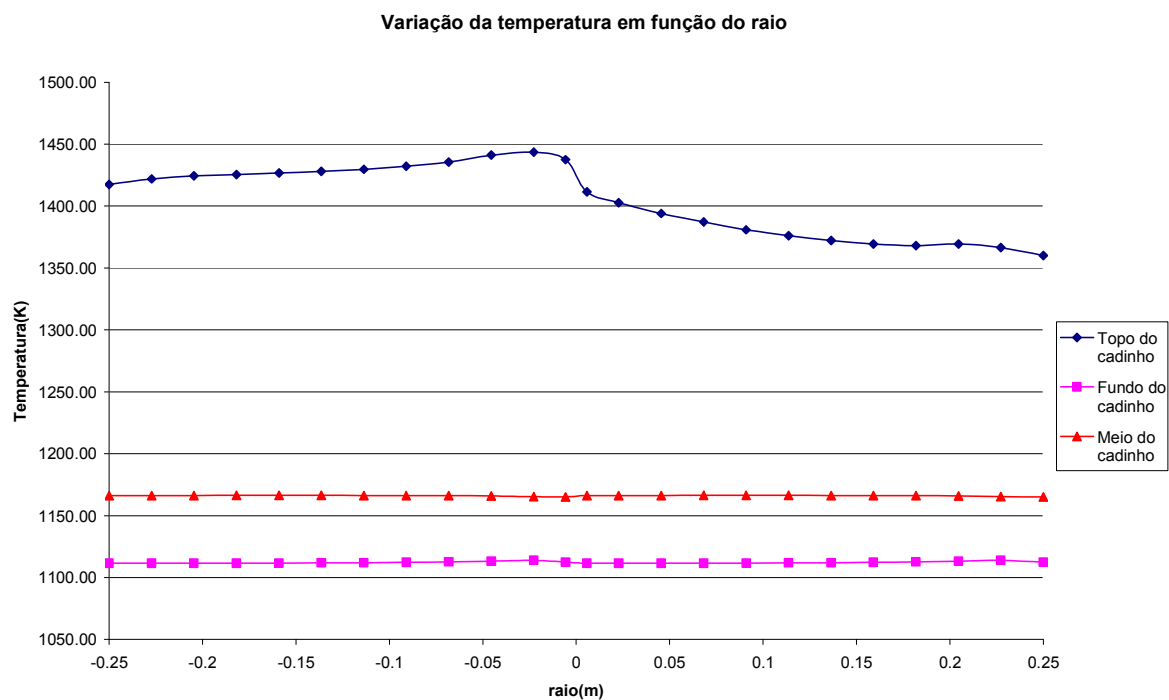


Figura 5.12 - Temperatura em função do raio para porta aberta durante 10 min.

6. 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, e também que houve 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 mostradas nas figuras 5.7 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 5.10). 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 5.11).

Conclui-se então que a causa do defeito de corda no vidro não foi causada pela não uniformidade de temperatura no cadinho.

Foi relatado que durante a operação da fábrica o cadinho precisou ser substituído. Optou-se então por um de diferente fornecedor, resultando em uma melhora significativa do vidro, pois o problema da corda foi eliminado.

A conclusão final da causa da corda foi então a contaminação do vidro pelo material refratário do cadinho.

7. CRONOGRAMA:

Abril				Maio				Junho				Julho				Agosto				Setembro				Outubro				Novembro				Dezembro			
1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Validade																																			
Elaboração de bibliografia e de dados experimentais típicos																																			
				Modelagem e levantamento das propriedades físico-químicas																															
								Elaboração do Relatório (Parte I)																											
												Validação do Modelo																							
																				Simulação															
																								Projeto de modificação do forno											
																												Elaboração do relatório final							

8. BIBLIOGRAFIA:

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
7. INCROPERA, F.P.; *"Transferência de calor e massa"*. LTC EDITORA, quinta edição, RJ, 2003

ANEXO A

Linha de programação

O programa desenvolvido para o scilab é apresentado a seguir.

```
//program forno_cadinho
//dimension t(20,20,20),tnew(20,20,20),rs(20),rn(20),r(20),drs(20),drm(20),delr(20),dz(20),zn(20),zs(20),z(20),deltaz(20)
//dimension as(20,20),an(20,20),aw(20,20),ae(20,20),atop(20,20),abot(20,20)

//Modelagem
nduracao = 3600 // número de iterações

tinicial = 600// Temperatura inicial da simulação

for iu=1:12
for ju=1:13
for ku=1:12
t(iu,ju,ku)=tinicial;
tnew(iu,ju,ku)=tinicial;
end
end
end
pi=3.14159265;
stef=5.67e-8;

// tranco inicial
// for iy=1:12
// for iy1=1:12
// t(iy,13,iy1)=1500;
// end
// end

//for iy=1:12
//for iy1=1:12
//qrad(iy,13,iy1)=126; //fluxo total 40 kW
//end
//end

//contantes macro da radiacao do termometro
a=0.03;
b=0.12;
c=0.85;

// caracteristicas geometricas
diam=0.50; //!diametro externo do cadinho
espess=.15; //!espessura do cadinho
altura=0.5; //!altura do cadinho

// caracteristicas termicas
cond1=7.8; //!condutibilidade termica em W/mK
ro1=2890; //!massa especifica em kg/m3
cesp1=973; //!calor especifico em J/(kg.K)
// caracteristicas termicas do refratário
cond2=1.8; //!condutibilidade termica em W/mK
ro2=2645; //!massa especifica em kg/m3
cesp1=1130; //!calor especifico em J/(kg.K)

for ijun=1:12
for jjun=1:13
condut(ijun,jjun)=cond1;
ro(ijun,jjun)=ro1;
cesp(ijun,jjun)=cesp1;
end
end
```

```

// discretizacao no raio (r)
difr=diam/(2*11);

rs(1)=0;
rn(1)=difr/2;
r(1)=difr/4;

for icont=2:11
rn(icont)=rn(icont-1)+difr;
rs(icont)=rn(icont-1);
r(icont)=0.5*(rs(icont)+rn(icont));
end

rs(12)=rn(11);
rn(12)=rn(11)+difr/2;
r(12)=rn(12);

drs(1)=0;
drn(1)=r(2)-r(1);
delr(1)=rn(1);

for icont=2:11
drn(icont)=r(icont+1)-r(icont);
drs(icont)=r(icont)-r(icont-1);
delr(icont)=rn(icont)-rs(icont);
end

drn(12)=0.1;
drs(12)=r(12)-r(11);
delr(12)=r(12)-rs(12);

//discretização dos algulos
for icont = 1:12
    ang(icont)=icont*pi/6;
end

// do i=1,13
// write(*,*)'noh',i,'m',m(i),'rs',rs(i),'r',r(i)
// end do

// discretizacao na altura (z)
delz=altura/12.;

zs(1)=0;
zn(1)=delz/2;
z(1)=0;
deltaz(1)=zn(1);

for icont=2:12
zn(icont)=zn(icont-1)+delz;
zs(icont)=zn(icont-1);
z(icont)=0.5*(zs(icont)+zn(icont));
deltaz(icont)=zn(icont)-zs(icont);
end

zn(13)=zn(12)+delz/2;
zs(13)=zn(12);
z(13)=zn(13);
deltaz(13)=delz/2;

dzb(1)=0.;
dzt(1)=z(2)-z(1);

for io=2:12

```

```

dzb(io)=z(io)-z(io-1);
dzt(io)=z(io+1)-z(io);
end

dzb(13)=z(13)-z(12);
dzt(13)=0

//do i=1,14
//write(*,*)'noh',i,'zn',zn(i),'zs',zs(i),'z',z(i)
//end do

//discretizacao angular (teta)
deteta=2*pi/12;

//volumes e teste do volume total
voltot=0;
for ium=1:12
for jum=1:13
for kum=1:12
    vol(ium,jum,kum)=0.5*(rn(ium)+rs(ium))*deteta*delr(ium)*deltaz(jum);
    voltot=voltot+vol(ium,jum,kum);
end
end
end
voltot
//Dados para a obtenção dos gráficos
for i=1:12
x1(i)=r(1)*sin(ang(i));
y1(i)=r(1)*cos(ang(i));

x2(i)=r(2)*sin(ang(i));
y2(i)=r(2)*cos(ang(i));

x3(i)=r(3)*sin(ang(i));
y3(i)=r(3)*cos(ang(i));

x4(i)=r(4)*sin(ang(i));
y4(i)=r(4)*cos(ang(i));

x5(i)=r(5)*sin(ang(i));
y5(i)=r(5)*cos(ang(i));

x6(i)=r(6)*sin(ang(i));
y6(i)=r(6)*cos(ang(i));

x7(i)=r(7)*sin(ang(i));

y7(i)=r(7)*cos(ang(i));
x8(i)=r(8)*sin(ang(i));
y8(i)=r(8)*cos(ang(i));

x9(i)=r(9)*sin(ang(i));
y9(i)=r(9)*cos(ang(i));

x10(i)=r(10)*sin(ang(i));
y10(i)=r(10)*cos(ang(i));

x11(i)=r(11)*sin(ang(i));
y11(i)=r(11)*cos(ang(i));

x12(i)=r(12)*sin(ang(i));
y12(i)=r(12)*cos(ang(i));

end

for i=1:13
z0(i)= 0;
z1(i)=z(2);
z2(i)=z(3);
z3(i)=z(4);
z4(i)=z(5);
z5(i)=z(6);
z6(i)=z(7);
z7(i)=z(8);
z8(i)=z(9);
z9(i)=z(10);
z10(i)=z(11);
z11(i)=z(12);
z12(i)=z(13);

end

// / coeficientes
// r=1 linha de simetria

as(1,1)=0.;
an(1,1)=condut(1,1)*deteta*rn(1)*deltaz(1)/drn(1);
aw(1,1)=condut(1,1)*delr(1)*deltaz(1)/(r(1)*deteta);

```

```

ae(1,1)=condut(1,1)*delr(1)*deltaz(1)/(r(1)*deteta);
atop(1,1)=condut(1,1)*0.5*(rn(1)+rs(1))*deteta*delr(1)/deltaz(1);
abot(1,1)=0;

for jcont=2:12
as(1,jcont)=0.;
an(1,jcont)=condut(1,jcont)*deteta*rn(1)*deltaz(jcont)/dm(1);
aw(1,jcont)=condut(1,jcont)*delr(1)*deltaz(jcont)/(r(1)*deteta);
ae(1,jcont)=condut(1,jcont)*delr(1)*deltaz(jcont)/(r(1)*deteta);
atop(1,jcont)=condut(1,jcont)*0.5*(rn(1)+rs(1))*deteta*delr(1)/zn(jcont);
abot(1,jcont)=condut(1,jcont)*0.5*(rn(1)+rs(1))*deteta*delr(1)/zs(jcont);
end

as(1,13)=0.;
an(1,13)=condut(1,13)*deteta*rn(1)*deltaz(1)/(dm(1));
aw(1,13)=condut(1,13)*delr(12)*deltaz(13)/(r(1)*deteta);
ae(1,13)=condut(1,13)*delr(12)*deltaz(13)/(r(1)*deteta);
atop(1,13)=0;
abot(1,13)=condut(1,13)*0.5*(rn(1)+rs(1))*deteta*delr(1)/zs(13);

//z=1 fundo do cadinho

for iconti=2:11
as(iconti,1)=condut(iconti,1)*deteta*rs(iconti)*deltaz(1)/(drs(iconti));
an(iconti,1)=condut(iconti,1)*deteta*rn(iconti)*deltaz(1)/(dm(iconti));
aw(iconti,1)=condut(iconti,1)*delr(iconti)*deltaz(1)/(r(iconti)*deteta);
ae(iconti,1)=condut(iconti,1)*delr(iconti)*deltaz(1)/(r(iconti)*deteta);
atop(iconti,1)=condut(iconti,1)*0.5*(m(iconti)+rs(iconti))*deteta*delr(iconti)/zn(iconti);
abot(iconti,1)=0.;
end

as(12,1)=condut(12,1)*deteta*rs(12)*deltaz(1)/(drs(12));
an(12,1)=0.;
aw(12,1)=condut(12,1)*delr(12)*deltaz(12)/(r(12)*deteta);
ae(12,1)=condut(12,1)*delr(12)*deltaz(12)/(r(12)*deteta);
atop(12,1)=condut(12,1)*0.5*(rn(12)+rs(12))*deteta*delr(12)/zn(1);
abot(12,1)=0.;

// z=13 topo do cadinho

for icont=2:11
as(icont,13)=condut(iconti,13)*deteta*rs(icont)*deltaz(13)/(drs(icont));
an(icont,13)=condut(iconti,13)*deteta*rn(icont)*deltaz(13)/(dm(jcont));
aw(icont,13)=condut(iconti,13)*delr(icont)*deltaz(13)/(r(icont)*deteta);
ae(icont,13)=condut(iconti,13)*delr(icont)*deltaz(13)/(r(icont)*deteta);
atop(icont,13)=0.;
abot(icont,13)=condut(iconti,13)*0.5*(rn(icont)+rs(icont))*deteta*delr(icont)/zs(13);
end

as(12,13)=condut(12,13)*deteta*rs(12)*deltaz(13)/(drs(12));
an(12,13)=0.;
aw(12,13)=condut(12,13)*delr(12)*deltaz(12)/(r(12)*deteta);
ae(12,13)=condut(12,13)*delr(12)*deltaz(12)/(2.*r(12)*deteta);
atop(12,13)=0.;
abot(12,13)=condut(12,13)*0.5*(rn(12)+rs(12))*deteta*delr(12)/zs(13);

// r=12 lateral do cadinho

for jcont=2:12
as(12,jcont)=condut(12,jcont)*deteta*rs(jcont)*deltaz(jcont)/drs(12);
an(12,jcont)=0.;
aw(12,jcont)=condut(12,jcont)*delr(12)*deltaz(jcont)/(r(12)*deteta);
ae(12,jcont)=condut(12,jcont)*delr(12)*deltaz(jcont)/(r(12)*deteta);
atop(12,jcont)=condut(12,jcont)*0.5*(rn(12)+rs(12))*deteta*delr(12)/zn(jcont);
abot(12,jcont)=condut(12,jcont)*0.5*(rn(12)+rs(12))*deteta*delr(12)/zs(jcont);
end

//genericos

```

```

for ijuba=2:11
for jjuba=2:12

as(ijuba,jjuba)=condut(ijuba,jjuba)*deteta*rs(ijuba)*deltaz(jjuba)/(drs(ijuba));
an(ijuba,jjuba)=condut(ijuba,jjuba)*deteta*rn(icont)*deltaz(13)/(drn(jcont));
aw(ijuba,jjuba)=condut(ijuba,jjuba)*delr(ijuba)*delr(ijuba)*deltaz(jjuba)/(r(ijuba)*deteta);
ae(ijuba,jjuba)=condut(ijuba,jjuba)*delr(ijuba)*delr(ijuba)*deltaz(jjuba)/(r(ijuba)*deteta);
atop(ijuba,jjuba)=condut(ijuba,jjuba)*0.5*(rn(ijuba)+rs(ijuba))*deteta*delr(ijuba)/zn(ijuba);
abot(ijuba,jjuba)=condut(ijuba,jjuba)*0.5*(rn(icont)+rs(icont))*deteta*delr(icont)/zs(13);

end
end
//interfaces

condu=2.*cond1*cond2/(cond1+cond2);
for iconti=1:10
abot(iconti,3)=abot(iconti,3)/condut(iconti,3)*condu;
atop(iconti,2)=atop(iconti,2)/condut(iconti,2)*condu;
end

for jconti=2:13
an(10,jconti)=an(10,jconti)/condut(10,jconti)*condu;
as(11,jconti)=as(10,jconti)/condut(11,jconti)*condu;
end

for ivu=1:12
arad(ivu)=pi*(m(ivu)**2-rs(ivu)**2)/12.;
end
acima=0.;
for juo=1:12
acima=acima+arad(juo)*12;
end

acima

for izu=1:13
aradlat(izu)=2.*pi*rn(12)/12*(zn(izu)-zs(izu));
end
alat=0.;
for izu=11:13
alat=alat+aradlat(izu)*12;
end
alat

//    fatores de forma
fat(1,1)=0.027;
fat(2,1)=0.028;
fat(3,1)=0.033;
fat(4,1)=0.038;
fat(5,1)=0.046;
fat(6,1)=0.051;
fat(7,1)=0.057;
fat(8,1)=0.062;
fat(9,1)=0.067;
fat(10,1)=0.072;
fat(11,1)=0.077;
fat(12,1)=0.078;

for itumba=1:12
fat(itumba,12)=fat(itumba,1);
end

for itumba=1,12
fat(itumba,2)=fat(itumba,1)*0.75;
fat(itumba,11)=fat(itumba,2);
end

//    verificacao do delta t maximo

```

```

deltat = 5 ;    //!teste

//condicao inicial
temp_term=600;
pottot1=0.;
pottot2=0.;

//  avanco no tempo
nsimul=0;
for itempo=1:nduracao

    nsimul=nsimul+deltat;
//temperatura media da superficie do vidro

    temp_temp=0.;
    for igun=1:12
        for tgun=1:12
            temp_temp=temp_temp+t(igun,13,tgun)*arad(igun);
        end
    end
    temp_med=temp_temp/acima;
    temp_med;

    ebvidro=stef*temp_med**4;
    ebres=pottot1*8.393+ebvidro;

    tres=(ebres/stef)**0.25;
    tres

    radres=ebres-pottot1*0.5359;
    radvid=ebvidro+pottot1*0.33487;

    transdir=(radres-radvid)/60.285;
    transind=pottot1-transdir;
    radref=radres-transind*5.4221;
    tempref=(radref/stef)**0.25;
    tempref

    radter=a*radres+c*radref+b*radvid;
    temp_term=(radter/stef)**0.25;
    temp_term

    if (temp_term < 1350) then
        pottot1=18000*0.85;
        pottot2=18000*0.15;
        //pause
    end

    if (temp_term > 1350) then
        //passou
        //pause
        pottot1=15300-(temp_term-1350)*153;
        pottot2=2700-(temp_term-1350)*27;
    end

    qespec=pottot1/acima;
    for iy=1:10
        for iy1=1:12
            qrad(iy,13,iy1)=0.8*qespec*arad(iy);
            qrad(iy,12,iy1)=0.15*qespec*arad(iy);
            qrad(iy,11,iy1)=0.05*qespec*arad(iy);
        end
    end

    for iy=10:12
        for iy1=1:12
            qrad(iy,13,iy1)=qespec*arad(iy);
        end
    end

```

```

end

qespec2=pottot2/alat;

for iz=1:13
for it=1:12
qrad(12,iz,it)=qespec2*aradlat(iz);
end
end

for iju=1:12
for jju=1:13
for kju=1:12

if(iju==1) then
termsul=0;
else
termsul=as(iju,jju)*(t(iju-1,jju,kju)-t(iju,jju,kju));
end

if(iju==12) then
termnorte=0;
else
termnorte=an(iju,jju)*(t(iju+1,jju,kju)-t(iju,jju,kju));
end

if(kju==1)then
termeste=ae(iju,jju)*(t(iju,jju,1)-t(iju,jju,kju));
else
termeste=ae(iju,jju)*(t(iju,jju,kju-1)-t(iju,jju,kju));
end

if(kju==12) then
termoeste=aw(iju,jju)*(t(iju,jju,1)-t(iju,jju,kju));
else
termoeste=aw(iju,jju)*(t(iju,jju,kju+1)-t(iju,jju,kju));
end

if(jju==1) then
termbaixo=0;
else
termbaixo=abot(iju,jju)*(t(iju,jju-1,kju)-t(iju,jju,kju));
end

if(jju==13) then
termcima=0;
else
termcima=atop(iju,jju)*(t(iju,jju+1,kju)-t(iju,jju,kju));
end

vol=0.5*(rn(iju)+rs(iju))*deteta*delr(iju)*deltaz(jju);
tempk=ro(iju,jju)*vol*cesp(iju,jju);
tnew(iju,jju,kju)=t(iju,jju,kju)+(deltat/tempk)*(termsul+termnorte+termeste+termoeste+termbaixo+termcima+qrad(iju,jju,kju)

);

end
end
end
for ik=1:12
for jk=1:13
for kk=1:12
t(ik,jk,kk)=tnew(ik,jk,kk);
end
end
end

```



```

end
//for iy=1:12
//for iy1=1:12
//t(iy,13,iy1)=1500;
//end
//end

end //final da simulação

// PORTA ABERTA DURANTE DEZ MINUTOS

// avanço no tempo

nsimul=0;
deltat=1;

for itempo=1:600

nsimul=nsimul+deltat

// temperatura media da superficie do vidro

temp_temp=0.
for igun=1:12
for tgun=1:12
temp_temp=temp_temp+t(igun,13,lgun)*arad(igun);
end
end

temp_med=temp_temp/acima

//write(*,*)temp de cima,temp_med

ebvidro=stef*temp_med**4;
ebres=pottot1*8.393+ebvidro;

tres=(ebres/stef)**0.25

//write(*,*)tres,tres;

radres=ebres-pottot1*0.5359;
radvid=ebvidro+pottot1*0.33487;

transdir=(radres-radvid)/60.285;
transind=pottot1-transdir;
radref=radres-transind*5.4221;
tempref=(radref/stef)**0.25
//write(*,*)temperatura do refratario,tempref

radter=a*radres+c*radref+b*radvid;
temp_term=(radter/stef)**0.25
//write(*,*)temperatura indicada no termometro,temp_term

if (temp_term < 1350) then
pottot1=18000*0.85;
pottot2=18000*0.15;
//pause
end

if (temp_term > 1350) then
//passou
//pause
pottot1=15300-(temp_term-1350)*153;
pottot2=2700-(temp_term-1350)*27;
end

quespec=pottot1/acima;
for iy=1:10
for iy1=1:12
qrad(iy,13,iy1)=0.8*quespec*arad(iy);

```

```

    qrad(iy,12,iy1)=0.15*qespec*arad(iy);
    qrad(iy,11,iy1)=0.05*qespec*arad(iy);
    end
    end

    for iy=10:12
    for iy1=1:12
    qrad(iy,13,iy1)=qespec*arad(iy);
    end
    end

qespec2=pottot2/alat;

    for iz=11:13
    for it=1:12
    qrad(12,iz,it)=qespec2*aradlat(iz);
    end
    end

    for iju=1:12
    for jju=1:13
    for kju=1:12

    if(iju==1) then
    termsul=0;
    else
    termsul=as(iju,jju)*(t(iju-1,jju,kju)-t(iju,jju,kju));
    end

    if(iju==12) then
    termnorte=0;
    else
    termnorte=an(iju,jju)*(t(iju+1,jju,kju)-t(iju,jju,kju));
    end

    if(kju==1)then
    termeste=ae(iju,jju)*(t(iju,jju,1)-t(iju,jju,kju));
    else
    termeste=ae(iju,jju)*(t(iju,jju,kju-1)-t(iju,jju,kju));
    end

    if(kju==12) then
    termoeste=aw(iju,jju)*(t(iju,jju,1)-t(iju,jju,kju));
    else
    termoeste=aw(iju,jju)*(t(iju,jju,kju+1)-t(iju,jju,kju));
    end

    if(jju==1) then
    termbaixo=0;
    else
    termbaixo=abot(iju,jju)*(t(iju,jju-1,kju)-t(iju,jju,kju));
    end

    if(jju==13) then
    termcima=0;
    else
    termcima=atop(iju,jju)*(t(iju,jju+1,kju)-t(iju,jju,kju));
    end

    vol=0.5*(rn(iju)+rs(iju))*deteta*delr(iju)*deltaz(jju);
    tempk=ro(iju,jju)*vol*cesp(iju,jju);
    tnew(iju,jju,kju)=t(iju,jju,kju)+(deltat/tempk)*(termsul+termnorte+termeste+termoeste+termbaixo+termcima+qrad(iju,jju,kju)
);
    end
    end
    end
    for ik=1:12
    for jk=1:13
    for kk=1:12

```

```
t2(ik,jk,kk)=tnew(ik,jk,kk);  
end  
end  
end  
//for iy=1:12  
//for iy1=1:12  
//t(iy,13,iy1)=1500;  
//end  
//end  
end //final da simulação
```