

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

"Modelo Multidimensional de Avaliação
do Desgaste de Cadinho de Alto-forno"

Autor: Henrique Guilherme Lucas Bastos

Orientador: Prof. Luiz Fernando Andrade de Castro

Dezembro - 2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Henrique Guilherme Lucas Bastos

**MODELO MULTIDIMENSIONAL DE AVALIAÇÃO
DO DESGASTE DE CADINHO DE ALTO-FORNO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso
de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica
e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Metalurgia Extrativa
Orientador: Prof. Luiz Fernando Andrade de Castro

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2007

A minha mãe, Heloiza. Aos avôs Sr. Lucas e D^a Maria. Aos tios e tias. E a minha namorada Cinara.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Luiz Fernando Andrade de Castro pela paciência, nas sugestões durante a elaboração e na discussão da dissertação.

Ao colegiado da Engenharia Metalúrgica pela compreensão.

A Gerdau Acominas pela oportunidade de aprendizagem e desenvolvimento.

A Universidade Federal de Minas Gerais pela infra-estrutura.

Aos colegas da Gerdau Acominas que me apoiaram e incentivaram e em especial ao engenheiro Vagner Antunes Guimarães pelos ensinamentos.

Aos meus amigos Olney Amorim Viana Filho e Hilton Luis Pereira Lopes.

Aos meus familiares em particular minha mãe Heloiza.

A minha namorada Cinara pela compreensão e apoio.

E a Deus por estar sempre presente em minha vida.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	xi
SÍMBOLOS	xiii
RESUMO.....	xv
1- INTRODUÇÃO.....	1
2- OBJETIVO.....	2
3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1- Projetos de cadinho.....	4
3.1.1- Blocos de carbono	5
3.1.2- Prensados à quente.....	8
3.1.3- Copo cerâmico.....	9
3.1.4- Alguns projetos de cadinho.....	11
3.2- Métodos de avaliação de desgaste do cadinho.....	13
3.2.1- Métodos antigos.....	13
3.2.2- Medição acústica.....	14
3.2.3- Sondagem direta.....	18
3.2.4- Fluxo de calor.....	19
3.2.5- Dinâmica de fluido computacional	23
3.3- Modelos de desgaste.....	26
3.3.1- Modelo unidimensional.....	28
3.3.2- Métodos dos elementos finitos (FEM).....	30
3.3.3- Métodos das bordas (BEM).....	34
3.4- Problemas inversos.....	36
3.4.1 Métodos de Regularização.....	37
3.5- Análise pós morte	39
3.5.1- Investigação dos blocos de carbono	39
3.5.2- Investigação da camada agregada.....	42
3.5.3- Investigação da camada socada entre carcaça e bloco de carbono.....	44
4- METODOLOGIA.....	45
4.1- Definição do modelo de desgaste.....	45
4.2- Caracterização do problema.....	45
4.2.1- Propriedades dos materiais utilizados.....	50
4.3- Modelo para problema direto.....	52

4.3.1- Equacionamento matemático	53
4.3.2- Condições de contornos.....	53
4.3.3- Discretização	55
4.3.4- Modelo.....	56
4.4- Modelo do problema inverso.....	57
4.5- Solução do modelo	60
4.6- Algoritmo para Solução do Problema.....	61
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
5.1- Evolução das temperaturas.....	63
5.2- Avaliação de sensibilidade.....	69
5.3- Avaliação do desgaste.....	76
5.4- Consolidação dos resultados.....	106
5.5- Validação do modelo.....	113
6 – CONCLUSÃO.....	115
7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	116
6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 3.1: Resultado de amostra de bloco de carbono em fornos da NSC, segundo Anan et al (2003).....	6
Figura 3.2: Resultados da penetração de ferro na amostra de bloco de carbono, segundo Fujihara et al (1989).....	7
Figura 3.3: Resultados da expansão térmica em função da penetração de ferro da amostra de bloco de carbono, segundo Fujihara et al (1989).....	7
Figura 3.4: Gráfico da distribuição de poros dos blocos de carbono, segundo Fujihara et al (1989).....	8
Figura 3.5: Projetos de cadinho utilizando tijolos prensados a quente apresentado em http://www.graftech.com/GrafTech/Products+and+Services/Refractory+Systems/Blast+Furnace+Refractories/Default.htm (2005).....	9
Figura 3.6: Projetos de copo cerâmico utilizados em revestimentos do cadinho, segundo McNally et al (2000).....	10
Figura 3.7: Esquemático de projeto utilizando copo cerâmico, segundo McNally et al (2000).....	10
Figura 3.8: Projeto do Alto-forno A da Belgo Mineira, segundo Junqueira et al (2004).....	11
Figura 3.9: Projeto de fornos da Thyssen, segundo Ruther et al (2004).....	12
Figura 3.10: Esquemático do dispositivo de sonda elétrica, segundo Ferreira (1992)	13
Figura 3.11: Equipamento utilizado pela Hatch para fazer medição acústica segundo Sadri (2003).....	15
Figura 3.12: Sensor utilizado pela Hatch para fazer medição acústica segundo Sadri (2003).....	16
Figura 3.13: Esquemático de funcionamento da medição acústica segundo Sutin et al (2005)	16
Figura 3.14: Exemplo de resultado de espessura utilizando o Furnascope segundo Sadri (2003).....	17
Figura 3.15: Exemplo de resultado de espessura e presença de descontinuidade utilizando o Furnascope segundo Sadri (2003).....	17
Figura 3.16: O resultado da sondagem do cadinho do alto-forno L da ISG, segundo Talaat et al (2005).....	18

Figura 3.17 Foto da condição do bloco na região do reparo segundo Talaat et al (2005).....	19
Figura 3.18: Calorímetro utilizado pelo alto-forno da HKM segundo Hofer et al (2003).....	20
Figura 3.19: Distribuição e instalação dos calorímetros no Alto-forno da HKM segundo Hofer et al (2003).....	20
Figura 3.20: Posicionamento da instalação dos calorímetros no Alto-forno da HKM segundo Hofer et al (2003)	21
Figura 3.21: Método de medição do fluxo de calor no fundo do cadinho segundo Ferreira (1992).....	21
Figura 3.22: Esquemático de instalação dos termopares da Corus, http://www.corusresearch.com/pdf/Ironmaking_Mathematical_Modelling_BF_hear.PDF (2005).....	22
Figura 3.23: Termopar típico de cadinho de alto-forno, http://www.ecil.com.br/pt/ti/produtos/sensores_temperatura/termopares.pdf (2005).....	22
Figura 3.24: Resultado computacional do CFD, segundo Haung et al (2005).....	25
Figura 3.25: Gráfico comparativo do resultado de temperatura do modelo com o medido no termopar, segundo Haung et al (2005).....	25
Figura 3.26: Esquemático do perfil da parede do cadinho segundo Carneiro et al (1999).....	28
Figura 3.27: Um exemplo de domínio segundo Torrkulla et al (2000) para solução em elementos finitos.....	30
Figura 3.28: Resultado de um setor do modelo proposto por Ferreira (1992).....	31
Figura 3.29: Tela do resultado de um setor do modelo proposto por Radmoser http://www.it.lut.fi/mat/EcmiNL/ecmi23/node5.html (2005).....	32
Figura 3.30: Programa de desgaste do cadinho da VAI, http://www.vai.at/view.php3?f_id=9350&LNG=EM (2005).....	33
Figura 3.31: Comparação da discretização do BEM e FEM, Yoshikawa et al (1990).....	34
Figura 3.32: Modelo de desgaste da KSC, relatório de viagem (2002).....	35
Figura 3.33: Idéia básica do método da regularização apresentado por velho (2005).....	37
Figura 3.34: Esquemático do mecanismo de erosão dos refratários do Cadinho, segundo Shinotake et al (2003).....	40
Figura 3.35: Exemplo de erosão encontrada, segundo Shinotake et al (2003).....	40

Figura 3.36: Resultado da sondagem do bloco após o fim da campanha, segundo Shinotake et al (2003).....	41
Figura 3.37: Resultado da sondagem do bloco após o fim da campanha, segundo Shinotake et al (2003).....	42
Figura 3.38: Localização da camada agregada que foi selecionada para análise química segundo Huang et al (2005).....	43
Figura 3.39: Impacto da conexão térmica na refrigeração da parede do cadinho, segundo Huang et al (2005).....	45
Figura 4.1: Desenho do alto-forno N ^o . 1 da Gerdau Acominas.....	46
Figura 4.2: Desenho do cadinho do alto-forno N ^o . 1 da Gerdau Acominas.....	47
Figura 4.3: Arranjo de termopar na direção do furo 1.....	47
Figura 4.4: Arranjo de termopar na direção do furo 2.....	48
Figura 4.5: Arranjo de termopar na direção do furo 3.....	48
Figura 4.6: Arranjo de termopar na direção do furo 4.....	49
Figura 4.7: Arranjo de termopar na direção 0 ^o	49
Figura 4.8: Arranjo de termopar na direção 180 ^o	50
Figura 4.9 Valores de condutividade térmica dos materiais utilizados, fornecidos pelos fabricantes.....	51
Figura 4.10: Esquemático do domínio do modelo com as condições de contorno.....	53
Figura 4.11: Esquemático do domínio do modelo com as condições de contorno.....	56
Figura 4.12: Subdivisão do cadinho com a localização dos vetores V.....	57
Figura 4.13: Fluxograma das etapas de avaliação do desgaste.	61
Figura 5.1: Evolução da temperatura da base.....	65
Figura 5.2: Evolução da temperatura da parede do cadinho na elevação 7790.....	65
Figura 5.3: Evolução da temperatura da parede do cadinho na elevação 8350.....	66
Figura 5.4: Evolução da temperatura da parede do cadinho na elevação 8700.....	66
Figura 5.5: Evolução da temperatura da parede do cadinho na elevação 9300.....	67
Figura 5.6: Evolução da temperatura da parede do cadinho na elevação 9700.....	67
Figura 5.7: Evolução da temperatura da parede do cadinho na elevação 10300.....	68
Figura 5.8: Evolução da temperatura da parede do cadinho na elevação 10700.....	68
Figura 5.9: Resultado do modelo considerando a base e parede isolada.....	71
Figura 5.10: Resultados do modelo com variação da condutividade térmica.....	71
Figura 5.11: Resultados do modelo com variação do coeficiente de convecção.....	72
Figura 5.12: Resultados do modelo com variação da intensidade de desgaste.....	72
Figura 5.13: Resultado do modelo para o perfil considerado como real.....	74

Figura 5.14: Resultado da simulação considerando 5% de ruído.....	74
Figura 5.15: Resultado comparativo do perfil de desgaste real e o calculado.....	75
Figura 5.16: Perfil de temperatura do cadinho original.....	76
Figura 5.17: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 1 no ano de 1998.....	79
Figura 5.18: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 1 no ano de 1999.....	80
Figura 5.19: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 1 no ano de 2000.....	81
Figura 5.20: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 1 no ano de 2001.....	82
Figura 5.21: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 2 no ano de 1997.....	83
Figura 5.22: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 2 no ano de 1998.....	84
Figura 5.23: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 2 no ano de 1999.....	85
Figura 5.24: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 2 no ano de 2000.....	86
Figura 5.25: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 2 no ano de 2001.....	87
Figura 5.26: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 2 no ano de 2002.....	88
Figura 5.27: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 2 no ano de 2005.....	89
Figura 5.28: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 3 no ano de 1997.....	90
Figura 5.29: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 3 no ano de 1998.....	91
Figura 5.30: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 3 no ano de 1999.....	92
Figura 5.31: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 3 no ano de 2000.....	93
Figura 5.32: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 3 no ano de 2002.....	94
Figura 5.33: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 4 no ano de 1997.....	95
Figura 5.34: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 4 no ano de 1998.....	96
Figura 5.35: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 4 no ano de 1999.....	97
Figura 5.36: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 4 no ano de 2000.....	98
Figura 5.37: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 4 no ano de 2001.....	99
Figura 5.38: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 4 no ano de 2002.....	100
Figura 5.39: Perfil de temperatura na direção 0° no ano de 1997.....	102
Figura 5.40: Perfil de temperatura na direção 0° no ano de 1998.....	103
Figura 5.41: Perfil de temperatura na direção 0° no ano de 1999.....	104
Figura 5.42: Perfil de temperatura na direção 180° no ano de 1998.....	105
Figura 5.43: Perfil atual de desgaste na direção do furo de gusa 1.....	107
Figura 5.44: Perfil atual de desgaste na direção do furo de gusa 2.....	107
Figura 5.45: Perfil atual de desgaste na direção do furo de gusa 3.....	108
Figura 5.46: Perfil atual de desgaste na direção do furo de gusa 4.....	108
Figura 5.47: Perfil atual de desgaste na direção do 0°.....	109
Figura 5.48: Perfil atual de desgaste na direção do 180°.....	109

Figura 5.49: Evolução do desgaste da parede na elevação 9300.....	111
Figura 5.50: Evolução do desgaste da parede na elevação 9700.....	111
Figura 5.51: Evolução do desgaste da parede na elevação 10300.....	112
Figura 5.52: Evolução do desgaste da parede na elevação 10700.....	112

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela III.1: Resultado das principais propriedades de bloco de carbono em fornos da NSC segundo Omatsu et al (2003).	6
Tabela III.2: Tabela de tipos de termopares, http://www.ecil.com.br/pt/ti/produtos/sensores_temperatura/termopares.pdf (2005).....	23
Tabela V.1: Resultado das diferenças da temperatura padrão e o resultado das simulações e dos erros de estimativa da linha de desgaste.....	75
Tabela V.2: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 1 do ano de 1998.....	79
Tabela V.3: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 1 do ano de 1999.....	80
Tabela V.4: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 1 do ano de 2000.....	81
Tabela V.5: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 1 do ano de 2001.....	82
Tabela V.6: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 2 do ano de 1997.....	83
Tabela V.7: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 2 do ano de 1998.....	84
Tabela V.8: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 2 do ano de 1999.....	85
Tabela V.9: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 2 do ano de 2000.....	86
Tabela V.10: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 2 do ano de 2001.....	87
Tabela V.11: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 2 do ano de 2002.....	88
Tabela V.12: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 2 do ano de 2005.....	89
Tabela V.13: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 3 do ano de 1997.....	90
Tabela V.14: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 3 do ano de 1998.....	91

Tabela V.15: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 3 do ano de 1999.....	92
Tabela V.16: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 3 do ano de 2000.....	93
Tabela V.17: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 3 do ano de 2002.....	94
Tabela V.18: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 4 do ano de 1997.....	95
Tabela V.19: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 4 do ano de 1998.....	96
Tabela V.20: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 4 do ano de 1999.....	97
Tabela V.21: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 4 do ano de 2000.....	98
Tabela V.22: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 4 do ano de 2001.....	99
Tabela V.23: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 4 do ano de 2002.....	100
Tabela V.24: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção 0° do ano de 1997.....	102
Tabela V.25: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção 0° do ano de 1998.....	103
Tabela V.26: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção 0° do ano de 1999.....	104
Tabela V.27: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção 180° do ano de 1998.....	105

SÍMBOLOS

$A(u) - f^\delta$	- Modelo direto;
$F(v)$	- Função de minimização;
H	- Coeficiente de transferência de calor;
I	- Matriz Identidade;
J	- Vetor direção da linha da seção;
κ	- Condutividade Térmica;
L_b	- Distância entre o termopar mais interno e a face quente;
L_c	- Espessura da carcaça;
L_m	- Espessura da massa socada;
L_{p1}	- Penetração do termopar externo;
L_{p2}	- Penetração do termopar interno;
L_r	- Espessura do gusa solidificado;
Δl	- Distância entre dois termopares em linha;
Q	- Fluxo de calor ;
r	- Grandezas na direção radial;
T	- Temperatura;
T_{isoterma}	- Temperatura de solidificação do ferro-gusa
T^{termo}	- T temperatura registrada pelos termopares no ponto do cadinho x
$T_{III,\infty}$	- Temperatura da água;
$T_{V,\infty}$	- Temperatura da água do filme;
$T(r)$	- Temperatura na face fria do carbono;
$T_{(x, \text{Termo}, v)}$	- Temperatura calculada pela técnica dos elementos finitos
$T(z)$	- Temperatura na face fria do carbono da parede;
DT	- Matriz de sensibilidade,
ΔT	- Diferença da temperatura entre dois pontos;
$\Delta T_{(Piter)}$	- Diferença entre a temperatura medida e calculada;
\tilde{u}_j	- Temperatura registrada pelos termopares;
$u(x_j, \Gamma_2)$	- Temperatura calculada pelo modelo dos elementos finitos;
v^{iter}	- Comprimento do vetor para o número da interação determinado;
V^Δ	- Solução a priori do comprimento do vetor aceitável para o problema;
X^{Termo}	- Posição dos termopares;
z	- Grandezas na direção vertical;
α	- Parâmetro de regularização;

δ	- Ruído;
∇	- Operador diferencial vetorial chamado nabia;
$\tilde{\Phi}(\Gamma_2)$	- Função de minimização da linha de desgaste;
$\Psi_j(\Gamma_2)$	- Ângulo entre a linha de desgaste e as linhas das seções;
$\Omega [u]$	- Operador de regularização;

RESUMO

A campanha dos altos-fornos tem sido determinada pela duração do revestimento refratário do cadinho, desta forma, é muito importante um acompanhamento sistemático da evolução do desgaste, para se programar a reforma do forno. Tenta-se com isso evitar interromper prematuramente a campanha ou estendê-la até um limite seguro.

O desgaste do refratário do cadinho acontece pela corrosão do ferro-gusa e álcalis. Outro importante elemento presente na vida do cadinho é a camada agregada, que fica aderida ao bloco de carbono e impede o contato direto com o banho de líquidos. Ela pode ser formada por ferro, escória e coque, sendo que sua composição é variada ao longo da altura do cadinho. Sua presença é importante na proteção dos blocos de carbono e sua queda pode provocar o desgaste. A medição do refratário remanescente e da camada agregada é difícil de ser realizada diretamente durante o funcionamento do forno, com isso o modelo matemático de transferência de calor é uma ferramenta poderosa para quantificar o desgaste baseada na avaliação da isoterma de 1150°C.

Neste trabalho, um modelo de avaliação de desgaste simétrico axialmente de transferência de calor baseado no método de elemento finito e o método iterativo Gauss-Newton foi desenvolvido. Usando este modelo computacional, o perfil de temperatura do cadinho foi avaliado de forma a investigar o desgaste máximo presente nos blocos de carbono.

Os resultados de simulação baseados no modelo com o propósito de avaliação do desgaste do cadinho do alto-forno 1 da Gerdau Acominas, se mostraram bastante coerentes, evidenciando ser uma ferramenta poderosa para qual foi proposto.

ABSTRACT

Blast furnace campaign has been determined by hearth refractory line lifetime, this way, it is very important a systematic follow up of wearing evolution, to plan blast furnace revamp. It is tried with that to avoid to interrupt the campaign prematurely or to extend it until a safe limit.

Hearth refractory wear happens due to hot metal and alkalis corrosion. Another important element present in the hearth life is skull, that is over carbon block and it impedes the direct contact with the liquids. It can be formed by iron, slag and coke, and its composition is varied along the hearth height. Its presence is important in the carbon blocks protection and its fall can provoke the wear. The refractory thickness measurement and skull thickness is difficult to be carried out directly during the blast furnace operation, with that the mathematical heat transfer model is a powerful tool to quantify the wearing based on the evaluation of the 1150 °C isotherm.

In this work, a heat transfer axially symmetrical wear model based on finite element method and the Gauss-Newton interactive method were developed. Using this computational model, the hearth temperature profile was evaluated in way to investigate the maximum wearing present in the carbon blocks.

The simulation results based in the model with the purpose to evaluate the Gerdau Açominas blast furnace 1 hearth wearing, were shown quite coherent, evidencing to be a powerful tool to be used.

1 – INTRODUÇÃO

O aprimoramento da operação e manutenção dos altos-fornos e avanços tecnológicos dos novos projetos tem levado ao aumento de produtividade, redução de consumo de combustíveis, melhoria da qualidade do ferro-gusa e prolongamento da vida útil do equipamento. Com o desenvolvimento de novas tecnologias de refrigeração como os “staves coolers” e a possibilidade de troca dos mesmos em pequenas paradas, a definição do fim de campanha passou a ser definida pelo cadinho.

Além de cuidados especiais com projeto e construção, é imprescindível o estabelecimento de um sistema de monitoramento confiável da evolução de desgaste do cadinho, de modo a conhecer a espessura residual do revestimento refratário, o que possibilita maior segurança operacional na tomada de decisão para se evitar um desgaste prematuro ou um acidente catastrófico. Essa informação deve ser acompanhada e analisada durante toda campanha afim de que contramedidas sejam realizadas somente quando necessárias.

Para monitorar o desgaste do cadinho existem vários métodos de avaliação, que podem ser divididos em dois grandes grupos. As medições diretas consistem no ensaio destrutivo do refratário remanescente, ou seja, retira-se uma amostra e mede-se sua espessura. Os métodos indiretos são ensaios não destrutivos que utilizam a propriedade do material para estimar a espessura remanescente.

O cadinho é tradicionalmente monitorado por um arranjo de termopares. Se tivermos dados suficientes precisos da localização dos termopares e as características dos materiais do revestimento do forno, pode-se calcular através de modelos matemáticos, a transmissão de calor, a espessura do refratário relativa a cada posição, possibilitando traçar o perfil de desgaste do cadinho. Os modelos podem ser simples, como os unidimensionais, até os complexos, como os tridimensionais.

Este trabalho consiste em desenvolver um modelo matemático bidimensional para avaliar o desgaste dos blocos de carbono localizados no cadinho a partir das temperaturas lidas pelos termopares.

2 – OBJETIVO

Desenvolver um modelo matemático multidimensional para o cálculo do perfil de temperatura do revestimento refratário do cadinho de alto-forno, e a partir da isoterma de 1150°C estimar o perfil de desgaste dos blocos de carbono remanescente. O modelo deverá ser adequado para utilização industrial. Este acompanhamento permitirá tomar as contramedidas necessárias para prolongamento de vida do alto-forno e estimar a sua campanha. Este modelo também poderá ser usado para escolher o local mais adequado para a corrida de salamandra ao final da campanha.

3 – REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS

A determinação do estado de conservação de cada equipamento ao longo de sua utilização é importante para se projetar uma expectativa de vida. No caso do alto-forno este conhecimento é muito importante, cuja consequência pode refletir em acidentes catastróficos e perda da rentabilidade do negócio.

O refratário do cadinho é o componente mais crítico do alto-forno. É uma região de difícil reparo, sendo que uma parada pode causar impacto significativo nos negócios da companhia. O monitoramento das condições do refratário remanescente é importante para se ajustar práticas operacionais e de prevenção para maximizar a vida do cadinho.

Para verificar o método mais adequado de monitoração do cadinho no meio industrial, será feita uma revisão bibliográfica direcionada a aplicação prática. Para monitorar o desgaste do cadinho existem vários métodos de avaliação. Eles podem ser divididos em dois grandes grupos. Medição direta da espessura residual e avaliação indireta.

A medição direta consiste no ensaio destrutivo do refratário remanescente, ou seja, retira-se uma amostra e mede-se sua espessura. Os métodos indiretos são ensaios não destrutivos que utilizam a propriedade do material para estimar a espessura remanescente. As medições diretas provocam uma fragilização no local da amostragem, o que não é desejável.

3.1- Projetos de cadinho

A disponibilidade e a vida do alto-forno são fatores-chaves dentro de uma usina siderúrgica. As dimensões dos fornos tendem a aumentar e uma produtividade crescente é exigida. Então, a vida do revestimento refratário tem que ser estendida, e o número de reformas para reparo do refratário deve ser minimizado. Para satisfazer estas exigências, materiais refratários têm um papel crucial. Entre alguns projetos de alto-fornos, existem diferenças grandes em dimensões, processos, capacidades, etc. Isto significa que não há um único refratário para todos os revestimentos de fornos.

O tempo de vida do revestimento refratário é determinado através do projeto, construção, qualidade, manutenção e operação. "Corus Reserch (2003)" cita que embora todos os processos para fabricação de ferro por minério de ferro, carvão e ar parecem ter o mesmo princípio, várias filosofias de processo são usadas. Conseqüentemente vários conceitos para o refratário de um alto-forno são usados:

- Conceito de refrigeração: Este conceito está baseado no fenômeno de solidificação da camada agregada na frente do refratário através da retirada de calor por elementos refrigerantes como stave, filme de água e placas de refrigeração para proteger contra desgaste do banho em contato. O processo de proteção consiste na adesão da camada agregada no revestimento. Normalmente, usa-se um material de condutividade térmica elevada a base de carbono (semi-grafita e/ou grafita).

- Conceito de microporo: Este conceito japonês foi desenvolvido para dificultar a penetração do ferro-gusa no revestimento refratário pela aplicação de materiais de carbono microporos.

- Conceito prensagem a quente: Este conceito norte-americano é baseado no uso de tijolos prensados a quente que são capazes de absorver melhor as tensões térmicas e menos solúveis em ferro-gusa pouco saturado de carbono do que os materiais acima mencionados.

- Conceito copo cerâmico: Em vez de utilizar material a base de carbono, um material cerâmico a base de óxidos é usado, deste modo a dissolução de carbono do refratário é prevenida. Em alguns casos o material cerâmico é colocado na frente de materiais de carbono e às vezes só um tubo cerâmico (parede) é usado.

Nos últimos anos, uma combinação de diferentes conceitos está sendo aplicada juntamente com o desenvolvimento de materiais refratários com alta condutividade e baixíssima porosidade, conhecida como ultra-microporo.

3.1.1- Blocos de carbono

Num processo industrial de fabricação de blocos de carbono, as matérias-primas são misturadas, passam por um processo de extrusão para formar um bloco grande e depois é levado ao forno durante aproximadamente 30 dias. O ciclo de cozimento deve ser longo e devagar para evitar trincas. Depois de cozidos, os blocos são usinados na forma final.

Os blocos de carbono com poros finos e pequenos são efetivos para prevenir a corrosão e aumentam a resistência de choque térmico. Sua porosidade varia de 15 - 22 (% volume) de porosidade e tamanho do médio do poro de aproximadamente 10 μm em diâmetro.

De acordo com investigação de Fujihara et al (1989), penetração de ferro nos poros maiores que 1 μm em diâmetro acelera a dissolução de carbono no ferro-gusa e a ocorrência de zona frágil, ou conhecida em inglês como “embrittled”. Segundo o mesmo autor, para reduzir a penetração do ferro e manter a resistência ao choque térmico, foi desenvolvida uma técnica de subdividir os poros, formando os “whiskers”. O resultado da corrosão dos blocos de carbono através do ferro-gusa pode ser diminuído de 30 - 40% quando o tamanho de poro é reduzido para abaixo de 1 μm em diâmetro. Através desta invenção, a vida do alto-forno que era aproximadamente 10 anos, pode ser prolongada por vários anos e sua confiabilidade foi aumentada. A Figura 3.1 de Anan et al (2003) mostra a comparação do resultado de amostra de bloco de carbono retirada do forno Hirohata 4 e Muroran 2. Pode-se observar que o bloco do forno 4 de Hirohata apresentou maior degradação. Isto se deve qualidade do bloco com maior tamanho de poros. A Tabela III.1 apresenta a principais características de alguns blocos de carbono fabricados no Japão citado por Omatsu et al (2003). Pelo ano do desenvolvimento, podemos verificar a evolução tecnológica na fabricação dos blocos.

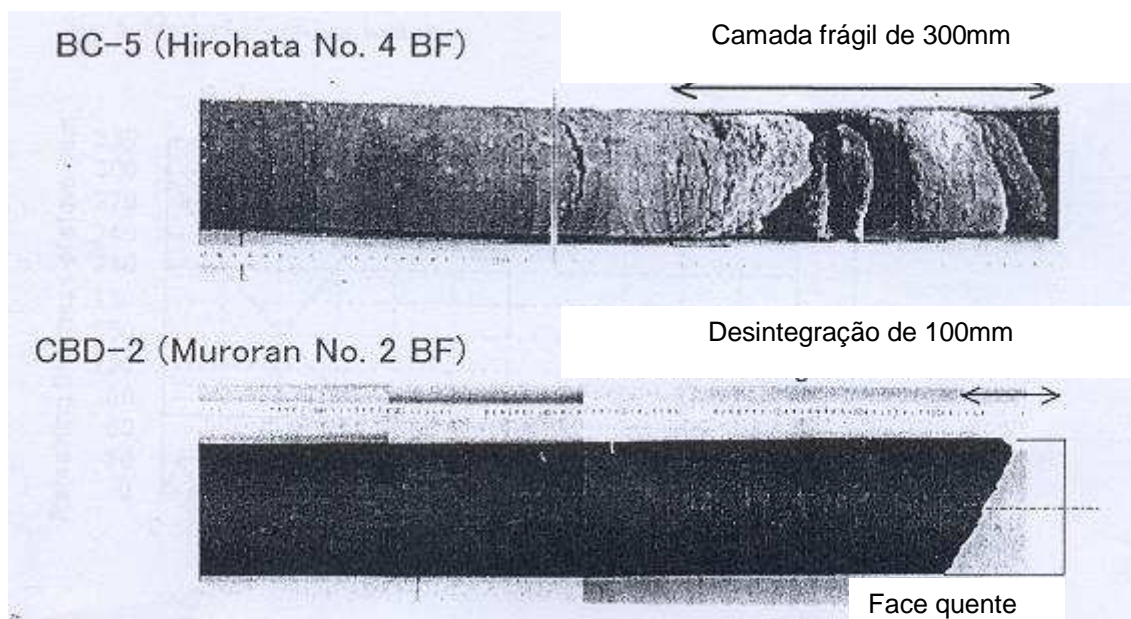


Figura 3.1: Resultado de amostra de bloco de carbono em fornos da NSC segundo Anan et al (2003).

Tabela III.1: Resultado das principais propriedades de bloco de carbono em fornos da NSC segundo Omatsu et al (2003).

Bloco de carbono	BC-5	CBD-1	CBD-2	CBD-2RG	CBD-3RG	CBD-GT1
Ano de Desenvolvimento	1965	1975	1981	1985	1994	2001
Densidade aparente	1,56	1,58	1,59	1,71	1,76	1,96
Resistência de compressão (MPa)	40,5	43,0	45,1	66,9	63,0	76,2
Condutividade Térmica (W/m k)	17,1	13,2	13,8	23,3	33,3	37,0
Poros com diâmetro maior que 1µm	16%	11%	2,7%	1%	0,2%	0,15%
Índice de resistência à corrosão	100	140	140	170	250	500

Fujihara et al (1989) realizaram vários testes com amostras de blocos de carbono retiradas do cadinho. Na Figura 3.2 observa-se que na região da face quente apresenta grande penetração de gusa juntamente com a presença de álcalis. A penetração destes materiais provoca mudanças nas propriedades do bloco e gera trincas quando expande. O efeito da dilatação do bloco na presença de ferro é mostrado da Figura 3.3.

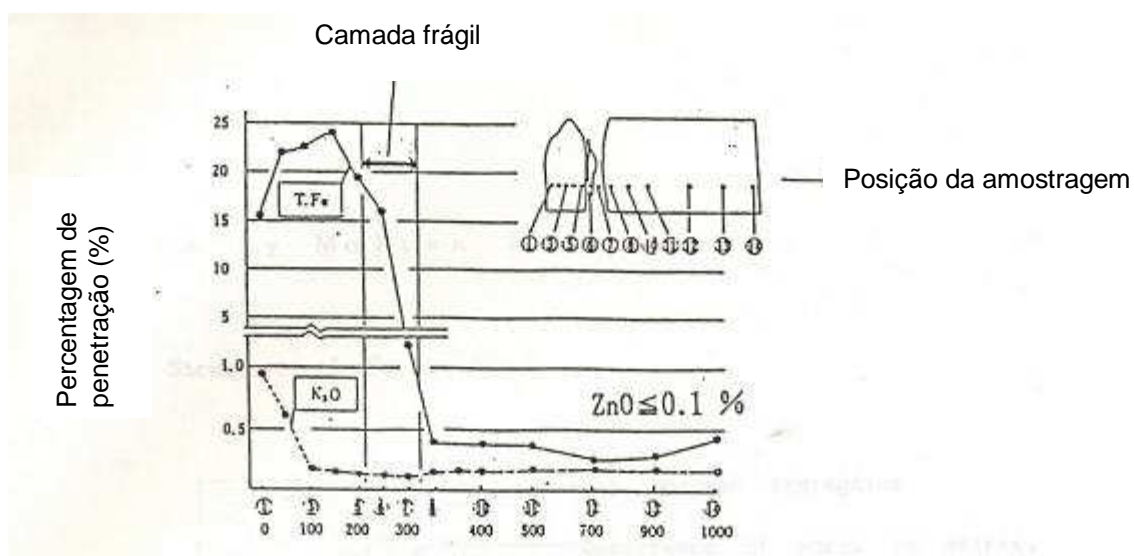


Figura 3.2: Penetração de ferro na amostra de bloco de carbono segundo Fujihara et al (1989).

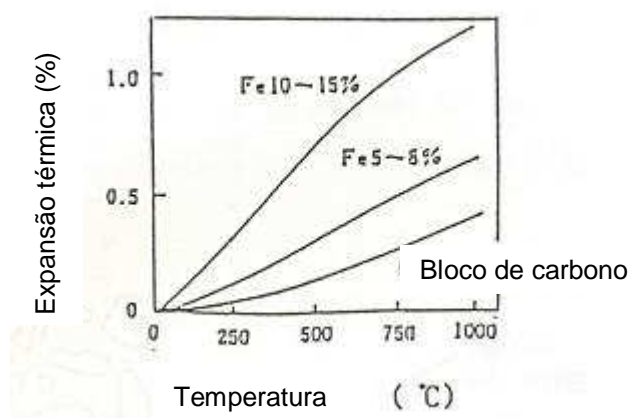


Figura 3.3: Expansão térmica em função da penetração de ferro da amostra de bloco de carbono segundo Fujihara et al (1989).

O índice de resistência à corrosão foi desenvolvido pela NSC para avaliar a perda de material na presença de ferro gusa. Foi definido como perda padrão, valor 100, os resultados para o bloco de carbono convencional. Para medir a evolução dos blocos mais recentes, atribuir quantas vezes ele é mais resistente do que o bloco convencional, ou seja, menor tendência de trinca do bloco pela presença de álcalis. A Figura 3.4 apresenta o gráfico de distribuição dos poros. Pode-se observar que o tijolo BC-8SR, pertence a classe dos supermicroporos, é que apresenta a maior quantidade de poros pequenos, por isso ele é considerado melhor.

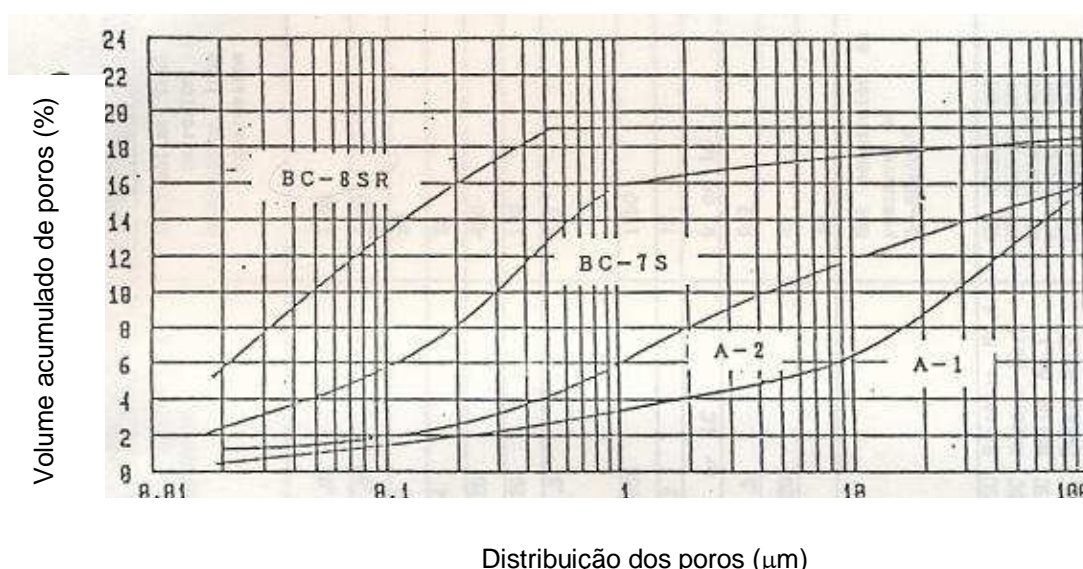


Figura 3.4: Gráfico de distribuição dos poros segundo Fujihara et al (1989).

3.1.2- Tijolo prensado a quente

Na prensagem a quente, o processo produz um tijolo quase acabado de carbono ou semigraphite em aproximadamente três minutos através da passagem de uma corrente elétrica no molde, com as matérias primas prensadas, a uma temperatura de 850° C. O resultado é alta resistência, baixa permeabilidade e condutividade térmica elevada. Depois de cozidos, os tijolos padrões são usinados para forma final.

A Figura 3.5 mostra um projeto típico de cadinho utilizando tijolos prensados a quente. Podem-se notar os pequenos tijolos são instalados de modo que a espessura da parede seja adequada para operação do alto-forno e processo de assentamento do tijolo é semelhante à construção de uma casa.

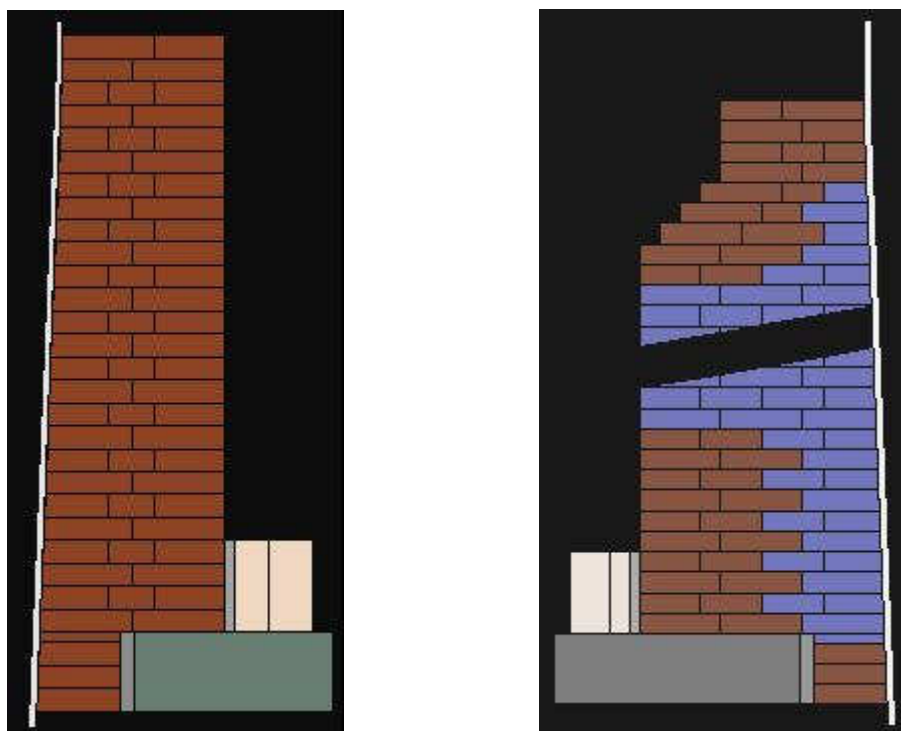


Figura 3.5: Projeto de cadinho utilizando tijolos prensados a quente apresentado em <http://www.graftech.com/GrafTech/Products+and+Services/Refractory+Systems/Blast+Furnace+Refractories/Default.htm>(2005).

3.1.3- Copo cerâmico

Os primeiros copos cerâmicos foram projetados como um revestimento para proteger o bloco de carbono contra ataque inicial de álcalis e ferro-gusa não saturado, agora, depois de muito tempo de experiência e de melhoria, a confiabilidade e estabilidade do conceito do copo cerâmico já está bem estabelecido.

O surgimento do copo cerâmico citado McNally et al (2000) pode ser localizado no início dos anos 70 quando foram colocados os primeiros blocos cerâmicos, mulita, foram colocados no fundo do cadinho, em cima dos blocos de carbono. Hoje em dia, realmente é raro quando um bloco cerâmico não é projetado sobre o carbono, até mesmo os proponentes para a solução térmica, onde são recomendados materiais de condutividade térmica muito alta. Tendo resolvido o problema de uso de bloco no fundo, o próximo passo lógico era empregar os materiais cerâmicos para proteger a área de interface da parede e base do cadinho. Em 1984 os primeiros copos

cerâmicos foram instalados no Hamborn BF6 da Thyssen e Ruhrort BF6. Era um mini copo. Um copo completo foi instalado no reparo total em 1989. A Figura 3.6 apresenta alguns projetos de copo cerâmico utilizados em revestimentos do cadinho, a Figura 3.7 mostra um projeto de revestimento utilizando copo cerâmico.

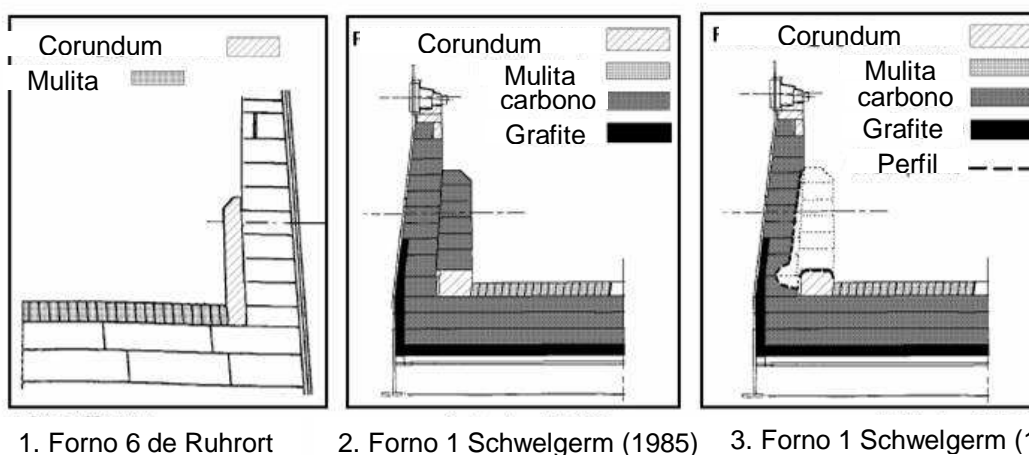


Figura 3.6: Projetos de copo cerâmico utilizados em revestimentos do cadinho, segundo McNally et al (2000).



Figura 3.7: Projeto de revestimento utilizando copo cerâmico, segundo McNally et al (2000).

3.1.4- Alguns projetos de cadinhos

Os projetos de cadinho dependem muito da filosofia adotada. Os projetos encontrados no Brasil são baseados na filosofia japonesa, onde se utiliza grandes blocos de carbono com alta condutividade térmica. A Figura 3.8 mostra o projeto de cadinho do alto-forno A da Belgo Mineira, segundo Junqueira et al (2003). A filosofia européia é baseada em blocos de carbono menores e na frente, tijolos de óxidos cerâmicos com menor condutividade térmica. A Figura 3.9 apresenta projetos de cadinhos da Thyssen segundo Ruther et al (2004).

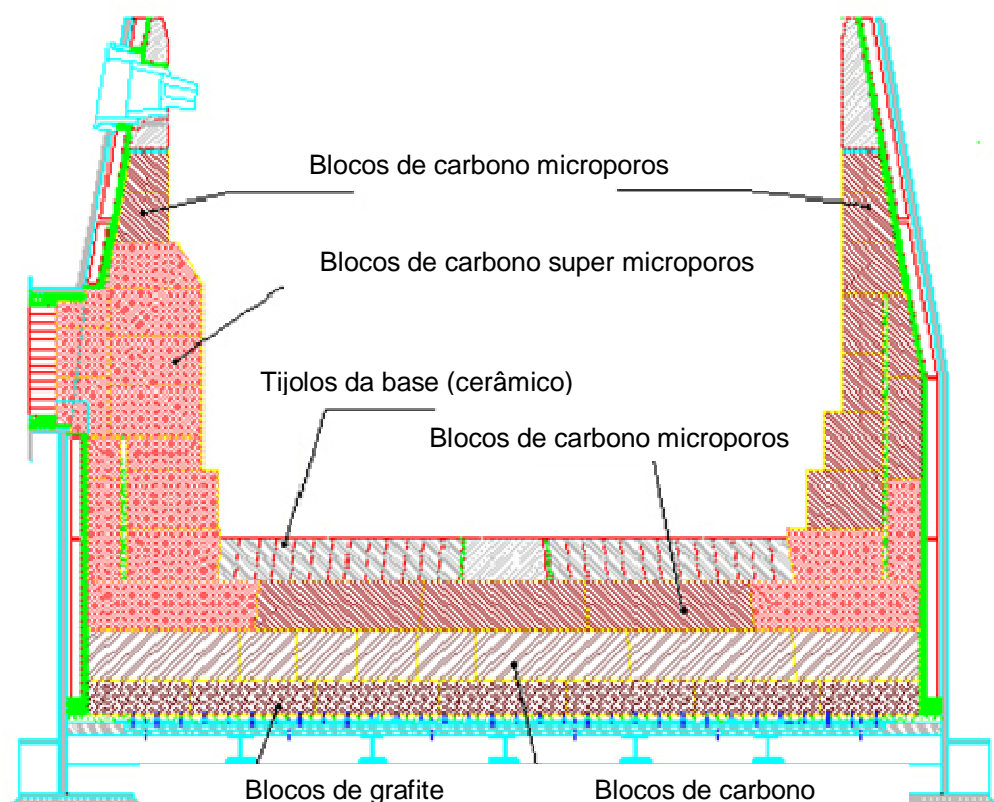


Figura 3.8: Projeto do Alto-forno A da Belgo Mineira, segundo Junqueira et al (2003).

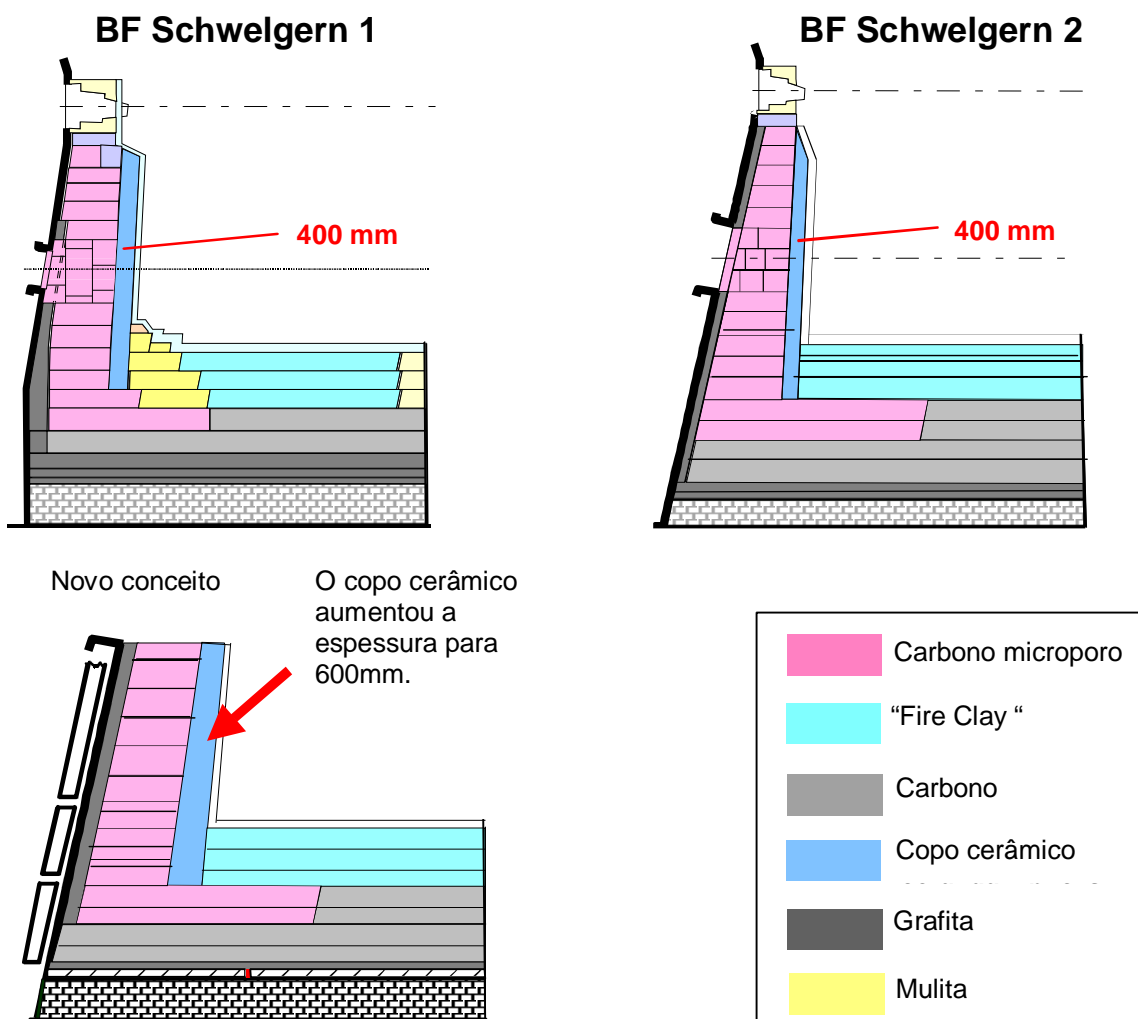


Figura 3.9: Projeto de fornos da Thyssen segundo Ruther et al (2004).

3.2- Métodos de avaliação do desgaste do cadinho

3.2.1- Métodos antigos

Dentre os métodos existentes de avaliação do desgaste de cadinhos, alguns utilizavam materiais radioativos. Nesse caso, são inseridas pastilhas radioativas no bloco de carbono em profundidades determinadas. Segundo Shultz et al (1974) e Perco et al (1974), à medida que a parede vai se desgastando, essas fontes pontuais vão sendo consumidas, até o momento que esses materiais desaparecem, permitindo assim estimar a espessura remanescente. Outra aplicação seria através da introdução de materiais radioativos pelas ventaneiras. Segundo Campbell et al (1984), este método era utilizado para avaliar o gusa remanescente, ou seja, a salamandra. Para se determinar a salamandra é realizado um balanço do material radioativo. Alguns inconvenientes desses métodos estão relacionados à manipulação de matérias radioativas e à sensibilidade necessária dos detectores de sinais, fato esse que provoca erros de estimativas.

O processo de medição do desgaste por sondas elétricas utiliza cabos elétricos previamente instalados no revestimento da parede ou fundo do cadinho, com a capacidade de transmitir ondas ou pulsações. Segundo Sakamoto et al (1982), essas ondas são refletidas até o emissor e o tempo de propagação desses pulsos é diretamente relacionado com o comprimento remanescente do cabo. Assim, à medida que esse comprimento vai diminuindo com o desgaste da parede, a frequência vai aumentando de forma proporcional. Um inconveniente desse método está ligado a impossibilidade de detecção da camada de gusa estagnada, solidificado além da superfície erodida, que funciona como uma proteção extra ao refratário do cadinho. O princípio de funcionamento segundo Ferreira (1992) é mostrado no esquemático na Figura 3.10.

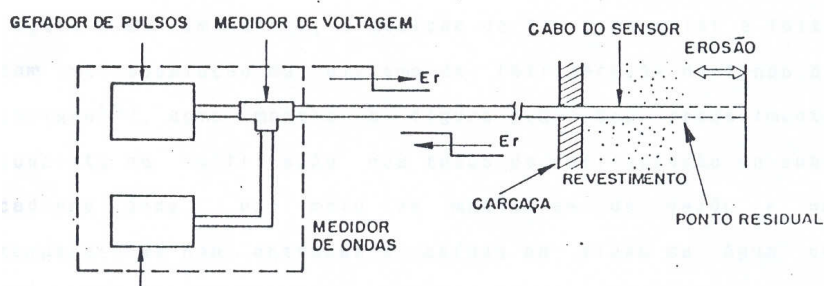


Figura 3.10: Esquemático do dispositivo de sonda elétrica segundo Ferreira (1992).

3.2.2- Medição Acústica

A técnica de ressonância acústica para medição da espessura do refratário remanescente foi desenvolvida por Noguees et al (1993). Esta técnica representa um método alternativo às técnicas mais utilizadas.

Nesse método segundo Zulli et al (2003), um bloco de refratário é excitado acusticamente pela aplicação de uma força senoidal, gerada eletrodinamicamente, varrida por um alcance de frequência nominal. A força é transmitida para o bloco por golpe de uma barra de metal. Um sensor de vibração montado numa barra adjacente detecta a resposta acústica. As ondas referentes às duas faces do bloco são detectadas e analisadas. O primeiro harmônico é o mais forte, por isso é facilmente detectado. O comprimento do refratário (ou espessura) é determinado usando a velocidade do som no refratário e a frequência de ressonância determinada para o bloco. Ela é capaz de determinar a espessura sem depender das dimensões, forma e temperatura da superfície.

A técnica de análise não destrutiva baseada no princípio citado por Sadri (2003) é usada para determinar somente a espessura residual do revestimento refratário, mas com avaliação ligeiramente diferente, é possível identificar a posição de trincas e aberturas. A técnica ultra-som acústico usa as propriedades mecânicas do material para determinar qualquer perda ou adição da espessura original.

Antes de se iniciar a medição no local, é necessário testar os componentes refratários individualmente. Os testes são: determinar a densidade, velocidade de onda e propriedades elásticas. Depois estas informações serão usadas em um software para correlacionar as características do sinal acústico com a espessura do refratário.

Os sinais transientes são gerados na superfície do equipamento. A onda viaja por várias camadas sólidas e reflete atrás da interface sólido/ar ou de sólido/liquido. Na hora da análise, a propriedade de cada camada será usada para se determinar a espessura da última camada sólida (normalmente a última camada de tijolo e ou material agregado). Se as propriedades do material agregado não são conhecidas, a soma dos sinais poderia ser interpretada como a espessura refratária ser mais

espessa do que esperado. Isto é devido para o fato que as camadas agregadas normalmente têm propriedades mecânicas mais baixas do que os refratários. Em geral, os resultados representam à presença de camadas sólidas.

O equipamento utilizado pela Hatch é o FurnaScope. Ele opera baseado no princípio do ultra-som acústico. A Figura 3.11 ilustra o FurnaScope e a Figura 3.12 mostra o sensor e a Figura 3.13 mostra um esquemático de processo de medição.



Figura 3.11: Equipamento utilizado pela Hatch para fazer medição acústica segundo Sadri (2003).



Figura 3.12: Sensor utilizado pela Hatch para fazer medição acústica segundo Sadri (2003).

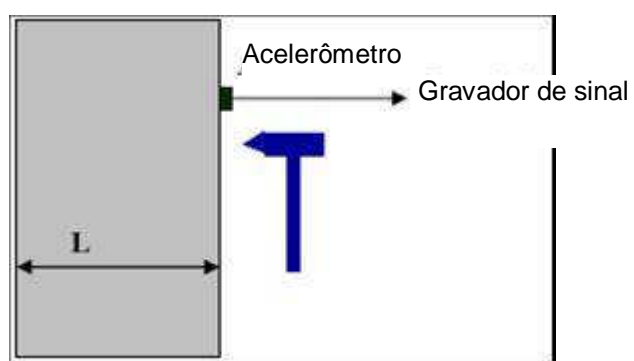


Figura 3.13: Esquemático de funcionamento da medição acústica segundo Sutin et al (2005).

Na Figura 3.14, o sinal mostra que a espessura encontrada é 650 mm. Na figura 3.15, o sinal mostra uma espessura total de 1,6m e uma descontinuidade a 0,66m.

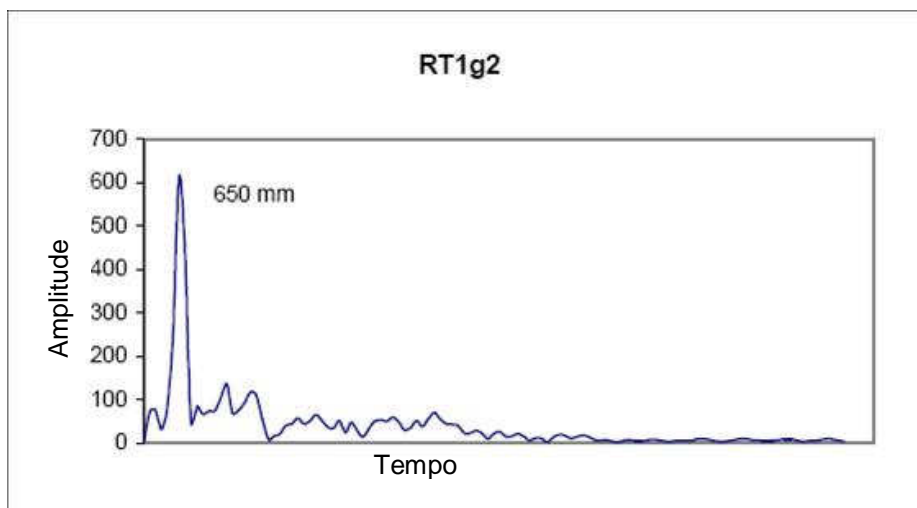


Figura 3.14: Exemplo de resultado de espessura utilizando o Furnascope segundo Sadri (2003)

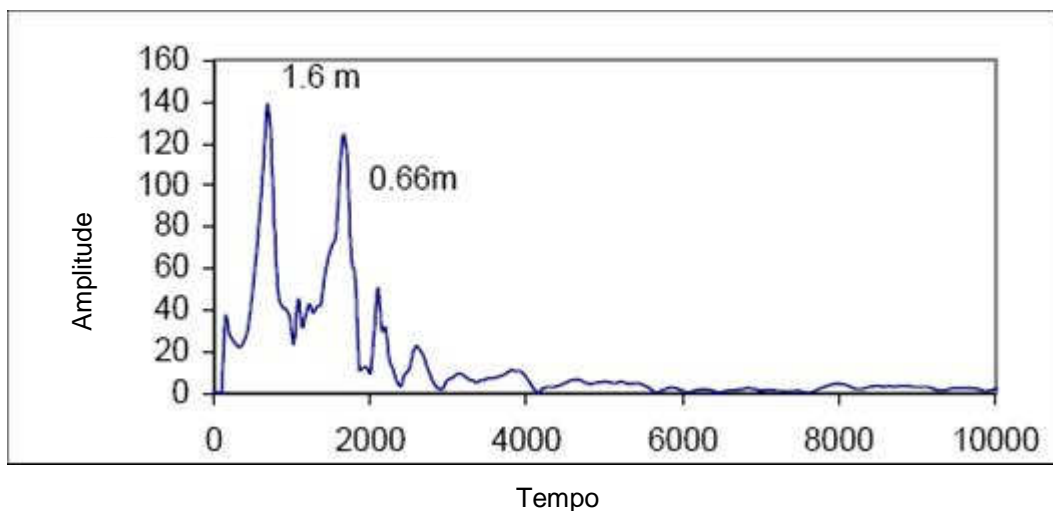


Figura 3.15: Exemplo de resultado de espessura e presença de descontinuidade utilizando o Furnascope segundo Sadri (2003).

3.2.3- Sondagem direta

O método de sondagem é usualmente utilizado na investigação “post mortem”, mas é também utilizado para verificação da integridade dos blocos de carbono remanescente. Segundo Talaat et al (2005) os blocos de carbono apresentam uma temperatura de deteriorização de 538°C, sendo que a partir desta temperatura o mesmo apresenta perda nas propriedades. A amostragem consiste na furação para se determinar a parte íntegra do bloco. É necessário realizar uma furação, com copo, para retirada do material. Todo procedimento tem que ter as temperaturas dos blocos acompanhadas, sendo o limite de furação quando a temperatura do refratário chegar a 538°F. Este tipo de inspeção somente é recomendado quando os outros métodos de avaliação de desgaste não forem confiáveis devido à grande deteriorização dos blocos. Este procedimento foi realizado no alto-forno L da ISG para se verificar a necessidade de reparo. A Figura 3.16 mostra o resultado da sondagem do cadinho que estava bastante degradado. Figura 3.17 mostra a foto da condição do bloco na região do reparo.



A Figura 3.16: O resultado da sondagem do cadinho do alto-forno L da ISG segundo Talaat et al (2005).



Figura 3.17 Foto da condição do bloco na região do reparo segundo Talaat et al (2005).

3.2.4- Fluxo de calor

A determinação do fluxo de calor no alto-forno pode ser feita diretamente com a aplicação de algum tipo de calorímetro e outros, e indiretamente, através da aplicação da lei de Fourier com conhecimento prévio da condutividade térmica dos materiais e dos valores da temperatura localizados no interior do revestimento dos cadinhos. Para determinação da temperatura são utilizados termopares do tipo K.

No método direto segundo Hofer et al (2003), pode-se colocar os calorímetros na carcaça ou em contato direto com o refratário do alto-forno. Como a taxa de calor ao longo da parede é constante, o sinal de medida é independente da profundidade de instalação de sensor. Então os medidores de fluxo de calor podem ser colocados na face fria do refratário, perto da carcaça. A durabilidade é excelente, enquanto o tijolo do cadinho não estiver danificado. A Figura 3.18 mostra o calorímetro utilizado pela HKM e a Figura 3.19 e 3.20 mostra o posicionamento de calorímetro da HKM.

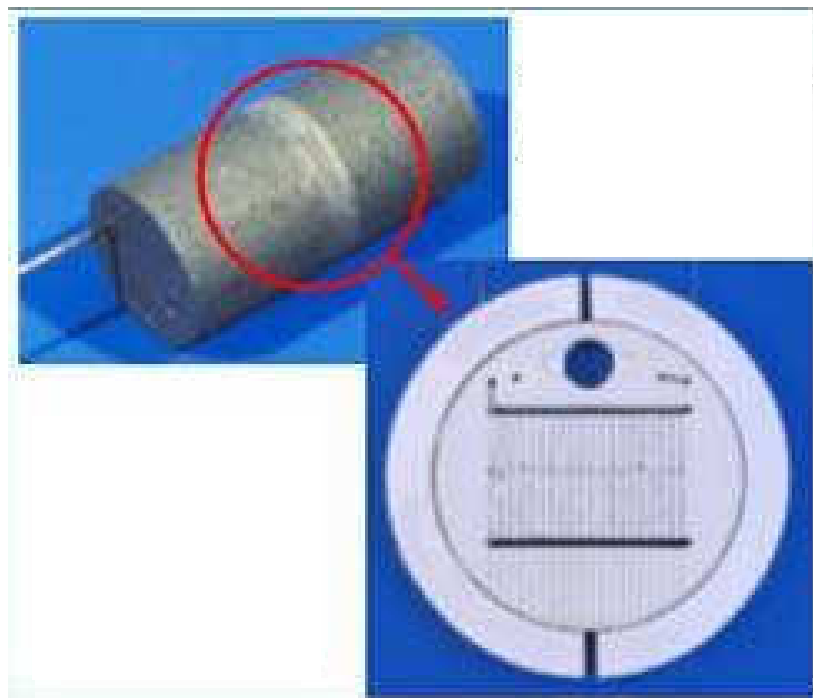


Figura 3.18: Calorímetro utilizado pelo alto-forno da HKM segundo Hofer et al (2003).

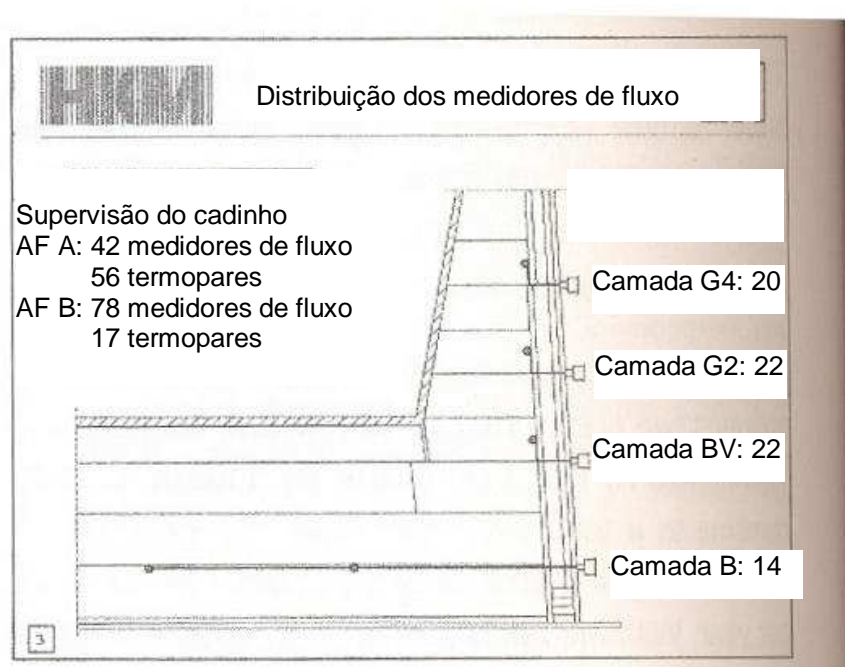


Figura 3.19: Distribuição e instalação dos calorímetros no Alto-forno da HKM segundo Hofer et al (2003).

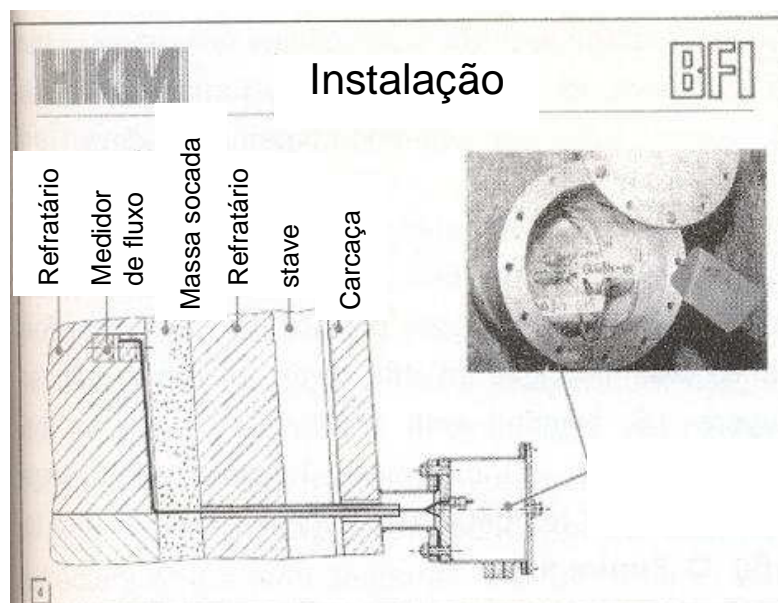


Figura 3.20: Posicionamento da instalação dos calorímetros no Alto-forno da HKM segundo Hofer et al (2003),

Citado por Ferreira (1992), a medição do fluxo de calor também pode ser feita pela temperatura e vazão de água do sistema de refrigeração do fundo do cadinho, como mostra a Figura 3.21. Seu procedimento consiste na utilização dos tubos de refrigeração do sub-cadinho onde, por meio de medidores de vazão e de temperaturas nas entradas e saídas do fluxo de água de refrigeração, calcula-se o calor extraído. Este processo também pode ser aplicado em projetos mais recentes, como sistema “stave cooler”, para o cálculo do fluxo de calor da parede. Em seguida este fluxo de calor é associado a uma determinada espessura de refratários ou profundidade da salamandra.

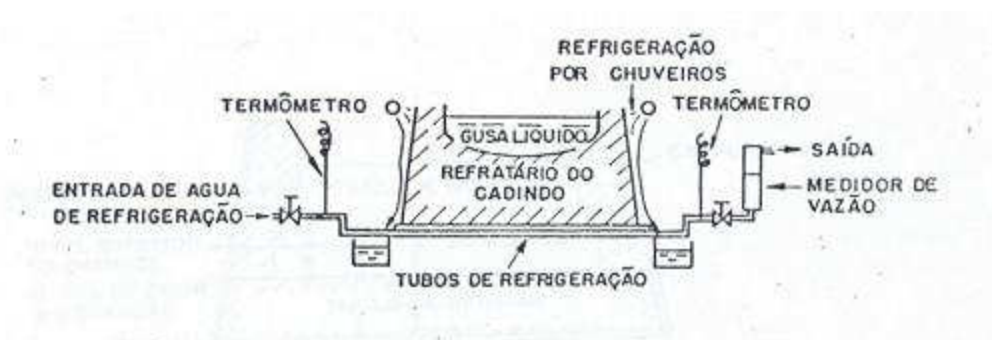


Figura 3.21: Método de medição do fluxo de calor no fundo do cadinho segundo Ferreira (1992).

A maioria dos processos de medições indiretas utiliza propriedades dos materiais e de temperaturas obtidas por termopares, cuja localização usual é ilustrada de forma esquemática na Figura 3.22. Estes métodos utilizam diferentes modelos matemáticos com diferentes graus de complexidade, variando de autor para autor e da precisão que se quer determinar. Para se determinar as espessuras refratárias residuais, um grande número de termopares é geralmente instalado no refratário do cado. A Figura 3.23 mostra um termopar típico de cado de alto-forno. A Tabela III.2 mostra alguns tipos de termopares, mas o recomendado para cado é o tipo k.

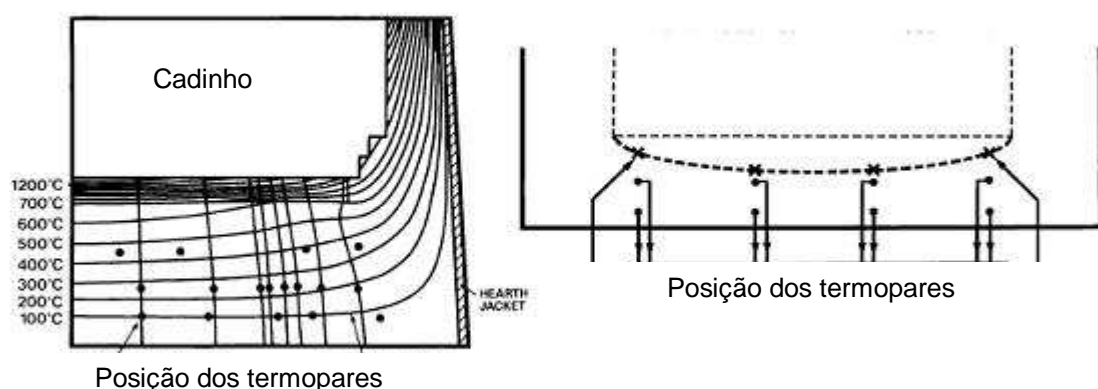


Figura 3.22: Esquemático de instalação dos termopares da Corus,

http://www.corusresearch.com/pdf/Ironmaking_Mathematical_Modelling_BF_hear.pdf (2005).



Figura 3.23: Termopar típico de cado de alto-forno, http://www.ecil.com.br/pt/ti/produtos/sensores_temperatura/termopares.pdf (2005).

Tabela III.2: Tabela de tipos de termopares,

http://www.ecil.com.br/pt/ti/produtos/sensores_temperatura/termopares.pdf (2005).

TIPO DE TERMOPAR	FAIXA DE TEMPERATURA	LIMITES DE ERRO	
		PADRÃO (Escolher o maior)	ESPECIAL (Escolher o maior)
T	0 a 370°C	± 1°C ou ± 0,75%	±0,5°C ou ±0,4%
J	0 a 760°C	±2,2°C ou ± 0,75%	±1,1°C ou ±0,4%
E	0 a 870°C	±1,7°C ou ±0,5%	±1°C ou ±0,4%
K	0 a 1260°C	±2,2°C ou ±0,75%	±1,1°C ou ±0,4%
T	-200 a 0°C	±1°C ou ±1,5%	-
E	-200 a 0°C	±1,7°C ou ±1%	-
K	-200 a 0°C	±2,2°C ou ±2%	-
N	0 a 1260°C	±2,2°C ou ±0,75%	±1,1°C ou ±0,4%

3.2.5- Dinâmica de Fluido Computacional

Várias pesquisas têm sido feitas para o entendimento dos mecanismos de desgaste. Esses mecanismos são significativamente afetados pela viscosidade e a distribuição de temperatura do ferro-gusa e a distribuição da temperatura ao longo do refratário. Então, é crítico investigar o fluxo do ferro-gusa e a transferência de calor para maximizar a vida do forno. Atualmente, as operações do forno são associadas com a monitoração de dados relativos aos instrumentos estrategicamente colocados. Por causa da dificuldade em se fazer medidas dentro do cadinho, a determinação direta desses fluxos e a distribuição de temperatura são impedidas. O problema é discutido mais adiante pelo fato que os padrões de fluxo são uma função dos projetos do cadinho e condições operacionais. Recentemente, com o avanço de tecnologias de computacional, esforços foram feitos para se usar técnica CFD para elucidar as condições internas do cadinho. Simulações de CFD se tornaram uma ferramenta útil que pode ser usada para visualizar padrões de fluxo e investigar impactos da operação e parâmetros geométricos no desempenho de sistemas de fluxo. Estratégias para retardar a taxa de desgaste do refratário são relacionadas à condição do homem morto no cadinho, níveis refrigeração dos refratários, distribuição de fluxo, etc.

Vários mecanismos de desgaste do cadinho foram propostos incluindo ataque de álcalis e de zinco, oxidação e dissolução dos refratários de carbono, carga e tensão térmica, pressão ferro estática, erosão por líquidos quentes e tensão mecânica. Distribuições do fluxo do ferro líquido e as temperaturas dos refratários têm uma

influência significativa nestes mecanismos. Para se determinar mecanismos chaves e conseqüentemente desenvolver estratégias de controle desgaste do refratário, é essencial melhorar a compreensão do fluxo de líquidos e a transferência de calor no cadinho. Para este propósito citado por Haung et al (2005), modelos são ferramentas exploratórias poderosas, particularmente em situações onde experimentos industriais são não práticos ou caros e modelos físicos são complicados.

Vários modelos interessantes já foram reportados. Modelos antigos eram desvantajosos por causa de recursos computacionais. Yoshikawa e Szekely (1981) investigaram o fluxo induzido por convecção natural e seu efeito na dissolução do carbono no refratário. Um modelo tridimensional desenvolvido por Shibata et al (1990) foi usado para simular o fluxo no cadinho para quatro posições do homem morto. O modelo era completamente avaliado com várias comparações qualitativas entre as temperaturas medidas e calculadas. Zulli et al (1991) desenvolveram modelos para investigação do fluxo de ferro e escória no cadinho.

Em investigações presentes, os modelos descritos predizem o fluxo de líquidos e a transferência de calor no cadinho do alto-forno, especialmente o fluxo e a distribuição de temperatura do ferro-gusa, e as distribuições de temperatura no refratário. Estes modelos podem ser utilizados para se avaliar o desgaste do refratário do cadinho considerando fatores internos do mesmo. Por ser um modelo complexo e necessitar de grande recurso computacional, ele deve ser utilizado somente para estudos de tendência operacionais e desgaste dos refratários em períodos de médio prazo. Ele não é recomendado para acompanhamento do desgaste em curto prazo. Atualmente pode-se utilizar um software numérico CFD que resolve as equações governadas das propriedades de fluxo e com condições de contorno especificadas e condições iniciais. O fluxo é assumido como fluxo laminar 3-D. O nível do líquido é considerado constante. A Figura 3.24 apresenta o resultado de uma simulação do fluxo transiente para uma alto-forno com 2 furos de gusa, esquerdo e direito. O desenho superior simula a condição do fluxo correndo pelo furo da direita, o segundo desenho mostra o perfil de temperatura com a mudança do fluxo para o furo da esquerda e o terceiro desenho mostra o perfil de temperatura após 60 minutos de corrida. A Figura 3.25 mostra a comparação dos dados de perfil de temperatura calculados pelo modelo com os dados medidos pelos termopares.

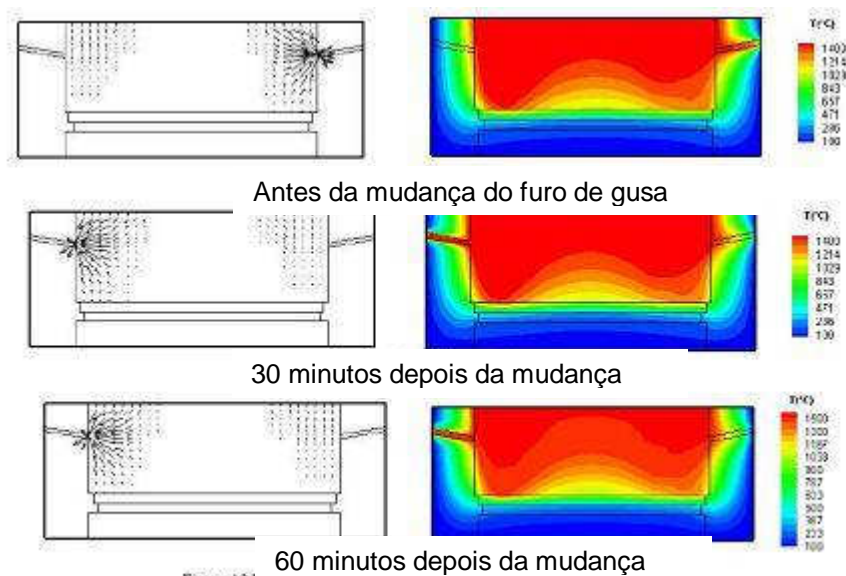


Figura 3.24: Resultado computacional do CFD, segundo Haung et al (2005).

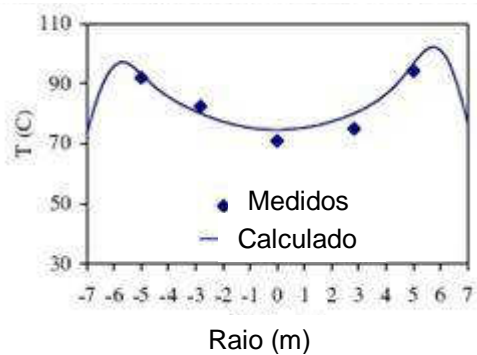


Figura 3.25: Gráfico comparativo do resultado de temperatura do modelo com o medido no termopar, segundo Haung et al (2005).

3.3- Modelos de desgaste

Para avaliação do desgaste do cadinho, utiliza-se normalmente os termopares instalados na parede e fundo do mesmo. Como apresentado no item 3.2.4, pode-se obter diretamente de medidores de fluxo de calor, embora seja possível fazer uma avaliação apenas em termos de temperaturas indicadas pelos termopares, não se pode fazer comparações entre eles quando estão em posições diferentes no forno, com penetrações diferentes nos blocos de carbono.

Se tivermos dados suficientes precisos da localização dos termopares e as características dos materiais do revestimento do forno, pode-se calcular através de modelos matemáticos, a transmissão de calor, a espessura do refratário relativa a cada posição, possibilitando traçar o perfil de desgaste do cadinho, sendo que os modelos podem ser de simples até os complexos.

A precisão da avaliação do desgaste do cadinho de alto-fornos, através de modelos matemáticos, tem melhorado significativamente com os trabalhos de sondagem e análise “post mortem” do revestimento. Os resultados desses trabalhos têm contribuído para verificação da situação física estrutural e das propriedades termo-físicas dos materiais utilizados no cadinho. Por sua vez, poucos estudos existem sobre a formação e propriedades da camada agregada na interface revestimento/gusa líquido.

Em todos os modelos matemáticos de estimativa do desgaste do cadinho, obtém-se como solução o perfil de distribuição de temperatura do revestimento. Associa-se a posição do desgaste do cadinho à temperatura de solidificação do gusa (aproximadamente 1150°C), uma vez que abaixo dessa temperatura não existe material fundido. Contudo, considerando-se as freqüentes flutuações térmicas do processo, pode se afirmar que a posição dessa isoterma 1150°C oscila. A isoterma não somente avança para o interior do revestimento, definindo assim a nova posição do desgaste, como também pode se localizar no interior da camada agregada no revestimento. Nesse último caso, abaixo da isoterma de 1150°C existirá apenas sólido, sendo uma parte composta por camada agregada e outra pelo revestimento intacto.

O valor das propriedades dos materiais do revestimento deve ser o mais realista possível, para se obter uma estimativa precisa do desgaste através de modelos matemáticos. Desse modo, torna-se indispensável o conhecimento da condutividade térmica dos refratários em função da temperatura, uma vez que um mesmo material pode estar submetido a temperaturas que variam de 100 a 1500°C. Outro aspecto a ser considerado é que as características iniciais do revestimento do cadinho nem sempre são preservadas ao longo da campanha. A quantificação desses fenômenos é bastante complexa, sendo necessárias retiradas de amostras durante o andamento da campanha, o que se constitui em operação arriscada, para caracterização em laboratório. Alguma indicação da extensão dessas alterações pode ser obtida em análise “post mortem” do revestimento.

O método para se avaliar o desgaste do cadinho pela isoterma de 1150°C não é conseguido diretamente, com isso, pode apresentar erros. Causas possíveis de discrepância entre o valor estimado e valor real de espessura citada por Zulli et Al (2003) pode ser:

1- A temperatura da face quente excede 1150°C devido à baixa taxa de dissolução.

2- Erro no cálculo devido à alteração das propriedades térmicas resultantes pela impregnação do ferro, formação da camada frágil (embrittlement), e trincas ao longo do bloco.

3- Erro no cálculo devido a posicionamento errado dos termopares.

3.3.1- Modelo Unidimensional

Para modelamento matemático das condições de transferência de calor no cadinho, deve-se inicialmente definir uma região de tal forma a minimizar as incertezas com relação aos fenômenos de grande complexidade existentes, caso se modelasse todo o cadinho. Desta forma, deve-se procurar uma região do bloco de carbono que esteja fisicamente intacta e contornar as incertezas relacionadas aos fenômenos de transferência de calor na massa socada e refrigeração na carcaça. Essa região é mostrada na Figura 3.26.

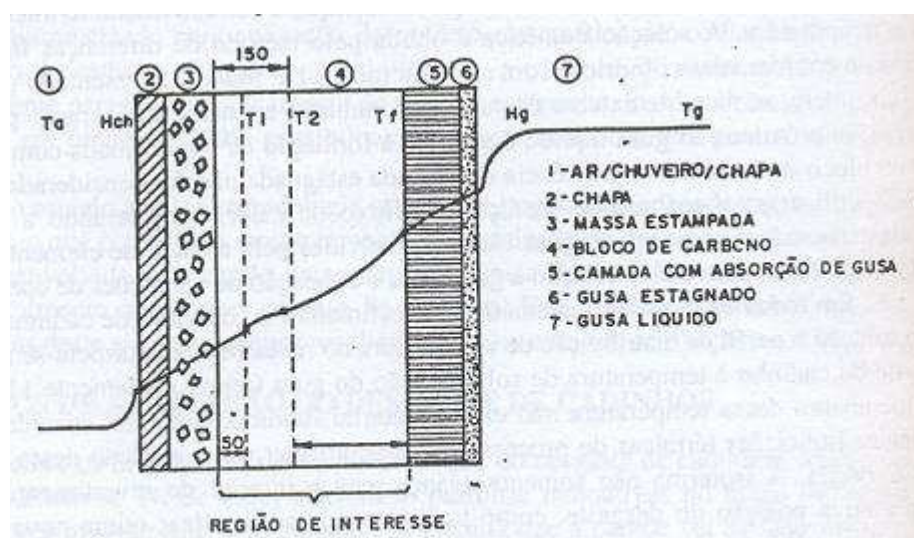


Figura 3.26: Esquemático do perfil da parede do cadinho, segundo Carneiro et al (1999).

Pelo fato de se propor trabalhar apenas com o bloco de carbono, na região denominada de real interesse, não se está desprezando a importância dos fenômenos de refrigeração na carcaça e de transferência de calor através da massa socada e da camada estagnada. O aspecto relevante nessa consideração é o fato de que todos os fenômenos ligados à transferência de calor no cadinho são refletidos nas temperaturas lidas dos termopares, independentemente do domínio adotado da região. Nesse contexto, pode-se calcular o fluxo de calor através dos valores de temperaturas obtidos pelos termopares, sendo essa informação plenamente coerente com o fluxo de calor associado a toda região.

O modelo matemático é baseado na transferência de calor unidimensional através do revestimento, considerando que a direção de fluxo de calor é eminentemente radial na parede e axial no fundo. Utiliza-se a lei de Fourier para condução de calor no bloco de carbono, em regime permanente, de acordo com a equação (3.1):

$$Q = \frac{\Delta T * k}{\Delta l} \quad (3.1)$$

Onde Q é o fluxo de calor calculado, ΔT é diferença da temperatura entre dois pontos; κ é a condutividade do bloco de carbono; Δl é a distância entre dois termopares em linha .

3.3.2- Método de elementos finitos (FEM)

O método de elementos finitos é a técnica mais usada para se estimar o desgaste do cadinho. Ela consiste em dividir o domínio de cálculo em muitas sub-regiões chamadas de elementos finitos. Um conjunto de equações para valores desconhecidos nos pontos (nós), que são considerados para representar estas sub-regiões é resolvido. É necessário considerar o domínio inteiro porque a integração é realizada sobre toda a região. Segundo Capasso (1998) a solução pode ser atacada diretamente ou inversamente. O problema do FEM é a necessidade de bons recursos computacionais para resolver o modelo.

O problema direto tem que ser modelado e implementado, isto é, partindo-se de uma forma dada que define um domínio que seja no revestimento, calcula-se a distribuição da temperatura para dentro deste domínio pela modelagem do fluxo de calor através da parede do alto-forno pela equação do calor. Nos problemas inversos, dado a temperatura medida por termopares, o fluxo de calor se ajusta para se encontrar o perfil de desgaste. Pode-se dizer que problema inverso consiste numa otimização. Um exemplo de domínio segundo Torrkulla et al (2000) para solução em elementos finitos esta mostrado na Figura 3.27

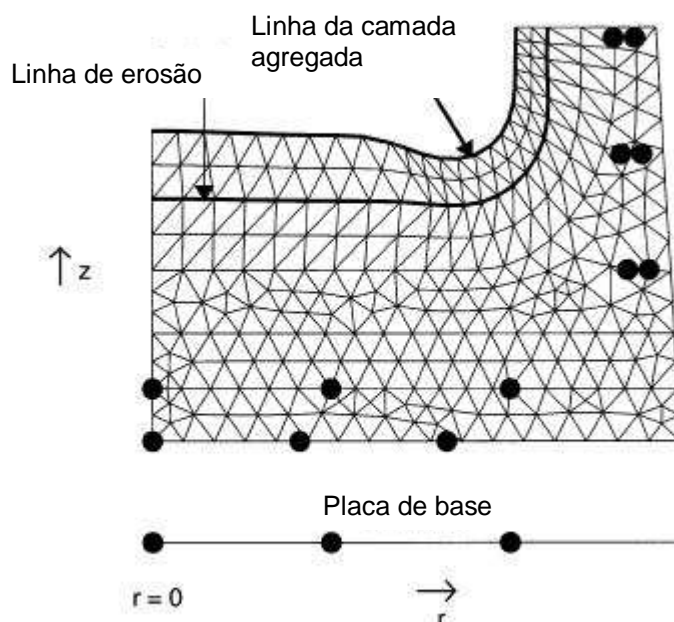


Figura 3.27: Um exemplo de domínio segundo Torrkulla et al (2000) para solução em elementos finitos.

No modelo proposto por Ferreira (1992), ele considerou coordenadas cilíndricas assimétricas. A solução numérica empregada foi por resíduos ponderados e é obtida por processo iterativo devido a não linearidade do sistema de equações. A Figura 3.28 mostra a tela do resultado de um setor do modelo proposto.

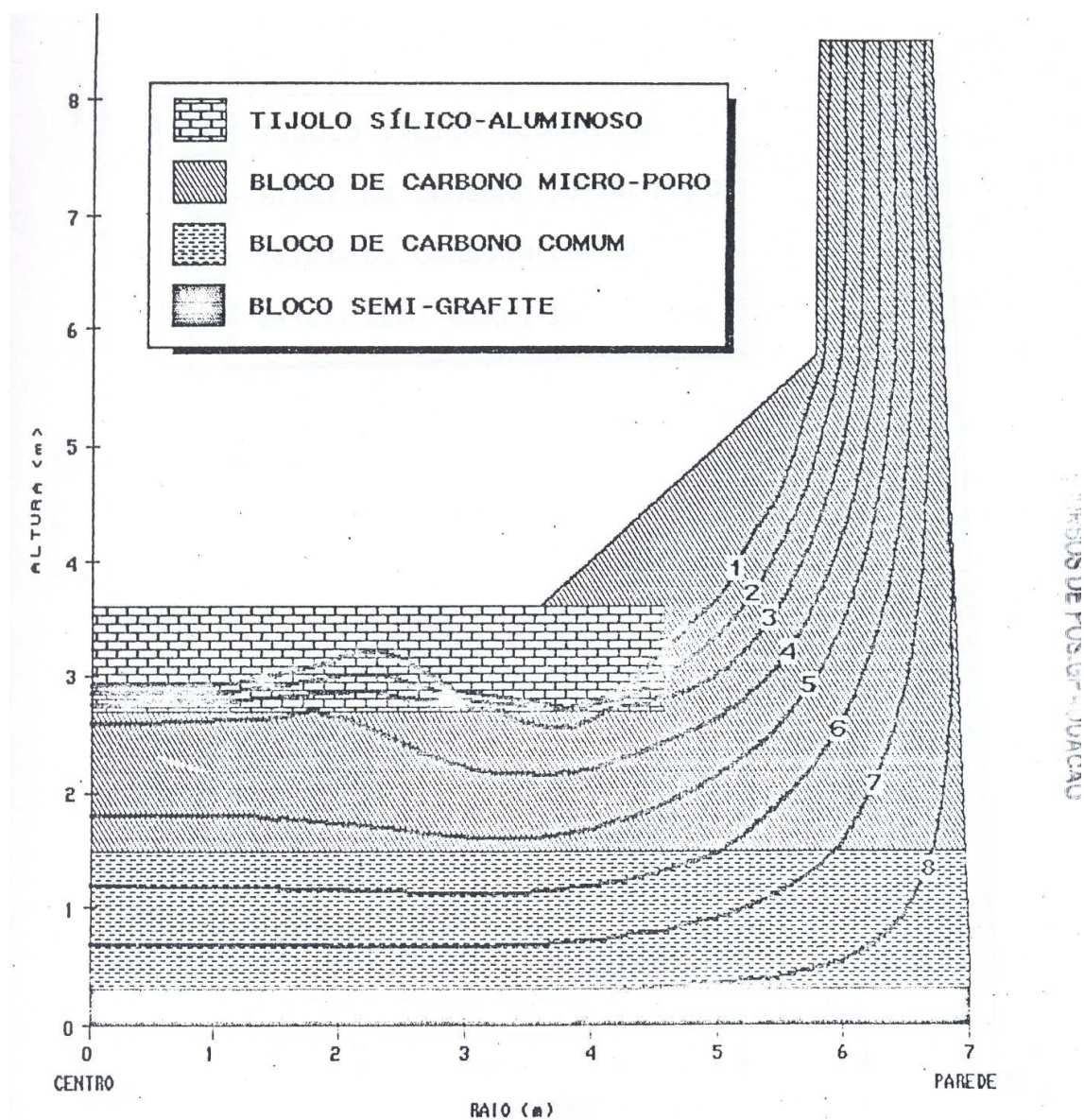


Figura 3.28: Tela do resultado de um setor do modelo proposto por Ferreira (1992).

Outra abordagem para modelagem do cadinho foi proposta por Radmoser (2005). Ele propôs uma aplicação em dois estágios. Modelo adotado foi bidimensional simétrico, sendo que a primeira parte foi um problema direto de transferência de calor utilizando o método de elementos finitos e a otimização baseado na técnica de problemas inversos. O cadinho foi dividido em seções, onde o comprimento de cada direção é otimizado para se obter o resultado. A Figura 3.29 apresenta a tela do resultado do modelo de desgaste e a equação 3.2 apresenta a função de minimização adotada i:

$$\tilde{\Phi}(\Gamma_2) = \sum_{j=1}^m \left(u(x_j, \Gamma_2) - \tilde{u}_j \right)^2 + \alpha \sum_{j=1}^{n+1} \left(\Psi_j(\Gamma_2) - \Psi_{j-1}(\Gamma_2) \right)^2 \quad (3.2)$$

Onde: $\tilde{\Phi}(\Gamma_2)$ é a função de minimização da linha de desgaste;
 u_j é a temperatura registrada pelos termopares;
 $u(x_j, \Gamma_2)$ é a temperatura calculada pelo modelo dos elementos finitos;
 $\Psi_j(\Gamma_2)$ é o ângulo entre a linha de desgaste e as linhas das seções ;
 \mathbf{J} é o vetor direção da linha da seção;

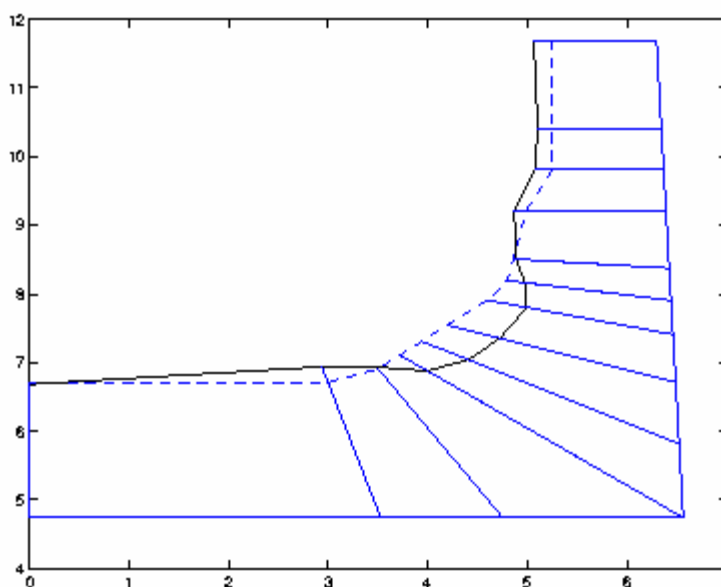


Figura 3.29: Tela do resultado de um setor do modelo proposto por Radmoser <http://www.it.lut.fi/mat/EcmiNL/ecmi23/node5.html> (2005).

Os modelos de desgaste do cadinho também podem ser comprados comercialmente. Eles apresentam bons resultados, mas o investimento é muito alto para aquisição. Geralmente as empresas contratam a modelagem anualmente para verificar a evolução de desgaste. A Figura 3.30 mostra a tela programa de desgaste do cadinho desenvolvido pela VAI.

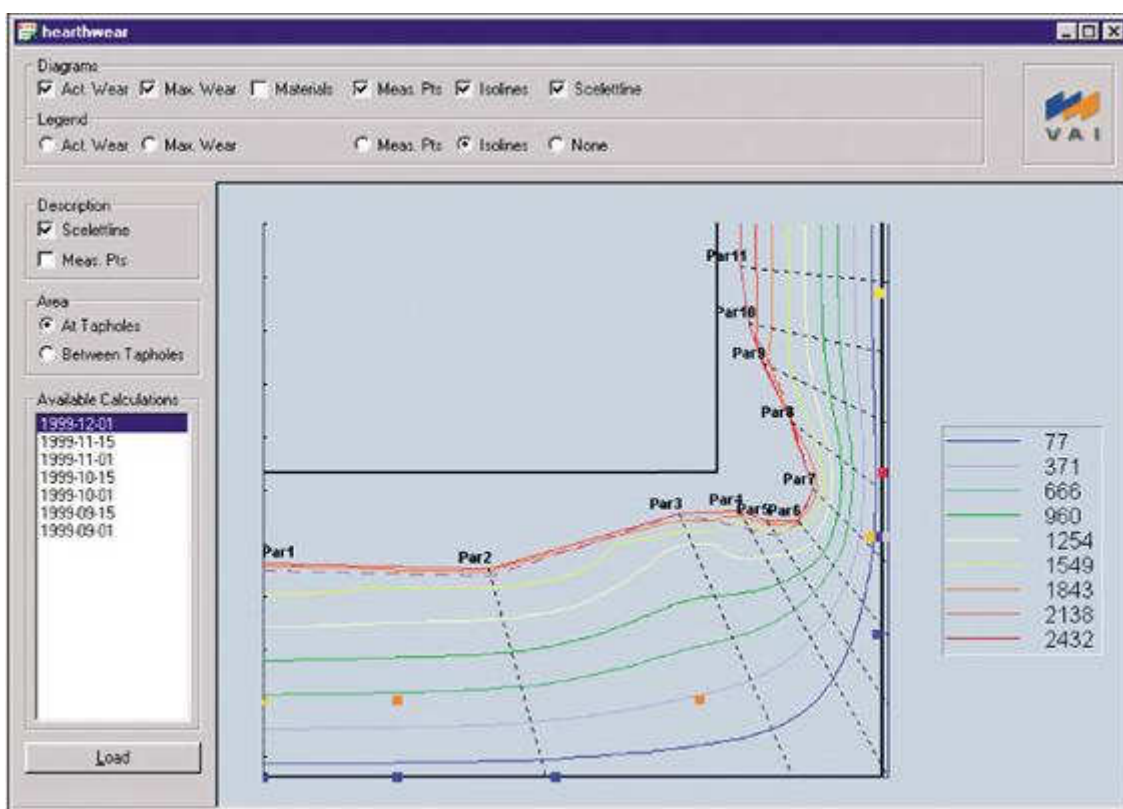


Figura 3.30: Tela do programa de desgaste do cadinho da VAI, [http://www.vai.at/view.php3?f_id=9350&LNG=EM\(2005\)](http://www.vai.at/view.php3?f_id=9350&LNG=EM(2005)).

3.3.3- Método das Bordas (BEM)

Existem algumas alternativas para se desenvolver um modelo matemático para a predição da erosão cadinho do alto-forno: a primeira alternativa é pelo método de elemento finito (FEM). A segunda alternativa é pelo método do elemento das bordas (BEM), assim chamado devido à comparação com o domínio do FEM como mostrado na Figura 3.31. Um conjunto de equações para valores desconhecidos nos nós é resolvido da mesma maneira que em FEM. Segundo Wu et al (2003), BEM tem a virtude de reduzir o domínio de cálculo para uma dimensão e assim, requiere menos recursos computacionais.

O método BEM é usado para se estimar condições térmicas rapidamente e precisamente de um cadinho, principalmente linhas do desgaste dos refratários e a camada agregada, usando análise térmica e de regressão experimental para otimização. No BEM, o domínio do cálculo pode ser reduzido para uma dimensão, e somente o elemento de borda é objeto de análise. Conseqüentemente, torna-se muito mais fácil tratar problemas bordas livres que somente à posição da borda vem em questão, tal como a previsão do desgaste do cadinho. Entretanto, na aplicação do BEM, alguma consideração na computação do coeficiente de matrizes de equações discretização é requerida para análises mais eficientes.

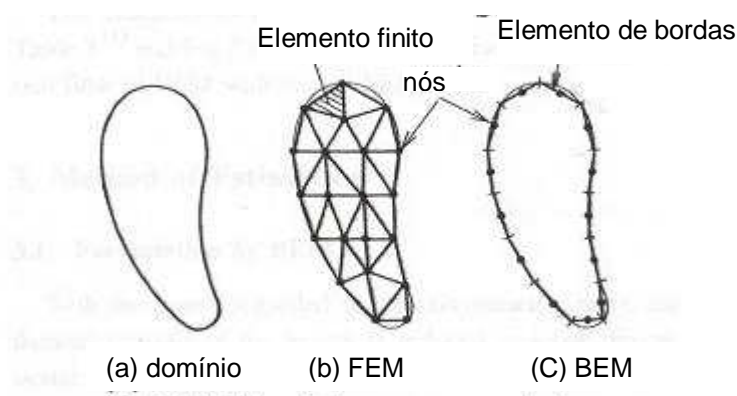


Figura 3.31: Comparação da discretização do BEM e FEM, Yoshikawa et al (1990).

Modelo utilizando também pode ser adquirido comercialmente através da antiga KSC, hoje JFE. A Figura 3.32 apresenta a tela do resultado do modelo BEM em aplicação industrial.

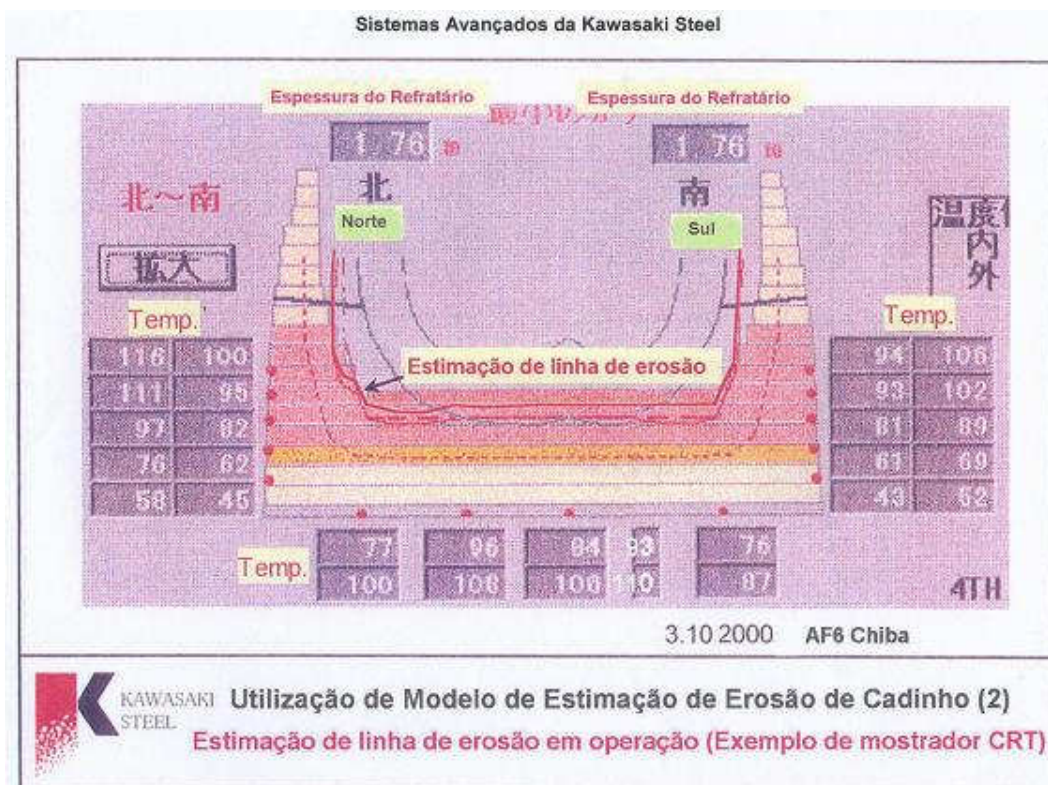


Figura 3.32: Modelo de desgaste do Cadinho da KSC, relatório de viagem (2002).

3.4- Problemas inversos

Entendemos como problemas inversos aqueles que aparecem na tentativa de se determinar causas através dos efeitos observados. Matematicamente problemas inversos pertencem à classe de problemas mal-postos. Segundo Alves 2005, Hadamard definiu que um problema bem-posto, como sendo aquele que cumpre as três condições abaixo:

- (i) Existe solução;
- (ii) A solução é única;
- (iii) A solução tem uma dependência contínua (suave) com os dados de entrada.

Assim, o problema é dito mal-posto se alguma das condições acima não é satisfeita. Problemas discretos e finitos são chamados mal condicionados, se a condição (iii) não se cumpre. Em geral, nenhuma das condições é satisfeita num problema inverso. Em geral, as observações são imprecisas (dados contaminados com ruídos ou erros experimentais) e incompletas.

Várias técnicas foram desenvolvidas nos últimos anos para se contornar este problema de mal-postura dos problemas inversos no intuito de se obter uma solução estável para tais problemas. Abaixo, segue uma lista de métodos de solução apresentado por Velho (2005):

- Inversão direta;
- Decomposição em valores singulares;
- Mínimos quadrados e variantes (mínimos quadrados ponderados);
- Métodos de regularização;
- Métodos variacionais;
- Outros (molificação, métodos bayesianos, filtros digitais, redes neurais, etc).

3.4.1 Métodos de Regularização

O método da regularização consiste na determinação da solução aproximada mais suave compatível com os dados de observação, para certo nível de ruído. A busca de uma solução aproximada significativa e estável deste sistema, geralmente requer que este sistema seja substituído por outro muito próximo e que seja muito menos sensível as perturbações, assim transformando o problema mal-posto num problema bem-posto. A regularização de Tikhonov, citado por Velho(2005), é um dos mais populares métodos de regularização para problemas mal-posto. A Figura 3.33 apresenta a idéia básica do método de regularização.

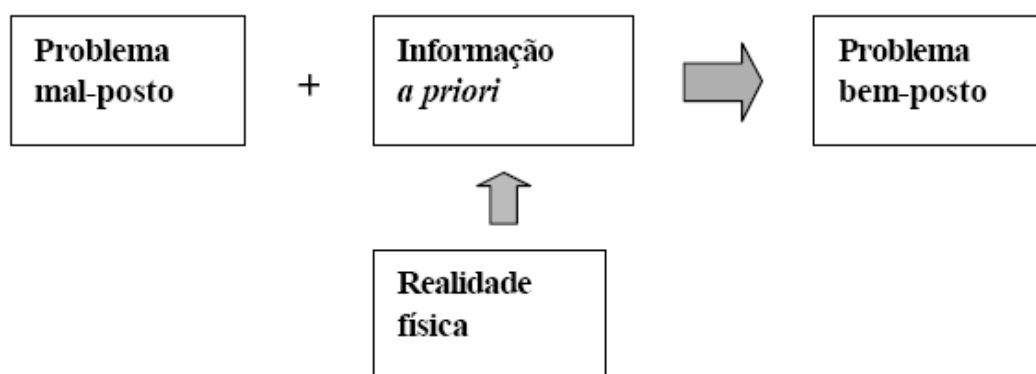


Figura 3.33 Idéia básica do método da regularização apresentado por velho (2005)

A implementação matemática é formulada como um problema de otimização:

$$\min \left\{ \|A(u) - f^\delta\|_2^2 + \alpha \|\Omega[u]\| \right\} \quad (3.3)$$

onde $\|A(u) - f^\delta\|_2$ representa o modelo direto;
 $\Omega[u]$ é o operador de regularização;
 α é o parâmetro de regularização.

Em aplicações práticas não conhecemos precisamente os dados, mas somente uma aproximação como:

$$|\mathbf{T}_{\text{termopar}} - \mathbf{T}_{\text{real}}| \leq \delta \quad (3.4)$$

Onde $\delta > 0$ é chamado o nível de ruído, que pode ser interpretado como erros de modelagem, imprecisões nos aparelhos de medida, incertezas do modelo, etc.

O parâmetro α representa um compromisso entre exatidão e estabilidade, neste sentido é indispensável para qualquer método de regularização um bom conhecimento da qualidade dos dados.

Além do problema da instabilidade, a convergência deste método para resolver o problema mal posto pode ser muito lenta e a existência de mínimos locais. Neste sentido os métodos iterativos podem ser uma alternativa mais interessante.

Um primeiro candidato para resolver de maneira iterativa segundo Alves (2005) é o método de Newton

$$V^{iter+1} = V^{iter} + [DT]^{-1} \cdot [\Delta T_{P^{iter}}] \quad (3.5)$$

Nesse sentido ele é inapropriado pois em cada passo da iteração estaríamos resolvendo um problema (linear) mal posto e então alguma técnica de regularização deveria ser usada. O método de Levenberg-Marquardt é uma aplicação da regularização de Tikhonov na linearização da equação que descreve um problema inverso apresenta abaixo:

$$V^{iter+1} = V^{iter} + [DT^T \cdot DT + \alpha \cdot I]^{-1} \cdot [DT^T \cdot \Delta T_{P^{iter}}] \quad (3.6)$$

Para método de Gauss-Newton adiciona-se um termo adicional de estabilização ligando a uma aproximação da solução final.

$$V^{iter+1} = V^{iter} + [DT^T \cdot DT + \alpha \cdot I]^{-1} \cdot [DT^T \cdot \Delta T_{P^{iter}} + \alpha \cdot I(V^\Delta - V^{iter})] \quad (3.7)$$

Onde, P^{iter} é comprimento do vetor para o número da interação determinado; DT é a matriz de sensibilidade, I é matriz de regularização; $\Delta T_{(P^{iter})}$ é a diferença entre a temperatura medida pelos termopares e calculada pela modelo direto; P^Δ é uma solução a priori do comprimento do vetor aceitável para o problema; α é o parâmetro de regularização.

3.5- Análise “Pós Mortem”

3.5.1- Investigação dos blocos de carbono

Devido ao progresso das técnicas de refrigeração e reparo durante operação, a vida do alto-forno nos dias atuais é determinada principalmente pelo cadinho. Para se investigar a erosão dos refratários do cadinho, foram realizadas análises do refratário, da camada agregada, do gusa e da escória remanescentes em muitos encerramentos de campanhas. O perfil de erosão é levantado e a condição de deterioração dos refratários é investigada. Segundo Shinotake et al (2003) quando certa região de refratário é desgastada, ferro-gusa líquido penetra pelos poros do refratário remanescente provocando a formação da camada frágil. O ferro-gusa fundido se aloja entre a camada sã do bloco e a camada frágil até que o fluxo de líquidos do cadinho remova a camada frágil. O processo de deterioração então se inicia com uma nova penetração do ferro-gusa. O mecanismo de erosão dos refratários do cadinho é esquematizado na Figura 3.34, onde o ferro-gusa penetra nos poros de refratário e os blocos carbono são dissolvidos, trincas finas são formadas atrás da região ferro-gusa penetradas e a camada frágil, resultando na desintegração do refratário. Para o perfil erosão da base do forno, o tipo de taça e o tipo em forma de cogumelo ou pata de elefante são os perfis de erosão mais típicos. Segundo Fujihara et al (1989) no passado, o desgaste dos refratários acontece primeiramente na porção mediana do fundo do cadinho e depois na interface fundo/parede cadinho. Em particular, a erosão de tipo pata de elefante se tornou o problema mais sério. Segundo Tomita et al (1987) o conhecimento obtido em estudos do fluxo dos líquidos no cadinho, esse tipo de erosão é promovida pela concentração dos líquidos em regiões formadas por espaços deixados pelo coque e estão localizados ao fundo e canto do cadinho. Recentemente muitos alto-fornos são projetados de tal maneira que todo o fundo de forno seja livre, ou seja, o homem morto tem que estar flutuando, para isto a distância entre o fundo do cadinho e os furos de gusa é aumentada. Estes projetos consistem na diminuição da concentração dos fluxos de líquidos no canto do fundo do cadinho. Porém, em alto-fornos que apresentam um cadinho fundo, o fluxo de líquidos em toda base do cadinho aumenta, mas o fluxo da interface parede/fundo é diminuído, com isso, o nível de maior desgaste é transferido para região intermediária entre os furos de gusas e canto do fundo. A Figura 3.35 mostra um exemplo deste tipo erosão.

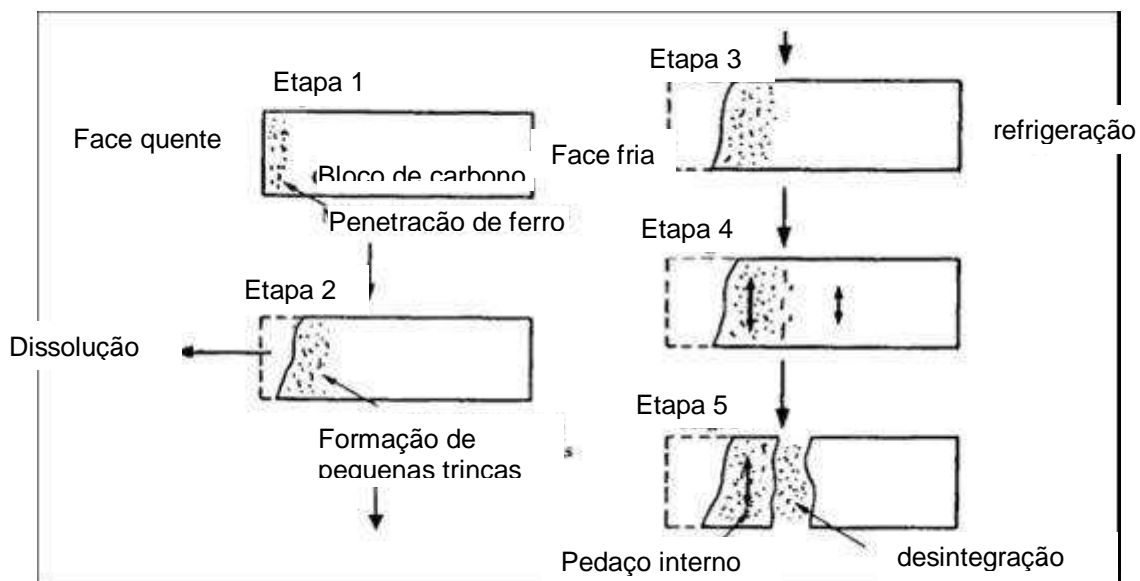


Figura 3.34: Esquemático do mecanismo de erosão dos refratários do cadinho segundo Shinotake et al (2003).

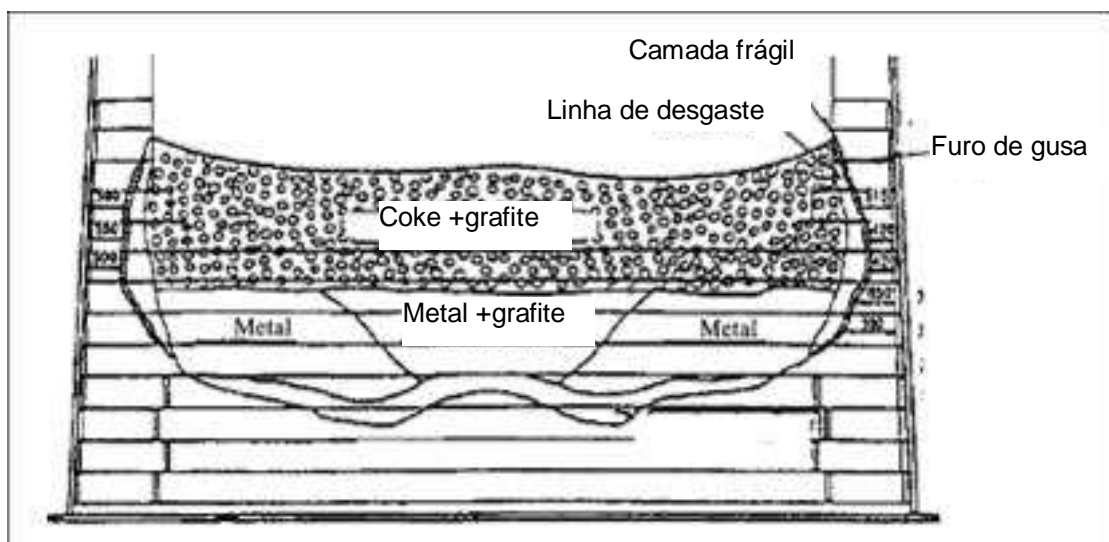


Figura 3.35: Exemplo de erosão encontrada segundo Shinotake et al (2003).

Além de investigar os fenômenos de desgaste dos tijolos refratários do cadinho, a sondagem também pode ser utilizada para verificar os erros dos modelos de desgaste do cadinho. Essa verificação foi realizada num forno de Tobata no Japão. Foram retiradas amostras em locais onde haviam sido feitas estimativas de desgaste. Para estimação da espessura residual foi utilizado um modelo de desgaste unidimensional. Os pontos de amostragem estavam na região de maior desgaste segundo o modelo e regiões onde a temperatura máxima histórica era recente. A Figura 3.36 mostra o resultado da inspeção no bloco de carbono. Podemos observar os fenômenos da impregnação de ferro pelos poros, trincas pela expansão térmica e a camada frágil. A Figura 3.37 mostra os resultados da condutividade dos materiais amostrados.

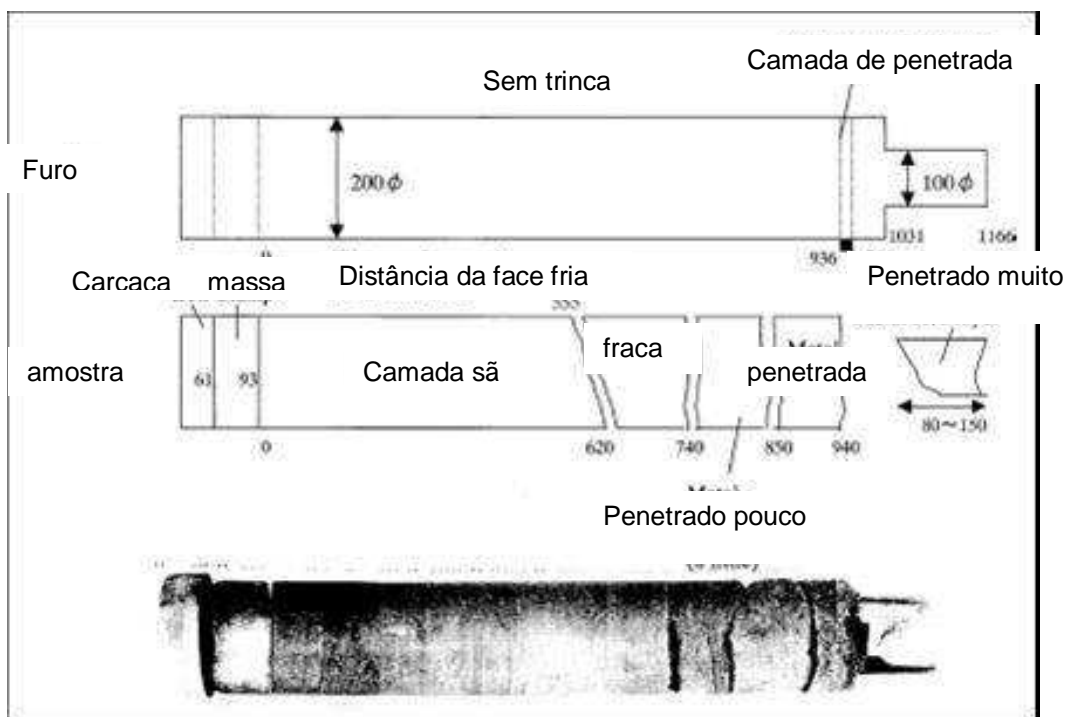


Figura 3.36: Resultado da sondagem do bloco após o fim da campanha, segundo Shinotake et al (2003).

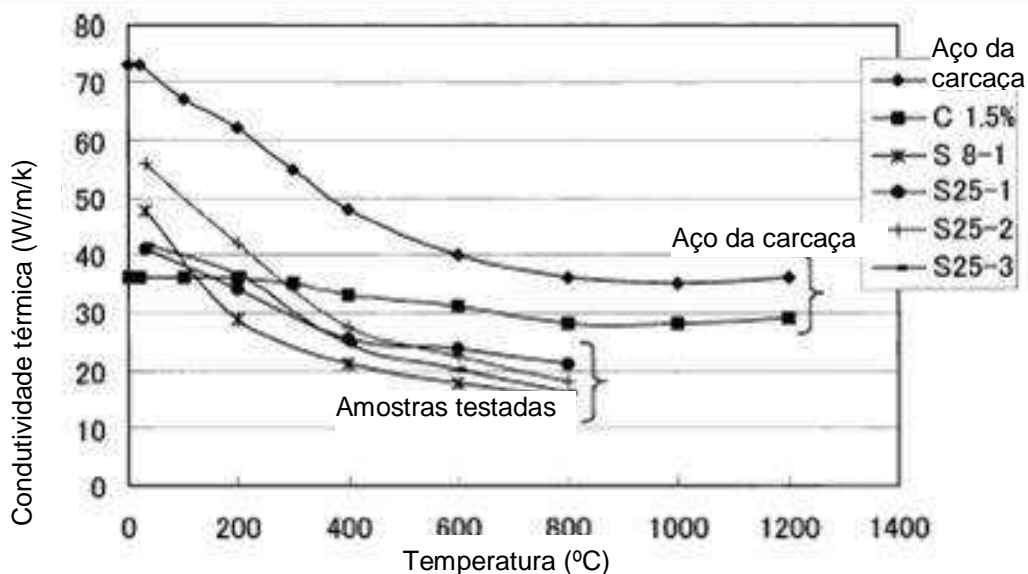


Figura 3.37: Condutividade térmica dos materiais amostrados após o fim da campanha, segundo Shinotake et al (2003).

3.4.2- Investigação da camada agregada

O desgaste do cadinho é estimado se baseando nas isotermas que são calculadas por modelos de transferência de calor, entretanto essa isoterma não depende só da variação das temperaturas e/ou seus gradientes, mas também das condutividades térmicas do revestimento do cadinho, da camada agregada, e outros materiais perto da face quente. Então, investigar estes materiais agregados e suas propriedades é muito importante para análise do desgaste do forno.

Para verificar as propriedades do material agregado do cadinho, Huang et al (2005) realizou uma investigação complexa. Este estudo inclui a camada agregada do fundo e da parede. As amostras do fundo foram obtidas por furação antes da demolição e do produto da demolição. As amostras das camadas agregada da parede foram retiradas em diferentes elevações. A localização da camada agregada que foi selecionada para análise química é mostrada na Figura 3.38.

A camada agregada retida da parede é constituída principalmente por carbono, zinco e álcalis. Não foi encontrada nenhuma quantidade de ferro. Na base a camada é constituída principalmente de ferro, escória e carbono. A escória é constituída basicamente por sulfeto de cálcio, alumina, magnésia e sílica. A condutividade térmica da parede encontrada foi entre de 5 e 6 W/m.k e da base estava entre 5 e 50 W/m.k. A grande variação da condutividade térmica da base é devido à grande variação da composição da camada agregada.

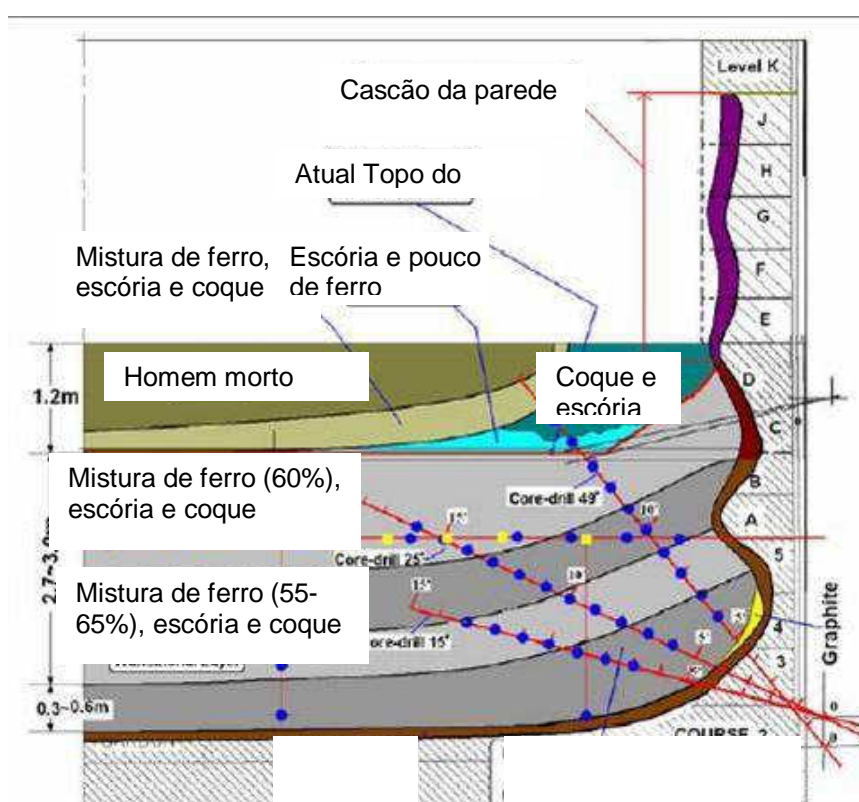


Figura 3.38: Localização da camada agregada que foi selecionada para análise química, segundo Huang et al (2005).

3.4.3- Investigação da camada socada entre carcaça e bloco de carbono.

Durante a campanha do alto-forno é necessário injetar a massa carbonosa corretamente para manter a conexão térmica entre os dispositivos de refrigeração e o bloco de carbono com objetivo de manter o refratário eficientemente refrigerado. A condutividade térmica da camada de massa carbonosa socada é a chave para se manter uma boa conexão térmica entre o bloco de carbono e o sistema de refrigeração. Devido à importância destes componentes, foram realizadas medidas de condutividade por Huang et al (2005). A conexão térmica entre dispositivo refratário e sistema de refrigeração pode ser deteriorada durante a operação do forno, i.e., a condutividade térmica da massa socada e carbonosa diminuirão pela tensão térmica e reações químicas.

Utilizando modelo matemático, Huang et al (2005) simulou a perda da eficiência da massa socada. A condutividade térmica da massa inicial de 23 W/m.K e do bloco de 18 W/m.k e com 100% conexão térmica que se refere à situação inicial de montagem do forno. Os resultados estão apresentados na Figura 3.39. Pode-se observar que o impacto da conexão térmica fica relevante somente acontece com perda de mais que 50% da condutividade térmica da massa, ou seja, quando a condutividade da massa fica menor do que o bloco. Como é muito difícil termos massas com condutividade térmica maior do que os atuais blocos de carbono, é muito importante ter um bom controle na aplicação da massa para evitar os vazios e durante a campanha, injetar a massa carbonosa com a maior condutividade térmica possível.

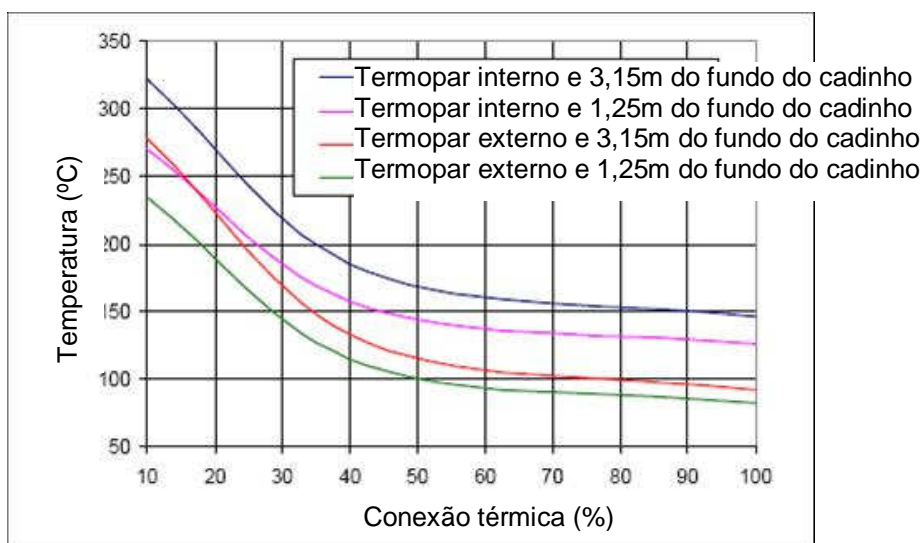


Figura 3.39: Impacto da conexão térmica na refrigeração da parede do cadinho, segundo Huang et al (2005).

4 – METODOLOGIA

Como descrito na revisão bibliográfica, existem vários modelos de desgastes adotados para se estimar o desgaste do cadinho. Todos são unânimes na utilização da isoterma de 1150°C, ou seja, a temperatura de “solidus”, como a linha de desgaste do revestimento refratário. A necessidade de avaliação de desgaste que demonstrasse melhor a realidade levou a utilização de modelos mais sofisticados e com análise multidimensional. Com estas características, o modelo mais utilizado para avaliação do desgaste foi o método de elementos finitos, apesar da maior complexidade e maior necessidade de recursos computacionais. Com a evolução da informática, a capacidade computacional minimizou este tipo de problema.

4.1- Definições do modelo de desgaste

O objetivo deste trabalho foi propor um modelo de avaliação de desgaste do cadinho utilizando à técnica dos elementos finitos que seja aplicável industrialmente. O modelo será dividido em problema direto e problema inverso, onde o modelo direto estima o perfil de temperatura para uma determinada linha de desgaste e o inverso fica responsável de minimizar a diferença entre a temperatura do termopar e a temperatura calculada pela modelo direto propondo uma nova linha de desgaste. A linha de desgaste será definida pela isoterma de 1150°C. Para o cálculo do perfil de temperatura foi utilizado um software de elementos finitos comercial e para solução do problema inverso foi utilizado um software de cálculo numérico.

4.2- Caracterizações do problema

O alto-forno da Gerdau Acominas é considerado de médio a grande porte. O volume interno é 3051m³ e o volume de trabalho é 2652m³. A altura de é 106m. A produção diária é de aproximadamente 8000 t. A primeira campanha do alto-forno ocorreu de 1986 a 1994, sendo que a reforma foi realizada em setembro de 1994, quando o forno foi totalmente reformado. Em 2001 foi realizada a 2^o reforma, mas desta vez o cadinho não foi reparado. A Figura 4.1 apresenta um desenho do alto-forno n^o. 1 da Gerdau Acominas sendo que o lado esquerdo representa o forno a partir de 2001 e o lado direito o forno de 1994 a 2001. A Figura 4.2 apresenta o projeto do cadinho com os respectivos materiais. Para o avaliação do desgaste, o cadinho foi dividido em 6 partes, cujas direções são o furo de gusa 1, 2, 3 e 4, 0° e 180°. Devido a disposição do arranjo de termopares da base não se alinhar simetricamente à parede,

a quantidade de termopares da base variou para cada direção. As Figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 apresentam a disposição dos termopares para cada direção.

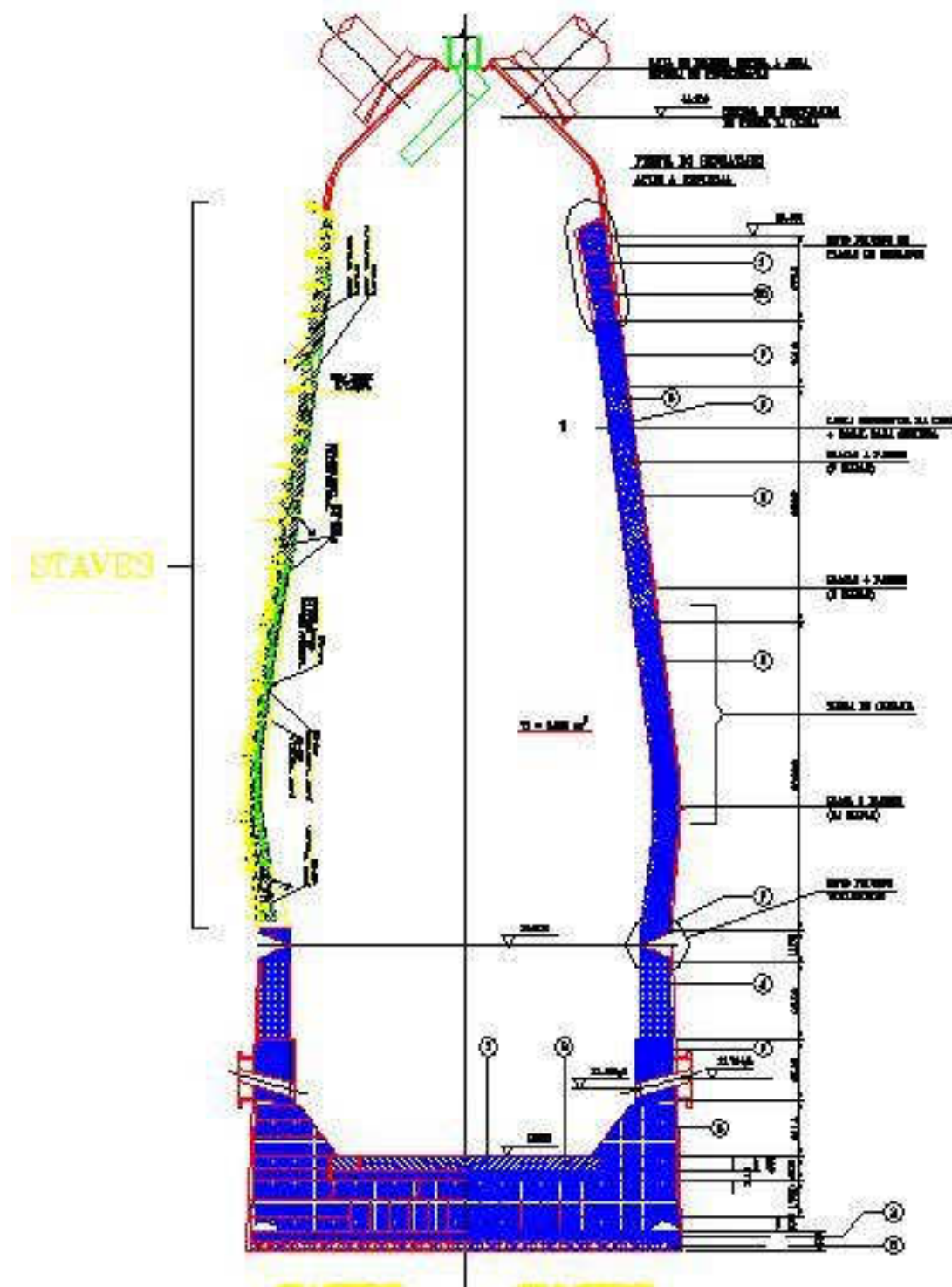
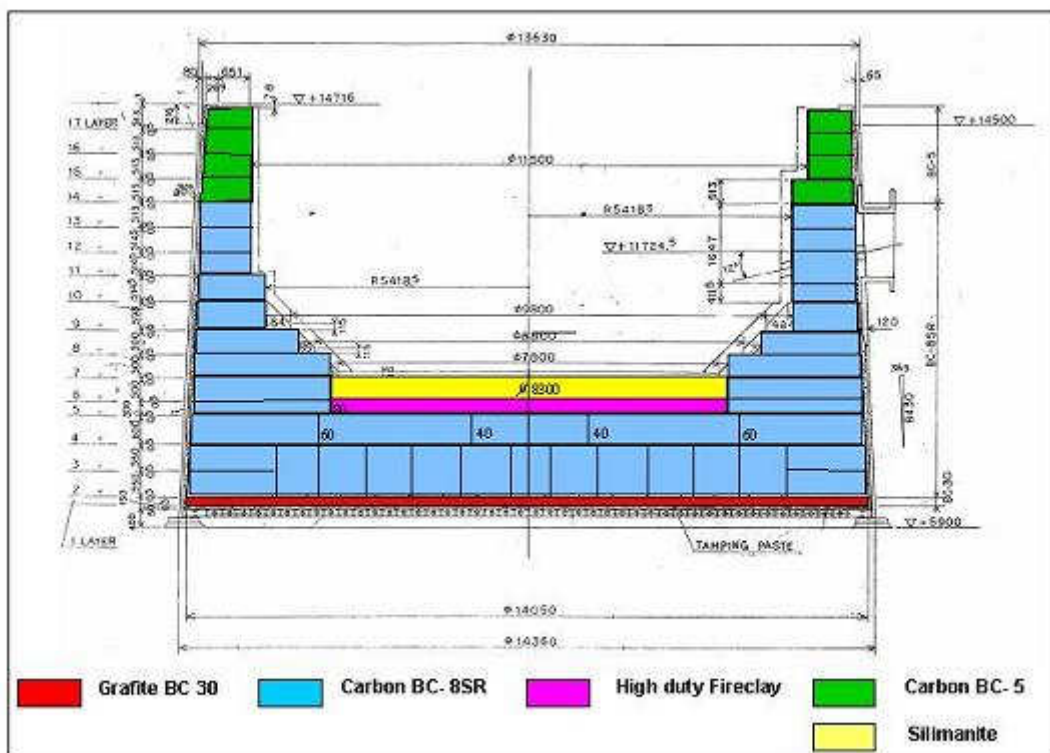


Figura 4.1: Desenho do alto-forno Nº. 1 da Gerdau Acominas.



A Figura 4.2: Desenho do cadinho do alto-forno Nº. 1 da Gerdau Acominas.

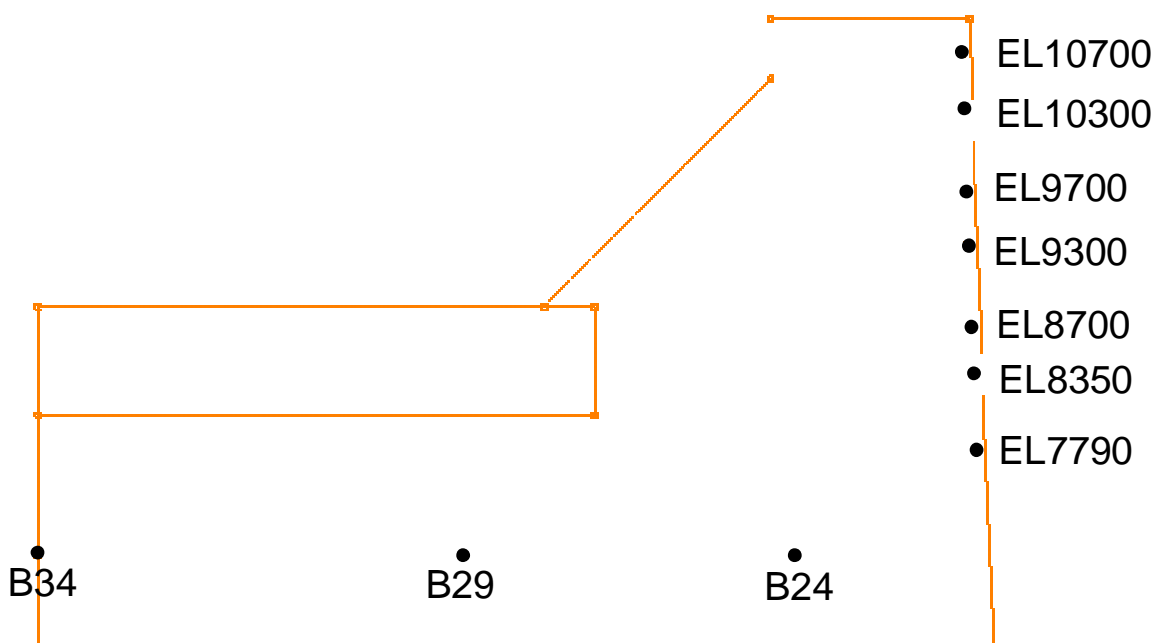


Figura 4.3: Arranjo de termopar na direção do furo 1.

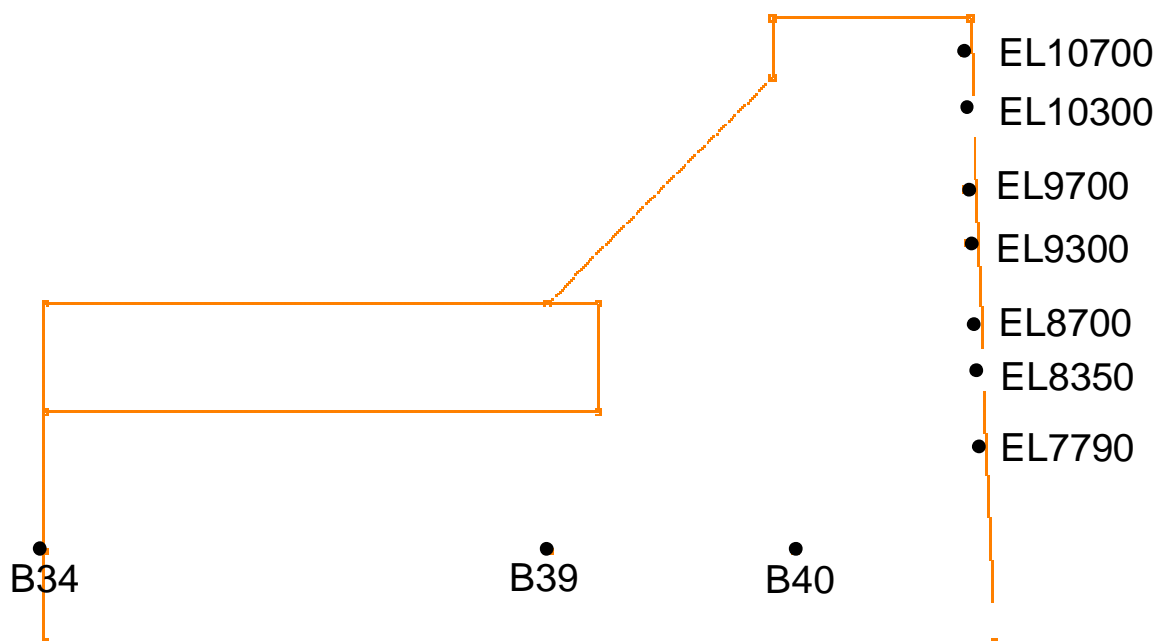


Figura 4.4: Arranjo de termopar na direção do furo 2.

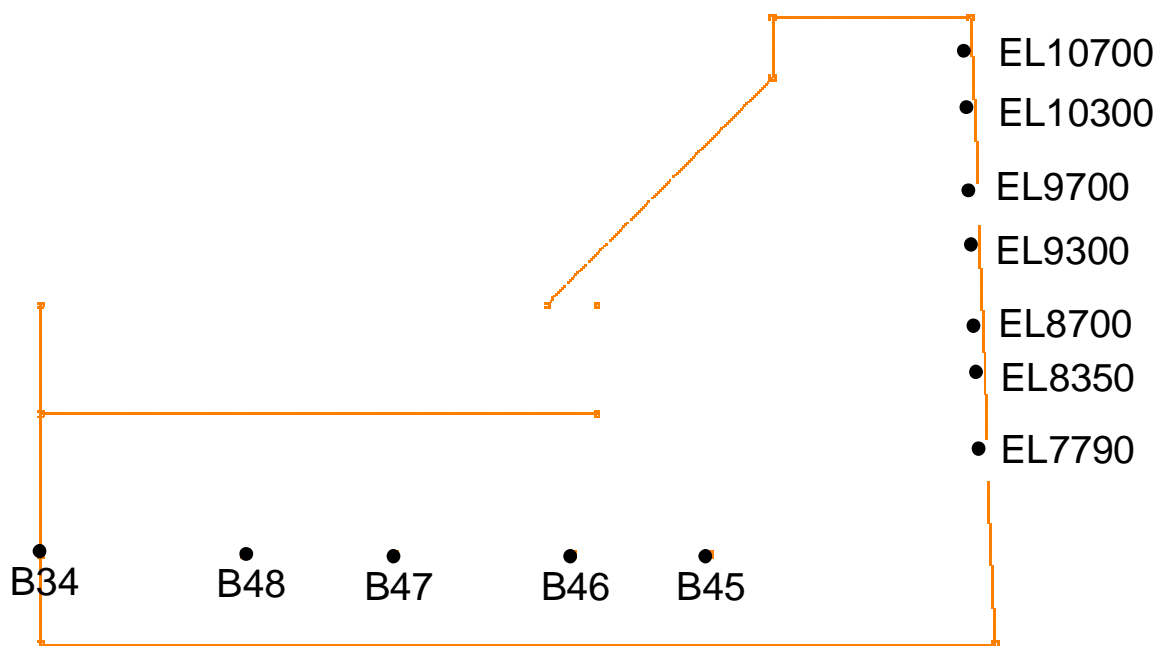


Figura 4.5: Arranjo de termopar na direção do furo 3.

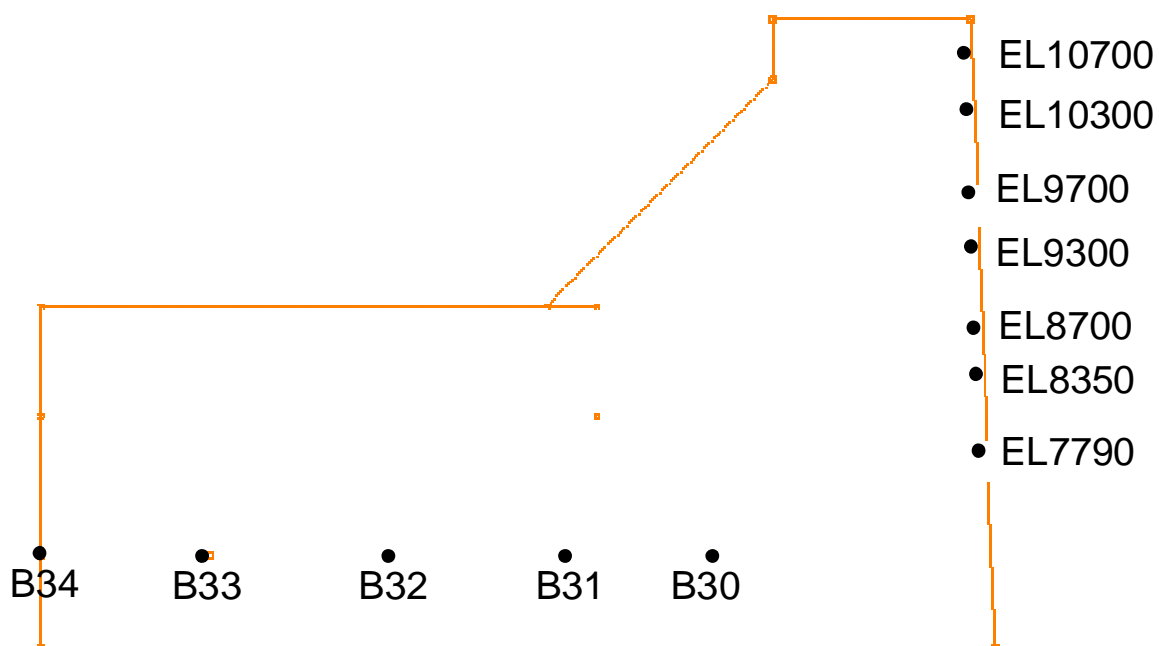


Figura 4.6: Arranjo de termopar na direção do furo 4.

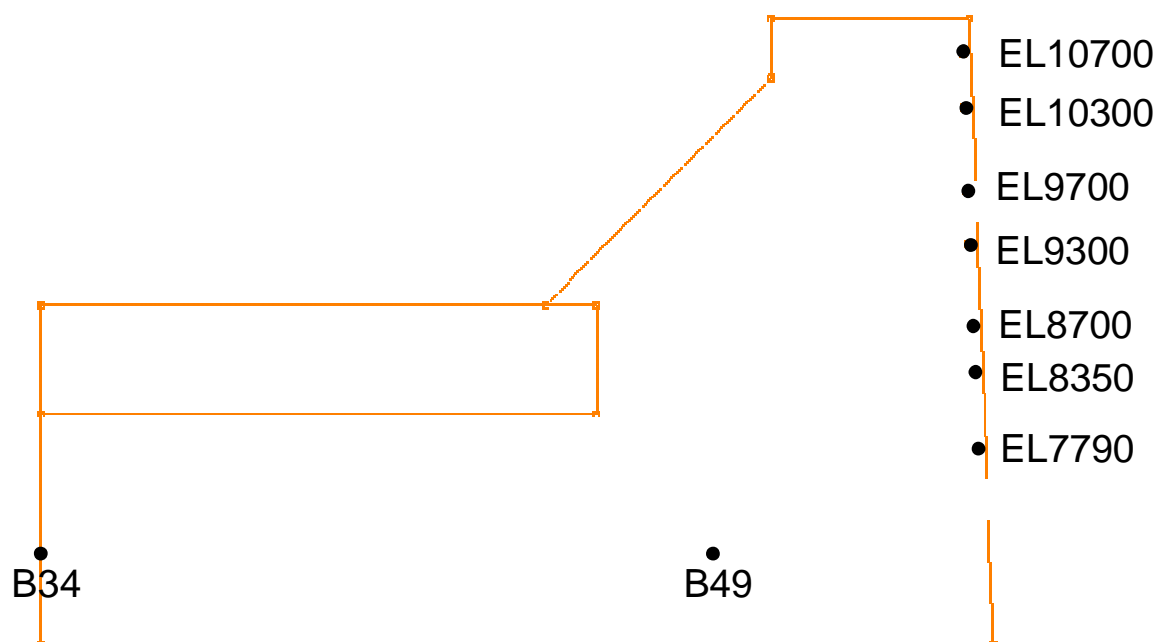


Figura 4.7: Arranjo de termopar na direção 0°.

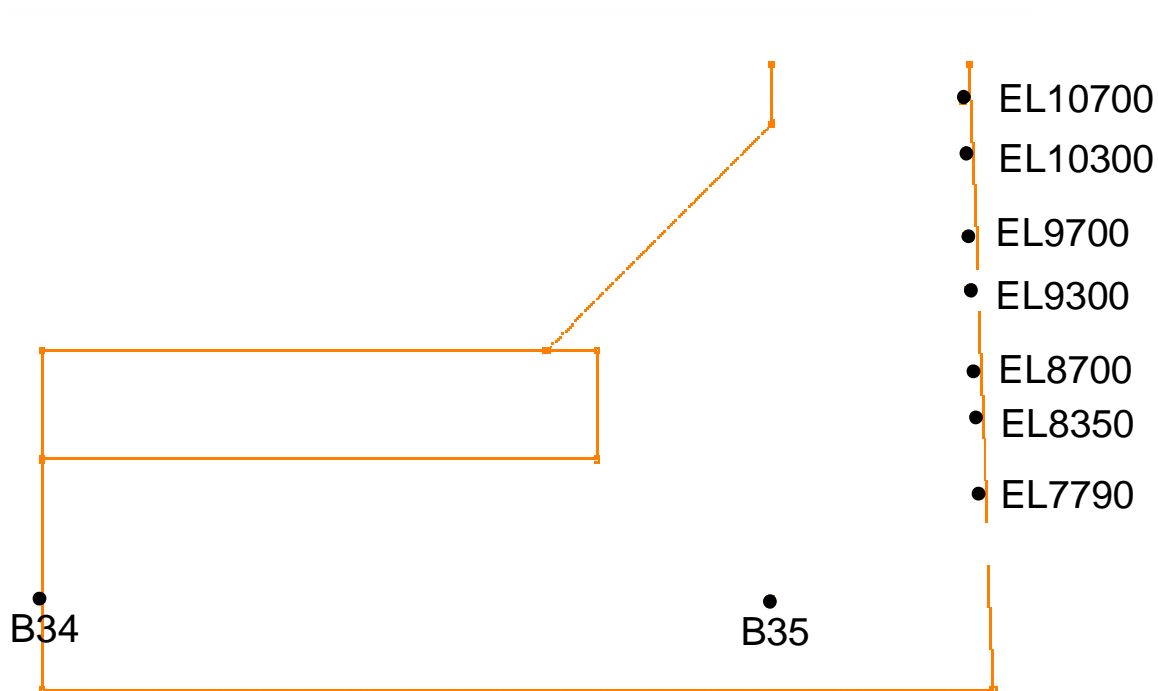


Figura 4.8: Arranjo de termopar na direção 180°.

4.2.1- Propriedades dos materiais utilizados.

Para minimizar os erros do modelo devido à variação das propriedades dos materiais utilizados nas temperaturas de trabalho do cadinho, será utilizada condutividade térmica em função da temperatura. A Figura 4.9 apresenta alguns valores de condutividade térmica em função da temperatura dos materiais utilizados, enviado pelos fabricantes a partir de teste realizado em amostra dos materiais fornecidos.

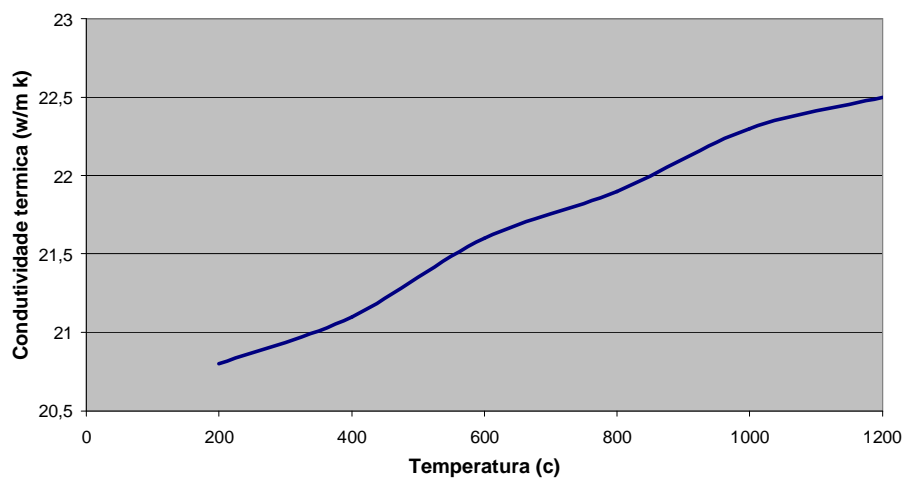
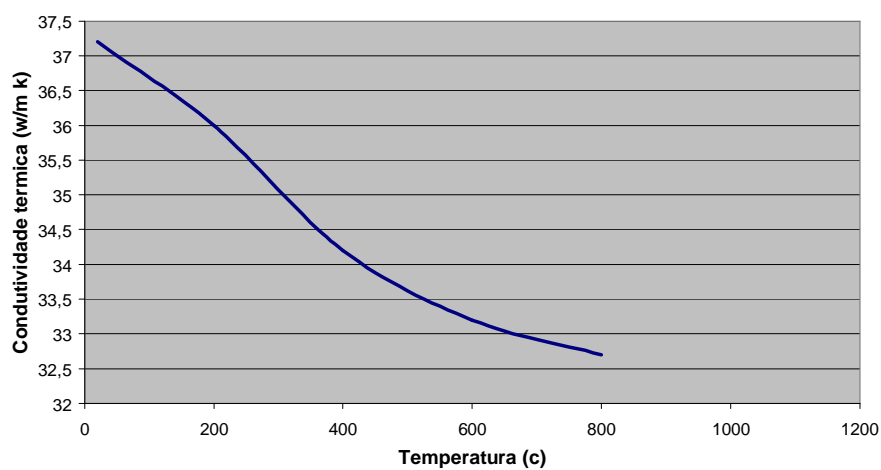
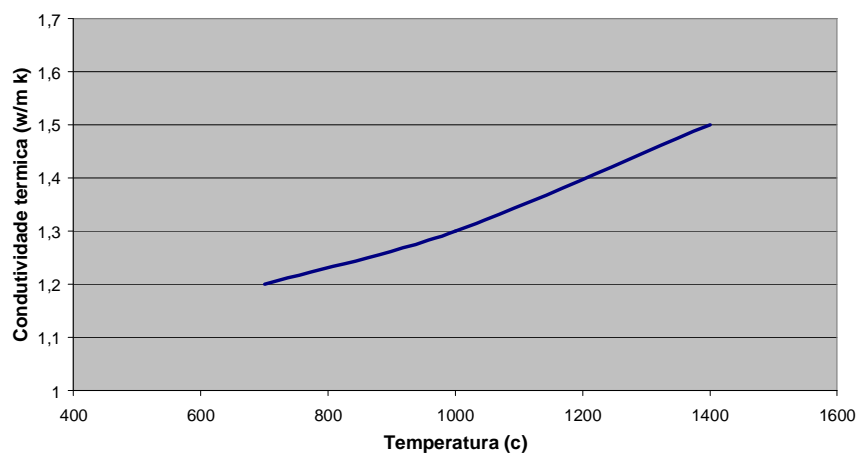
Bloco de Carbono 8SR**Tijolo de grafite BC-30****Mulita**

Figura 4.9 Valores de condutividade térmica dos materiais utilizados, fornecidos pelos fabricantes.

4.3- Modelo para problema direto

O modelo de desgaste do cadinho tem como objetivo identificar o perfil de erosão com a posição da isoterma de 1150°C, obtido a partir da transferência de calor nos refratários do cadinho. Esta linha representa um limite potencial da penetração do ferro-gusa dentro da parede do cadinho pela porosidade dos refratários.

O modelo supõe uma boa resistência do refratário. Com a evolução tecnológica, começaram a ser disponibilizado materiais de pouca porosidade e boa resistência à penetração do ferro-gusa que podemos, nestes casos, considerar que as propriedades do refratário não são significativamente modificadas. Então baseado no fato que os testes realizados nos materiais usados no cadinho demonstraram a baixa porosidade e a boa resistência à penetração metal, concluiu-se que este critério é o que melhor corresponde às características reais do cadinho do alto-forno N°1 da Gerdau Açominas. Logo, o modelo de desgaste considera que:

- A posição da isoterma de 1150°C é estimada considerando que as propriedades dos refratários não variam durante a campanha do alto-forno.
- A posição da linha de desgaste é modificada quando a isoterma de 1150°C se move para o interior do cadinho, ultrapassando a posição histórica.

Em cada momento do tempo, para o qual um conjunto de medição tem sido feito, é resolvido, pelo método de elementos finitos, um problema térmico estacionário. Esta hipótese é aceita extensamente na bibliografia devido às mudanças de temperatura lentas que caracterizam o fenômeno físico em questão. O modelo analisará o estado térmico e o perfil da erosão de uma seção radial do cadinho. No item 4.2 são apresentados a geometria da região, os materiais refratários usados em cada uma delas e a posição onde os termopares estão instalados. As propriedades termo físicas dos materiais do cadinho correspondem aos valores de bibliografia ou às folhas técnicas dos fornecedores. As propriedades estão detalhadas o item 4.2.1.

4.3.1- Equacionamento Matemático

Os problemas de condução de calor estacionários ou lei de Fourier estão caracterizados pela seguinte equação diferencial 4.1:

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (4.1)$$

onde k é a condutividade térmica e o símbolo ∇ chamado nabia é o operador diferencial vetorial.

Para problema bidimensional simétrico axialmente em coordenadas cilíndricas da origem a equação 4.2.

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(k \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (4.2)$$

onde k é a condutividade térmica e o r e z são grandezas em metro(m) nas direções radial e vertical, respectivamente.

4.3.2- Condições de contorno

Para se obter a solução do sistema de equações representado pela equação 4.2 são necessárias cinco condições de contorno. A Figura 4.10 apresenta um esquemático do domínio do modelo com as condições de contorno.

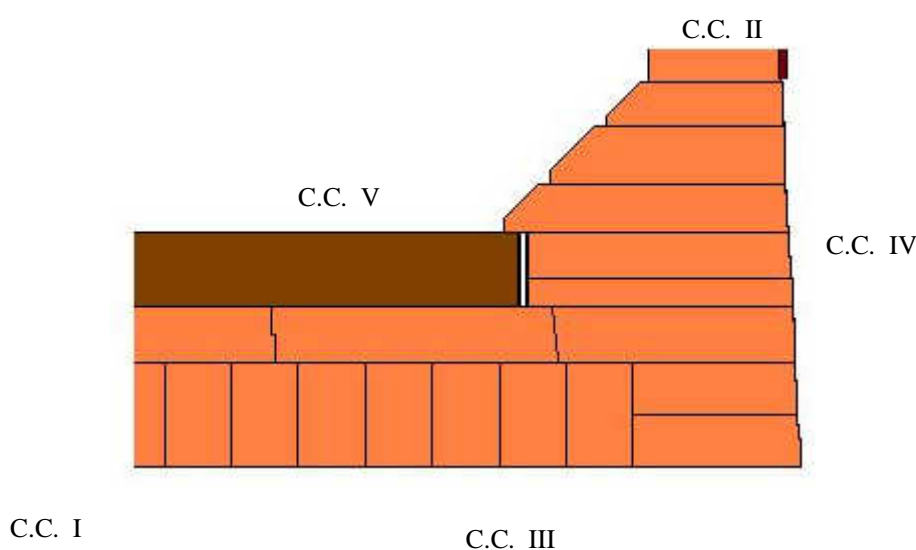


Figura 4.10: Posição das condições de contorno.

1. Condição de contorno I:

Por ser radialmente simétrico, o fluxo de calor é considerado zero nesta região.

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_I = 0 \quad (4.3)$$

2. Condição de contorno II:

A interface entre o furo de gusa e o limite superior da parede lateral do cadinho é uma região muito complexa de modelamento e de pouco interesse no aspecto de desgaste, pois é uma região sempre protegida pelo cogumelo. Com isso, o limite superior da parede será considerado isolado.

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{II} = 0 \quad (4.4)$$

3. Condição de contorno III:

A condição III refere-se da base do cadinho. A refrigeração é feita pela passagem de água em tubos localizados na soleira do forno.

$$-K \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{III} = h_{III}(r) \cdot (T(r) - T_{III,\infty}) \quad (4.5)$$

onde $T_{III,\infty}$ é a temperatura da água, $T(r)$ é a temperatura na face fria do carbono da soleira e h é o coeficiente de transferência de calor entre o bloco da base e a água da soleira. O h foi estimado pelos valores históricos dos termopares internos.

4. Condição de contorno IV

A condição IV refere-se à parede do cadinho. A refrigeração é feita por chuveiro de água.

$$-K \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{IV} = h_{IV}(z) \cdot (T(z) - T_{IV,\infty}) \quad (4.6)$$

onde $T_{V,\infty}$ é a temperatura da água do filme, $T(z)$ é a temperatura na face fria do carbono da parede e h é o coeficiente de transferência de calor entre a face fria do bloco da parede e a água do filme. O h foi estimado pelos valores históricos.

5. Condição de contorno V

As temperaturas impostas sobre a curva que corresponde à isoterma de 1150°C.

$$T_v = T_{Isoterma} \quad (4.7)$$

onde $T_{isoterma}$ é a temperatura de solidificação do ferro-gusa.

4.3.3- Discretização

A região do cadinho de alto-fornos é complexa, por ser constituído por vários tipos de materiais e pelo seu formato característico. Para se obter uma solução geral, de modo a contornar este problema, a região do cadinho foi subdividida em regiões, variando-se apenas as dimensões conforme a posição do desgaste e refinamento desejado em relação ao número de elementos pré-estabelecidos. Para a discretização a rede sofrerá algumas distorções, de tal forma, a coincidir a localização dos nós com os termopares e que as transições de tipos de materiais diferentes, num mesmo elemento, ocorram em nós diametralmente opostos. Nesses dois casos, essas distorções são para evitar interpolação no cálculo da temperatura, a ser comparada com a do termopar de mesma localização e para facilitar a ponderação da condutividade térmica equivalente no cálculo da solução. O tipo de elemento utilizado será de 9 pontos.

4.3.4- Modelo

De acordo com as definições acima, as informações serão cadastradas no “software”, sendo que somente a dimensão do cadinho foi um pouco ajustada para facilitar o desenho dentro do programa. A Figura 4.11 mostra a tela do modelo identificando a região o bloco de carbono e mulita, a divisão dos nós e as condições de contornos.

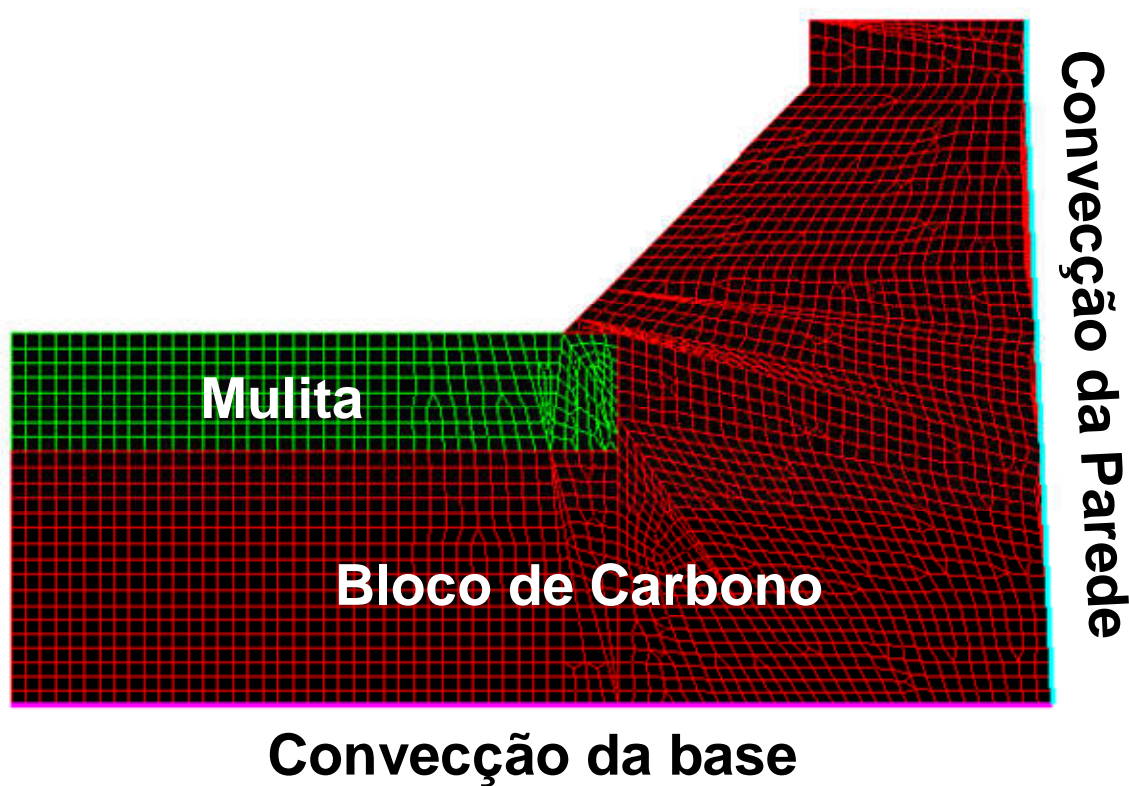


Figura 4.11: Esquemático do domínio do modelo com as condições de contorno.

4.4- Modelo do problema inverso.

A posição da isoterma de 1150°C é estimada a partir dos registros dos termopares que existem no cadinho, sendo resolvido um problema inverso de estimação de modo que as temperaturas calculadas pela técnica de elementos finitos de transferência térmica coincidem com as medidas nos termopares. Como o problema tem dimensão finita, isto significa que não somente o número das medidas dos termopares é finito, mas também a posição da linha de desgaste é parametrizada a fim de se obter numericamente uma solução aproximada. Para este modelo, parametrizamos a posição da isoterma de 1150°C pelos vetores $F(V) = (V_1, \dots, V_{n_V})$.

A Figura 4.12 mostra a subdivisão do cadinho com a localização dos vetores V .

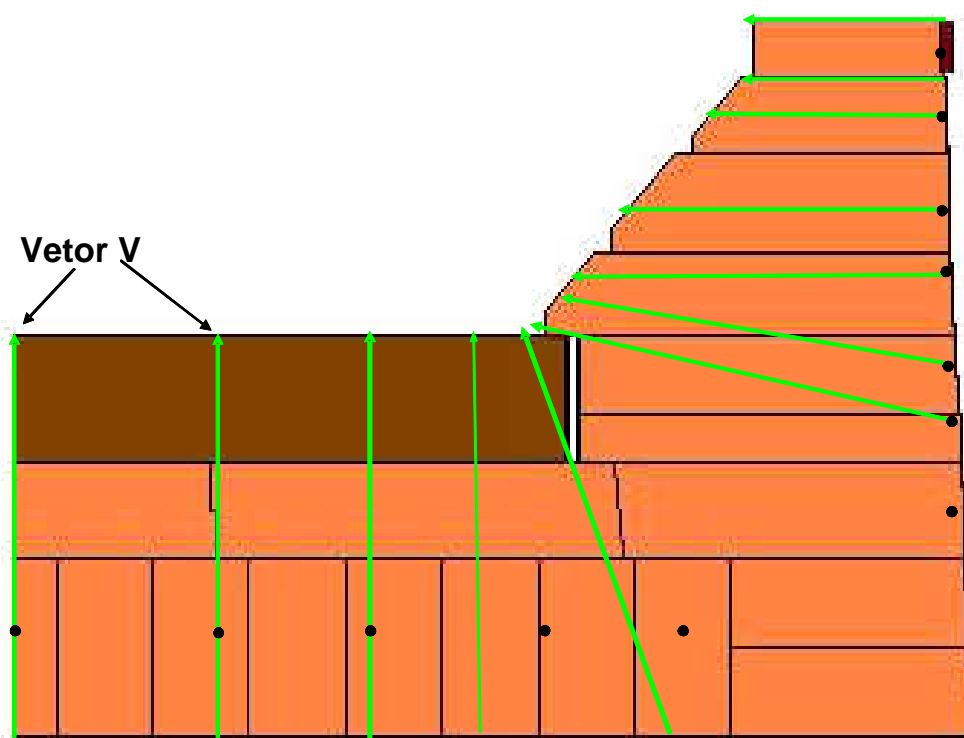


Figura 4.12: Subdivisão do cadinho com a localização dos vetores V .

Conseqüentemente o problema inverso da estimação pode ser levantado como a minimização de uma função, representado pela equação 4.8:

$$F_{(V)} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{nTermo} [T_{(X^{Termo}, V)} - T^{Termo}]^2 \quad (4.8)$$

onde:

T^{Termo} é a temperatura registrada pelos termopares instalado no ponto do cadinho \mathbf{x} .

$T_{(X^{Termo}, V)}$ é a temperatura calculada pela técnica dos elementos finitos usando a geometria V para determinada posição da isoterma de 1150°C,

X^{Termo} é a posição onde um os termopares estão localizados.

Matematicamente problemas inversos pertencem à classe de problemas mal-postos, sendo que pequenas perturbações podem provocar grande erro na solução. Assim, vários métodos podem ser aplicados a fim garantir uma solução. O que apresenta ser o mais eficiente para estabilizar a solução é o método de regularização. Para este trabalho, a regularização escolhida foi baseada no método iterativo Gauss-Newton cuja solução é representada pela equação 4.9 e 4.10:

$$V^{iter+1} = V^{iter} + \Delta V^{iter+1} \quad 4.9$$

$$\Delta V^{iter+1} = [DT^T \cdot DT + \alpha \cdot I]^{-1} \cdot [DT^T \cdot \Delta T_{V^{iter}} + \alpha \cdot I(V^\Delta - V^{iter})] \quad 4.10$$

Onde, V^{iter} é comprimento do vetor para o número da interação determinado conforme mostrado na Figura 4.12;

DT é a matriz de sensibilidade;

I é matriz identidade;

$\Delta T_{(P^{iter})}$ é a diferença entre a temperatura medida pelos termopares e calculada pela modelo direto;

V^Δ é uma solução a priori do comprimento do vetor aceitável para o problema;

α é o parâmetro de regularização que representa um compromisso entre exatidão e estabilidade.

Para definição α utilizamos a regra a-priori obtida a partir do método de regularização de Tikhonov onde $\alpha = \alpha(\delta)$, δ é chamado de nível de ruído indicado pela equação 4.11 e α é obtida através da equação 4.12:

$$\delta \geq \|T^{real} - T^{termo}\|^2 \quad 4.11$$

$$\alpha = \delta^{\frac{2}{2\nu+1}} \quad 4.12$$

onde $\nu = 1$ tem um comportamento satisfatório utilizando-se método de Gauss Newton.

O componente da matriz de sensibilidade são derivadas parciais da temperatura em relação à geometria. Para se obter a matriz é necessário fazer várias simulações no modelo direto, variando do vetor V , sendo que basicamente esta matriz representa a sensibilidade da temperatura calculada pelo modelo com a variação da posição de cada vetor P .

O componente V^Δ representa um valor que será uma referência para solução. Pelas características do cadinho do desgaste, podemos esperar que não haja grande evolução da linha de desgaste, por isso podemos utilizar a solução do modelo no instante anterior como a nova referência.

4.5- Solução do modelo

A solução do modelo será obtida à base da interação. Numa primeira etapa com as informações dos termopares externos e internos, calculamos o coeficiente de convecção da parede e da base. Ajustando o modelo direto com estes coeficientes e a linha desgaste com um valor de referência, calcula-se o perfil de temperatura. Para este mesmo perfil, fazem-se várias simulações variando o comprimento do vetor V em torno da linha de desgaste para se determinar a matriz de sensibilidade. A próxima etapa consiste na utilização do modelo inverso definido pelo método de regularização de Gauss-Newton para se calcular o novo valor da linha de desgaste. Novamente a linha de desgaste é ajustada no modelo direto e calcula-se o perfil de temperatura. Com base na diferenças entre os valores medidos nos termopares e as temperaturas calculadas, calcula-se a nova posição para posição da isoterma de desgaste utilizando o modelo inverso. Para os novos cálculos é necessário reavaliar a matriz de sensibilidade. Com a informação do modelo inverso, a nova posição da isoterma é ajustada no modelo direto para podermos calcular os novos valores de temperatura. Este procedimento é repetido até que a diferença entre as temperaturas calculadas e medidas sejam suficientemente pequenas.

4.6- Algoritmo para Solução do Problema

As etapas de avaliação do desgaste do cadinho são descritas em um fluxograma apresentado na Figura 4.13. Os procedimentos serão descritos para cada etapa.

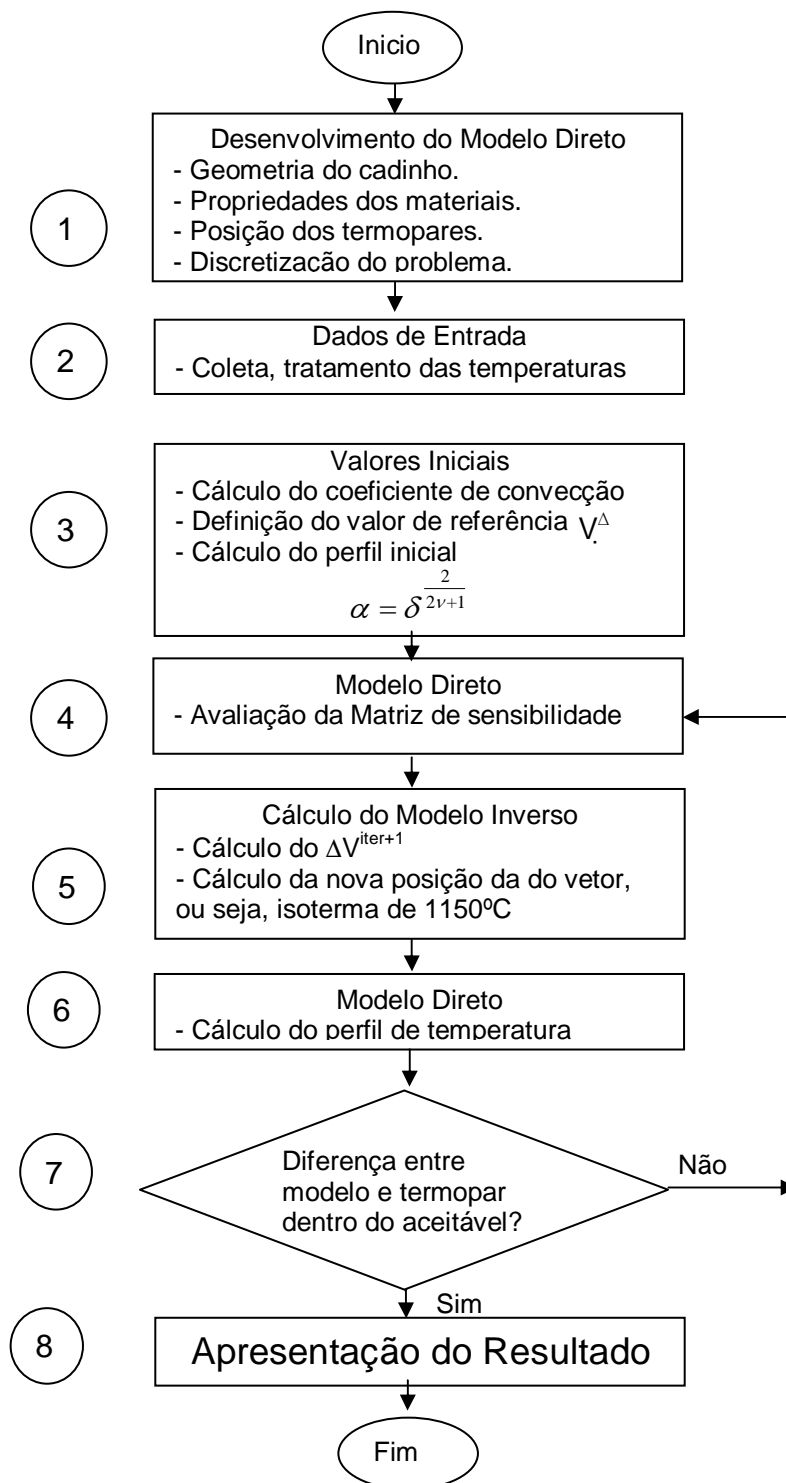


Figura 4.13: Fluxograma das etapas de avaliação do desgaste.

(1) Para o desenvolvimento do modelo serão necessários alguns dados de projeto. As informações são as geometrias do cadinho e de cada material nele contido, condutividade térmica de todos os materiais e a localização de cada termopar. O modelo foi discretizado de forma que posições dos nós coincidem com os termopares, transição de materiais em cada elemento e também para se obter uma precisão satisfatória.

(2) O banco de dados armazena todas as informações para ele enviadas, independentes dos erros nele embutido. Com isso é necessário realizar um tratamento das informações através da definição de algumas regras para se evitar o armazenamento de temperatura que trariam erro muito grande ao modelo.

(3) Com o valor das temperaturas internas e externas calcula-se o coeficiente de convecção para parede e base. Para o modelo inverso é definido o parâmetro α e V^Δ , sendo que este valor é o resultado do cálculo no instante de tempo anterior.

(4) Avaliação matriz de sensibilidade através da realização de várias simulações no modelo direto, variando o comprimento do vetor V .

(5) Solução do ΔV^{iter+1} utilizado o método de Gauss-Newton e determinando nova posição da linha de desgaste.

(6) Solução da nova posição de desgaste através da simulação no modelo direto.

(7) Verificação se a diferença entre as temperaturas do modelo e dos termopares está dentro do limites aceitáveis.

(8) Apresentação do perfil de desgaste do cadinho, perfil de temperatura e tabela com os principais resultados.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação do modelo para o cálculo da distribuição de temperatura no cadinho, com o propósito de avaliar o desgaste, se deu em seis diferentes direções: furo de gusa 1, furo de gusa 2, furo de gusa 3, furo de gusa 4, posição 0° e posição 180°. Para verificar a evolução, trabalhamos com as temperaturas do ano de 1997 a 2005, pois as informações de temperatura do ano de 1994 a 1996 não apresentavam consistências.

Por característica do modelo, a temperatura é o único dado de entrada medido diretamente ao longo do funcionamento do processo, sendo que as outras informações como condutividade térmica dos materiais utilizados e as dimensões foram obtidas previamente. O coeficiente de convecção é calculado pelos termopares internos e externos.

5.1- Evolução das temperaturas.

O sistema de supervisão dos dados de temperatura no início da campanha do alto-forno era totalmente manual. As informações eram digitadas e ficavam armazenadas sem planilhas. O primeiro sistema de armazenamento foi desenvolvido em 1999, sendo que o sistema atual, ou seja, mais avançado, pois possibilita ter informações com intervalo de coleta pequeno por muito tempo, foi instalado apenas em 2004. Por isso o erro de digitação era uma causa possível para qualquer inconsistência até o ano de 1999. Na Gerdau Acominas não existe um sistema de gerenciamento/validação das informações coletadas. Mesmo que houvesse algum mal funcionamento em qualquer dos sensores, esta informação era armazenada. Ocorrendo problema na refrigeração, ou necessidade de retirar a água para alguma manutenção, ou necessidade em aumentar a vazão do cadinho, esta informação também não era controlada. Devido aos problemas mencionados acima foi necessário fazer uma verificação da consistência dos dados de temperatura antes da utilização no modelo. Basicamente foi verificada se havia grande diferença da temperatura de um dia para outro, ocorrência de alguma parada operacional e ocorrência de instabilidade operacional. Para facilitar a identificação das regiões do cadinho, as cores de cada posição foram padronizadas, sendo possível verificar o comportamento do cadinho por direção em cada elevação.

Na evolução da base, apresentada pela Figura 5.1, podemos verificar que as oscilações das temperaturas a partir do ano de 2002 ficaram mais suaves. Este comportamento pode ser explicado pela troca do sistema de refrigeração do corpo de placas de refrigeração por “stave coolers”. Esta troca provocou uma maior estabilidade na marcha do alto-forno, evidenciada também pela temperatura da base do forno. Esta estabilidade também pode ser verificada nas temperaturas da parede.

As Figuras 5.2 e 5.3 apresentam a evolução das temperaturas da elevação 7790 e 8350. Apesar dos termopares estarem na parede, este nível está localizado na base do forno. Isto pode ser verificado pelas baixas temperaturas apresentadas.

As Figuras 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7 apresentam a evolução das temperaturas da elevação 8700, 9300, 9700 e 10300. Esta é região onde os fluxos de líquidos na parede estão concentrados, ou seja, onde as temperaturas tendem a ser maiores e onde a vida do cadinho é determinada pela espessura residual. Pode-se notar que as temperaturas dos furos de gusa são maiores do que a direção 0° e 180° e que a temperatura na região do furo de gusa 2 e 3 apresentaram maior diferença em relação ao furo 1 e 2 a partir do ano de 2002. Isto se deve a recuperação do resfriamento do alto-forno ter ocorrido pelos furos 2 e 3. Este procedimento leva a injeção muito grande de oxigênio para se conseguir a comunicação do furo de gusa com as ventaneiras. Esta injeção também provoca uma degradação dos blocos de carbono.

A Figura 5.8 apresenta a evolução da temperatura da elevação 10700. Nesta região existe uma influência muito grande dos furos de gusa, sendo que as temperaturas podem ser influenciadas pela redução de espessura, passagem de gases ou trincas no cogumelo. Nesse gráfico também podemos verificar o efeito da injeção na recuperação do alto-forno.

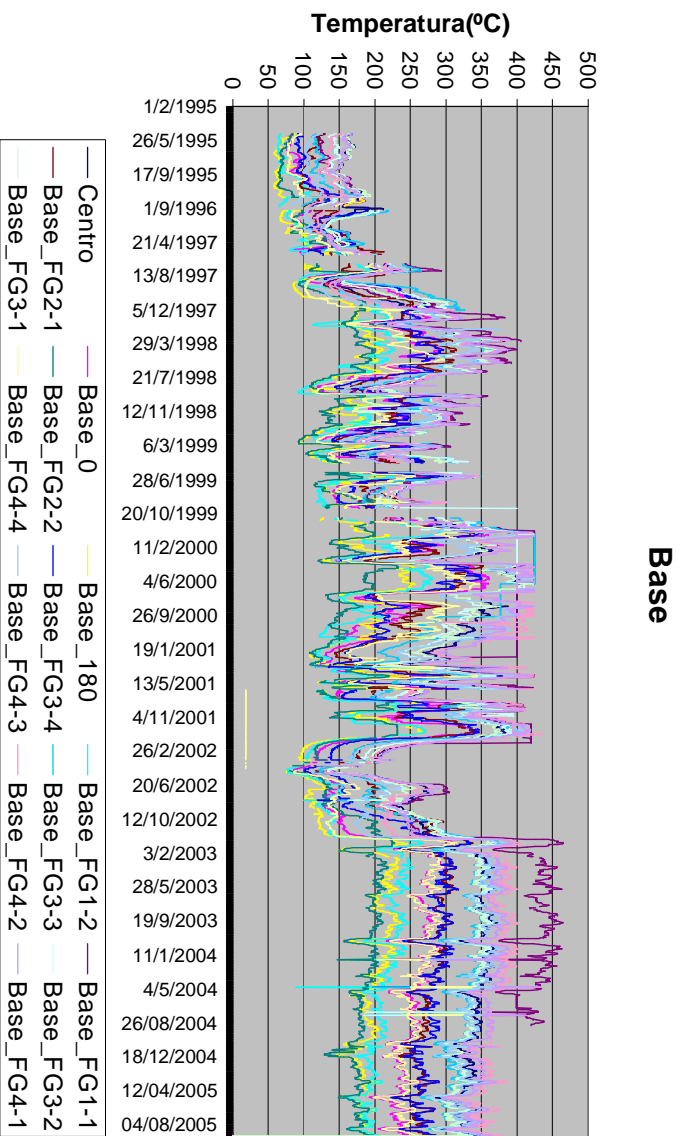


Figura 5.1: Evolução da temperatura da base.

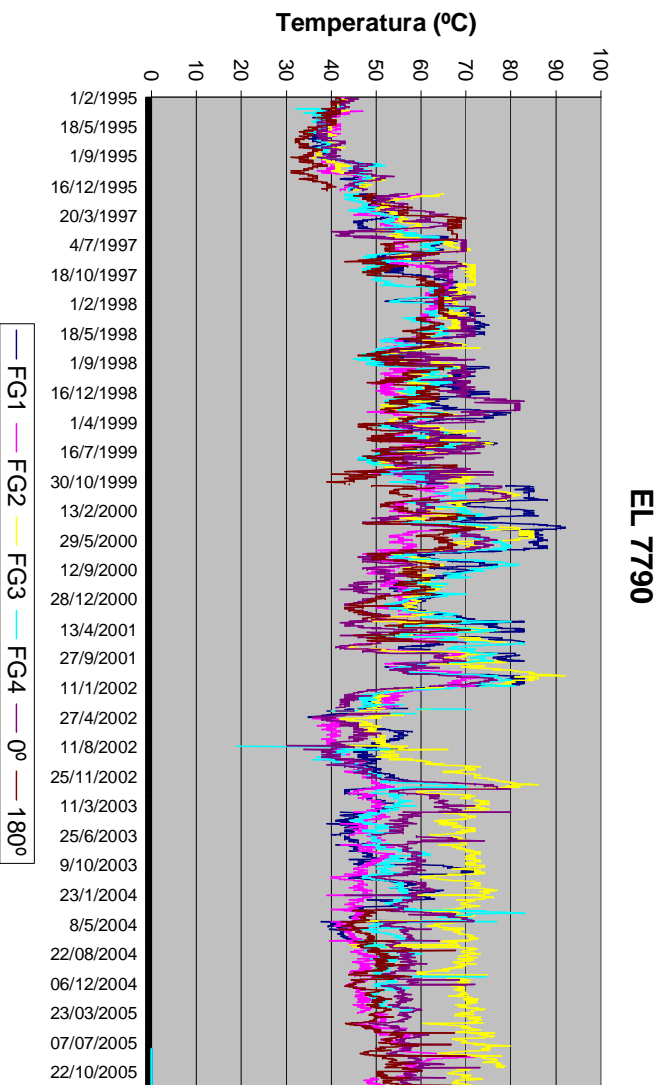


Figura 5.2: Evolução da temperatura da parede do cadinho na elevação 7790.

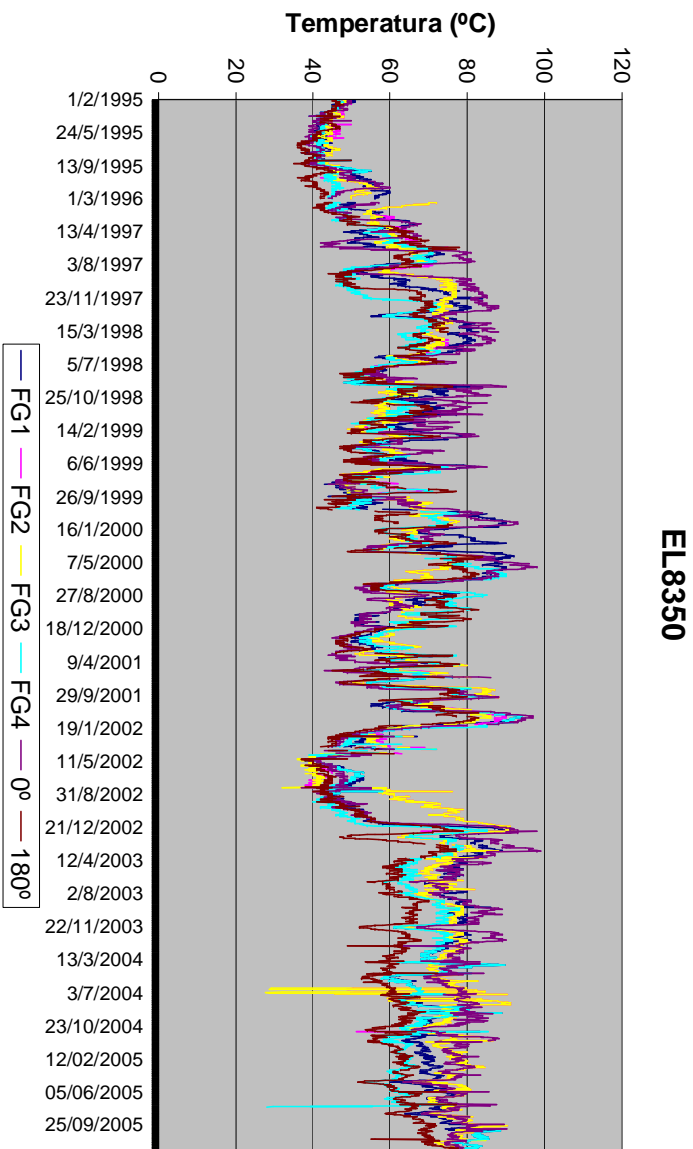


Figura 5.3: Evolução da temperatura da parede do cadinho na elevação 8350.

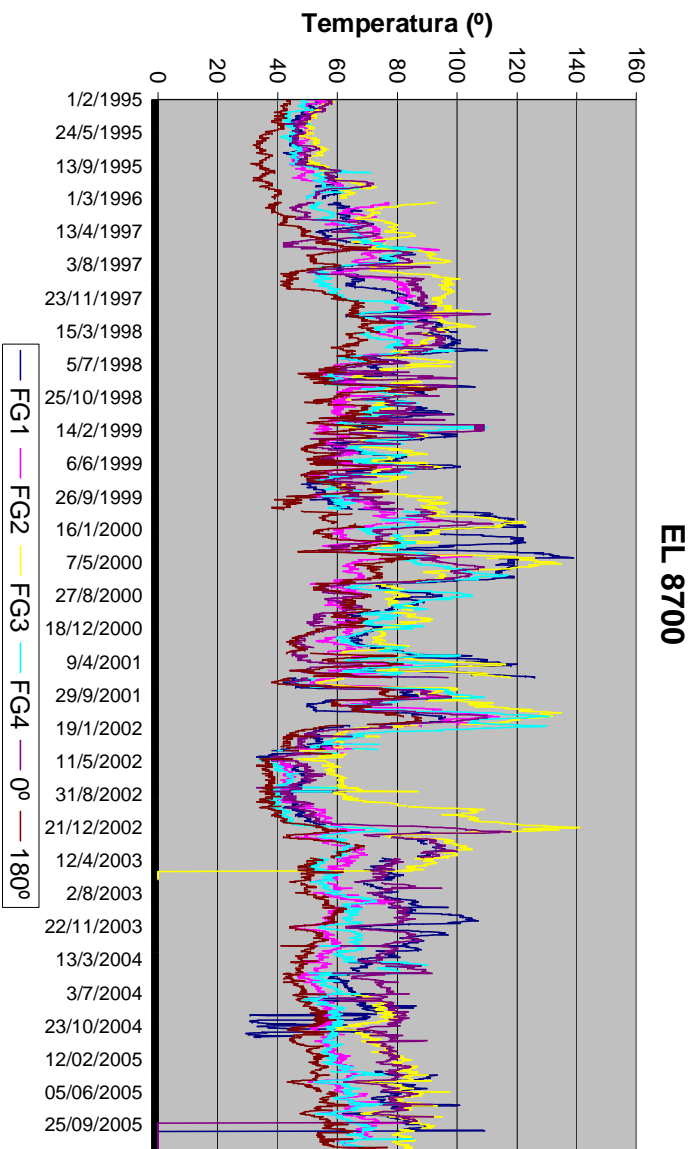


Figura 5.4: Evolução da temperatura da parede do cadinho na elevação 8700.

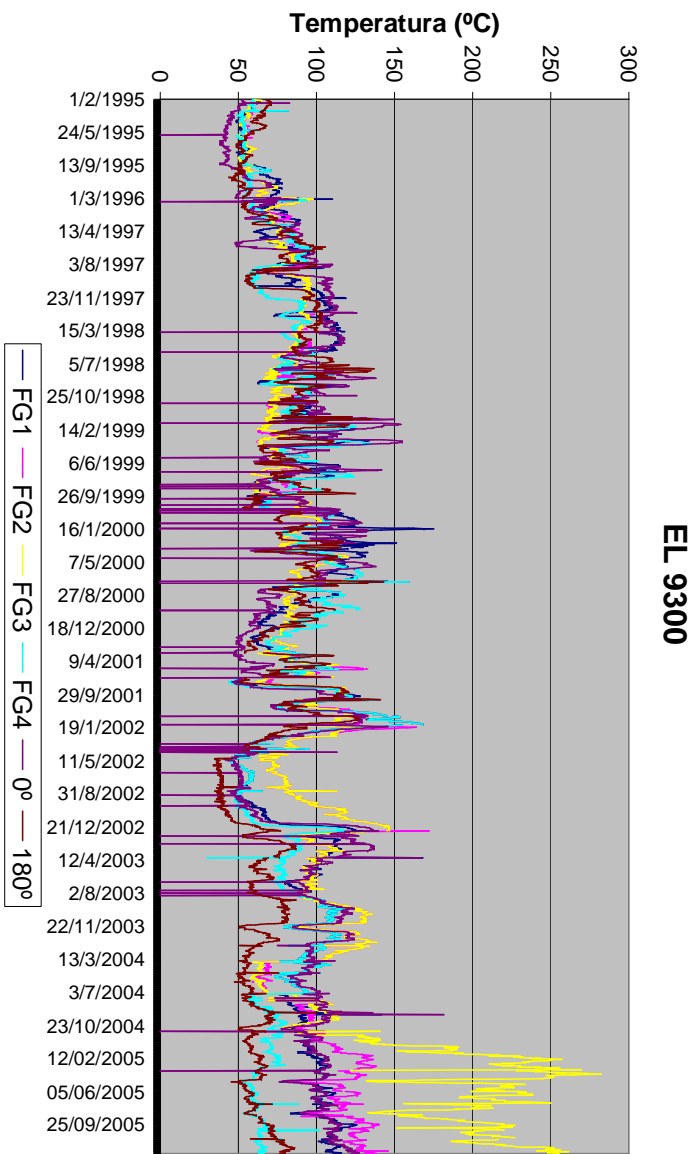


Figura 5.5: Evolução da temperatura da parede do cadinho na elevação 9300.

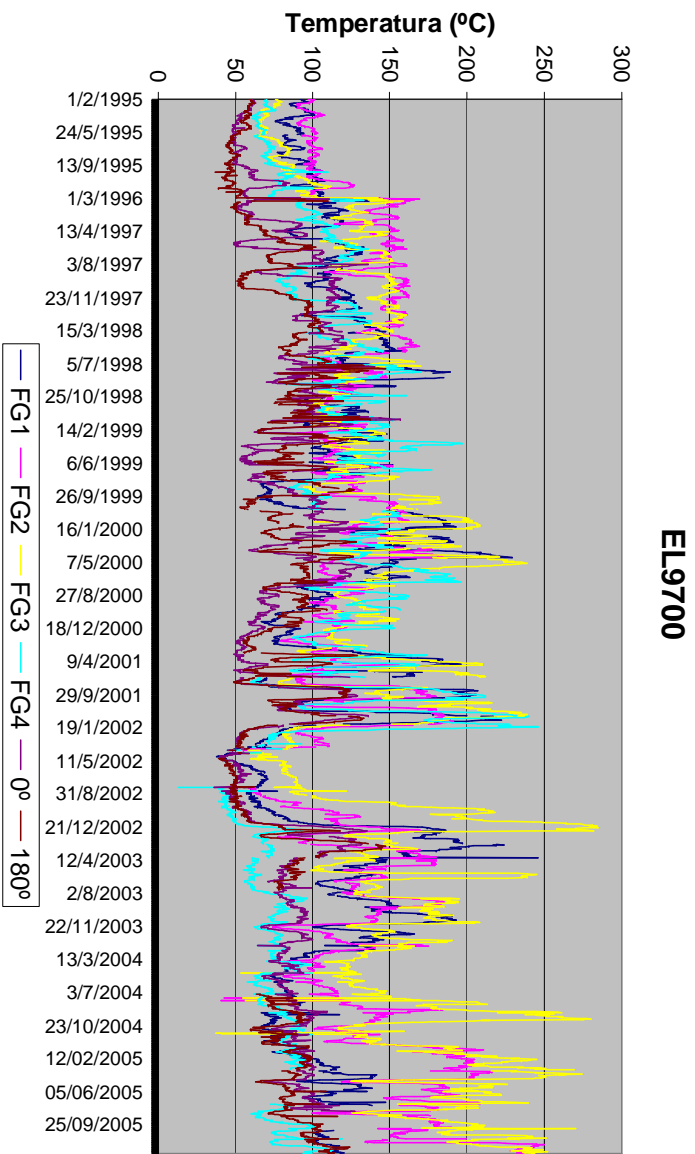


Figura 5.6: Evolução da temperatura da parede do cadinho na elevação 9700.

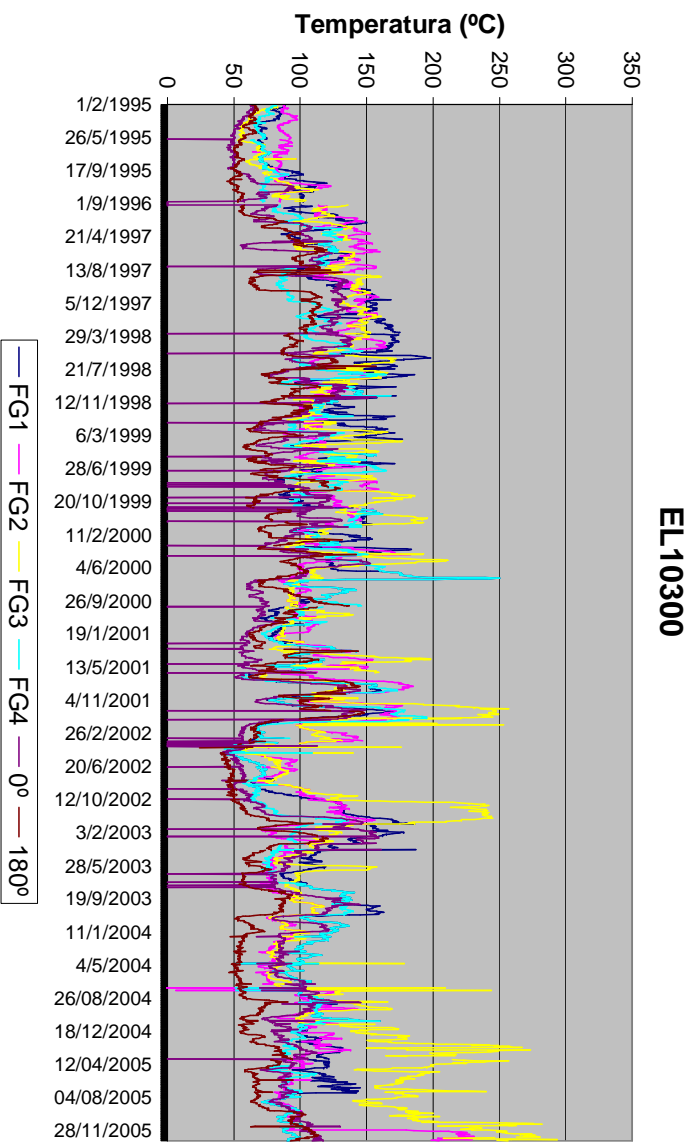


Figura 5.7: Evolução da temperatura da parede do cadiño na elevação 10300.

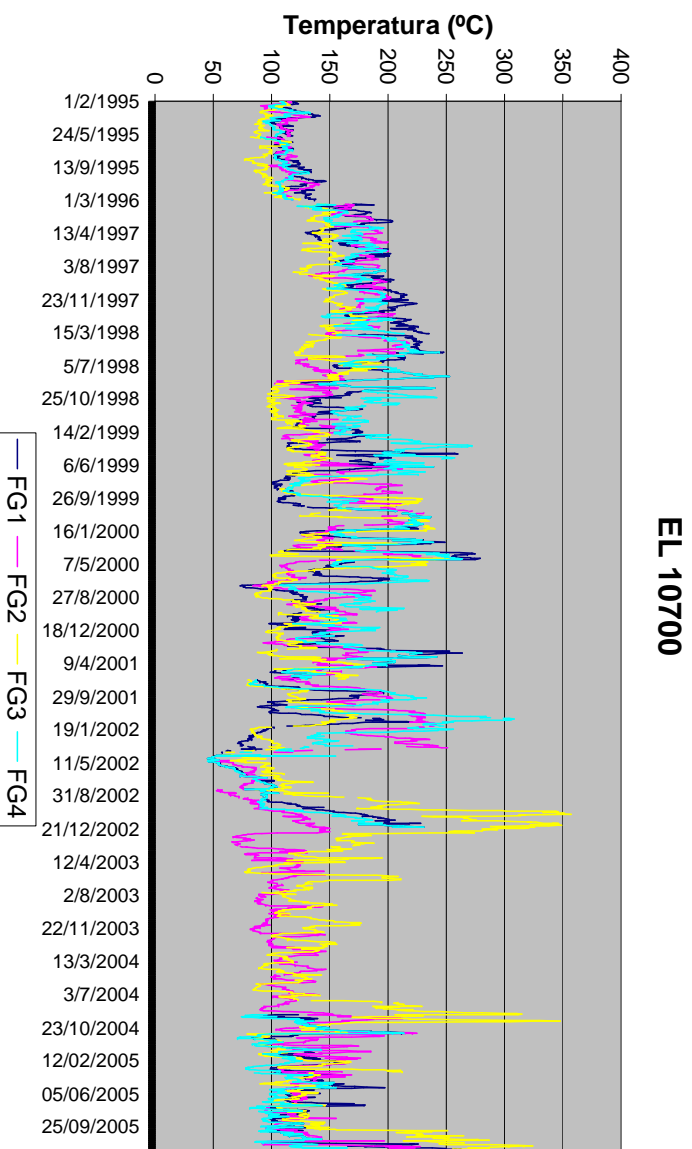


Figura 5.8: Evolução da temperatura da parede do cadiño na elevação 10700.

5.2- Avaliação de sensibilidade

Na confecção de modelos é necessária uma discussão prévia sobre sua coerência, consistência, potencialidades e flexibilidades, através de simulações hipotéticas, a fim de se evitar erros grosseiros que possam inviabilizar a aplicação.

Inicialmente com o propósito de testar a consistência da aplicação do modelo direto, foram feitas algumas simulações variando-se a condutividade térmica dos materiais, o coeficiente de convecção da refrigeração da parede e base e evolução do perfil de desgaste. Além destas variáveis, também se adotou algumas condições extremas como o isolamento térmico da parede e base. Neste caso, estas simulações, a condutividade dos materiais e a constante de convecção foram às mesmas que serão utilizadas na aplicação dos dados reais.

A Figura 5.9 (A) apresenta o resultado do modelo considerando a base isolada e a Figura 5.9 (B) apresenta o resultado considerando o isolamento da parede. Pode se perceber a eficiência da refrigeração através da evolução da temperatura para direção onde o calor é retirado. Também pode ser percebido que o efeito da refrigeração da parede é maior, pois os valores utilizados para o coeficiente de convecção é duas vezes maior.

A condutividade térmica é um dado muito importante para precisão do modelo. Para avaliar o efeito desta variável na aplicação foram feitas várias simulações variando-se condutividade e o nível de desgaste. As Figuras 5.10 apresentam os resultados destas simulações. Nas Figuras 5.10 A e C apresentam-se os resultados para um aumento de 50% da condutividade dos materiais utilizados considerando o perfil original e as Figuras 5.10 B e D faz o mesmo comparativo anterior, mas aumentando o nível de desgaste. Em ambos os casos as isotermas responderam às variações das condutividades. Também podemos notar que a medida do aumento do desgaste o perfil das isotermas foi modificada, devido à menor influência no material aluminoso, que apresenta baixa condutividade térmica em relação ao bloco de carbono, localizado na base do cadinho.

Para o final de campanha, quando o desgaste já está acentuado, o efeito da refrigeração é muito grande nas temperaturas lidas pelos termopares. Por isso é necessário avaliar a flexibilidade do modelo trabalhando com vários níveis de desgaste. Para avaliar esta eficiência foi simulado um aumento do coeficiente de convecção para vários níveis de desgaste. As Figuras 5.11 A e C apresentam os resultados para um aumento de 50% do coeficiente de convecção dos materiais considerando o perfil original e as Figuras 5.11 B e D fazem o mesmo comparativo anterior, mas aumentando o nível de desgaste. Neste tipo de simulação a solução do modelo se mostrou coerente em relação às variações dos coeficiente de convecção.

Por último, foi testado o comportamento do modelo variando o perfil de desgaste do cadinho. Foram realizados simulações de 4 níveis de desgaste. Este resultado é apresentado na Figura 5.12 (A, B, C e D). A condutividade térmica e o coeficiente de convecção foram os mesmo para todas as simulações. Os resultados se mostraram satisfatórios. A isoterma de temperatura retratou bem a forma do desgaste e a evolução das temperaturas à medida que o fluxo de calor foi aumentando.

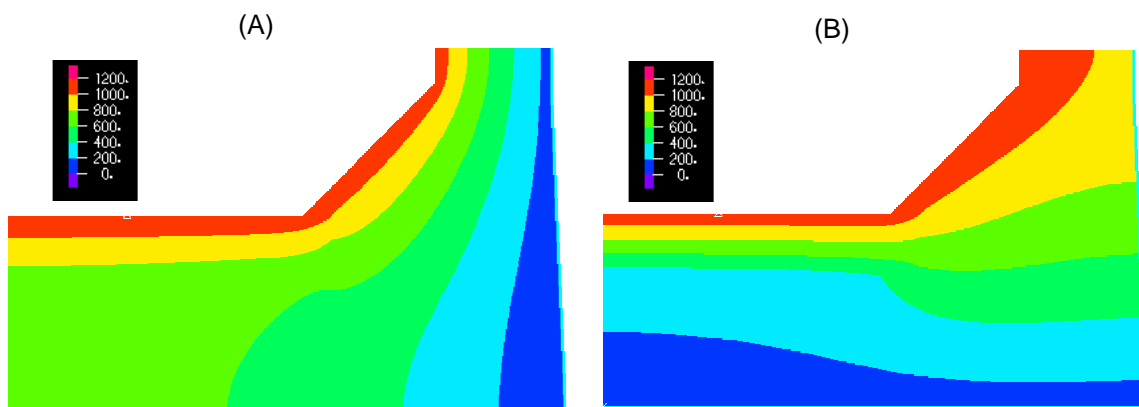


Figura 5.9: Resultado do modelo considerando a base e parede isolada

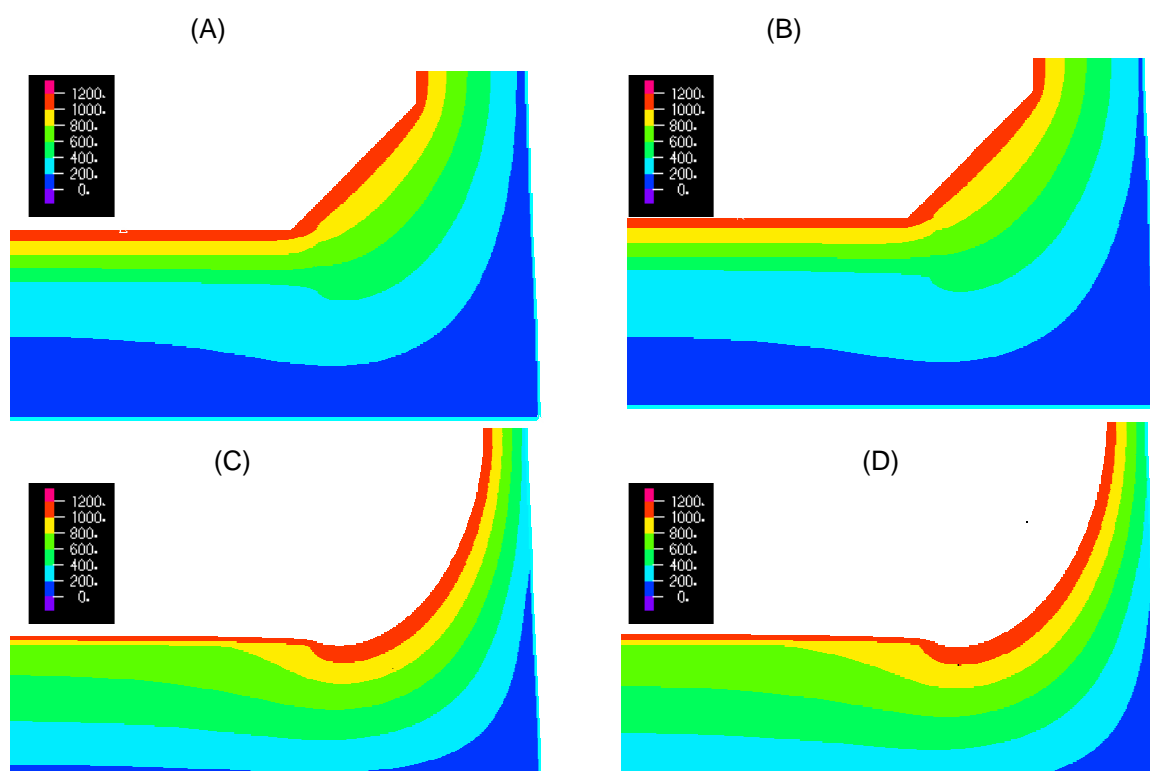


Figura 5.10: Resultados do modelo com variação da condutividade térmica.

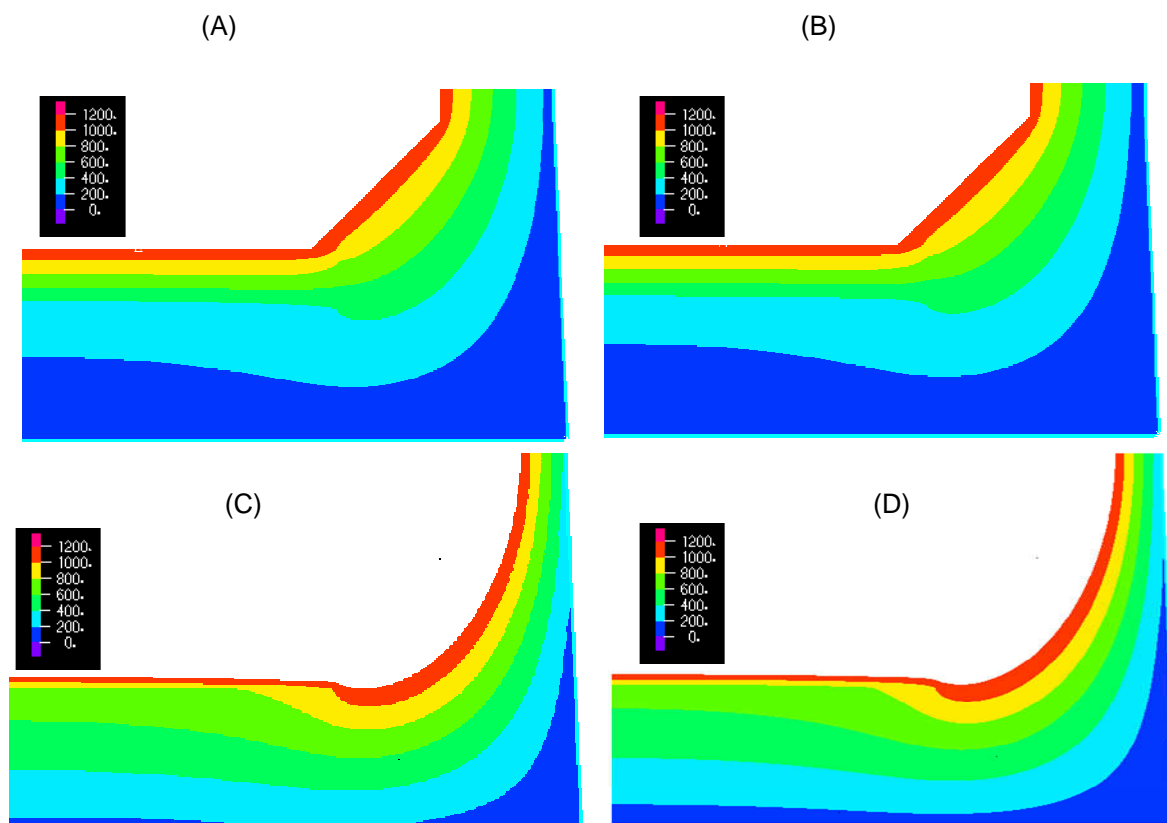


Figura 5.11: Resultados do modelo com variação do coeficiente de convecção.

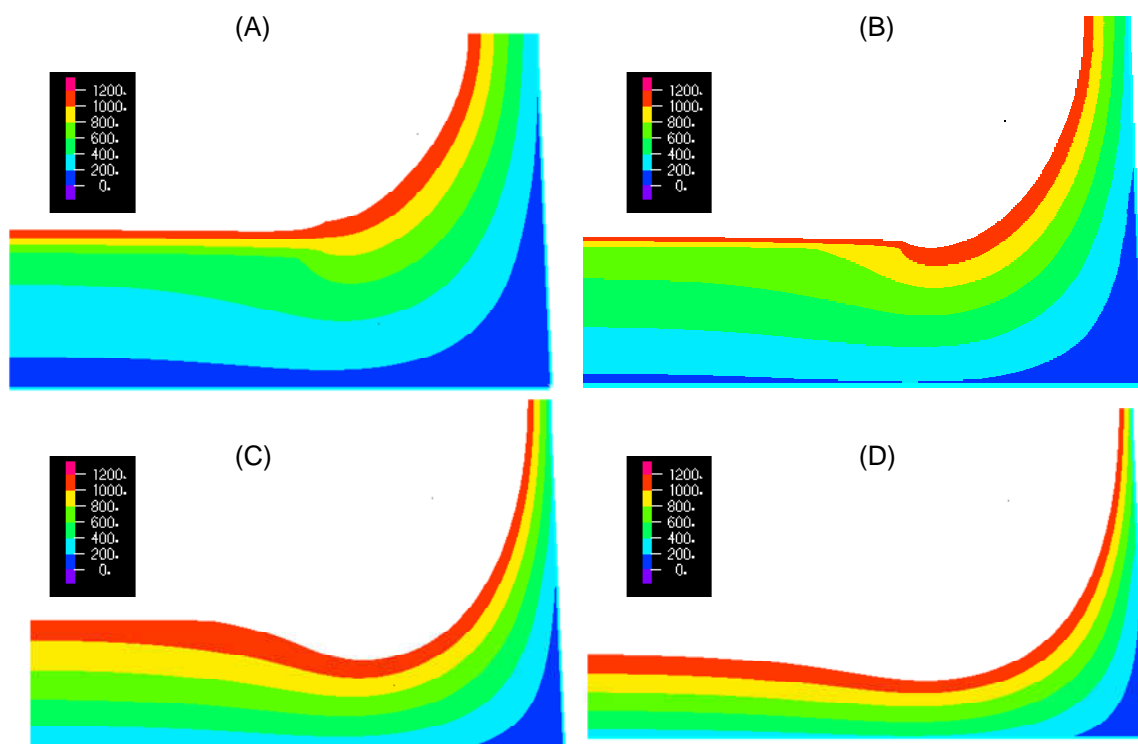


Figura 5.12: Resultados do modelo com variação da intensidade de desgaste .

No intuito de validar a solução do algoritmo contra possíveis ruídos na avaliação do desgaste devido algum erro nos dados de entrada do modelo como a condutividade térmica, coeficiente de convecção, isoterma de desgaste e medição dos termopares, foi realizado uma avaliação de sensibilidade considerando ruído de 5%. Para simulação foi definido um perfil de desgaste, que apresenta um formato esperado para o cadinho e considerando que ainda exista uma pequena espessura do refratário aluminoso na base. As temperaturas reais na posição dos termopares foram obtidas através da simulação do cálculo no modelo direto e as temperaturas lidas pelos termopares através da equação 5.1. A Figura 5.13 apresenta o perfil de desgaste considerado como real.

$$T_{termopar} = T_{real} \cdot (1 + ruído) \quad (5.1)$$

Com as informações das temperaturas com ruído de 5%, utilizamos o modelo de avaliação do desgaste do cadinho para solucionar o problema. O resultado está apresentado na Figura 5.14. A Figura 5.15 apresenta o resultado comparativo do perfil de desgaste real e o calculado pelo modelo. A Tabela V.1 mostra o quadro comparativo entre as temperaturas com ruído e as calculadas e os resultados do erro da estimativa da posição linha de desgaste devido aos ruídos. A geometria estimada, considerando um nível de ruído de 5%, apresenta um bom resultado se considerarmos o uso industrial, assim podemos concluir que o modelo desenvolvido pode ser aplicado na avaliação do desgaste do cadinho.

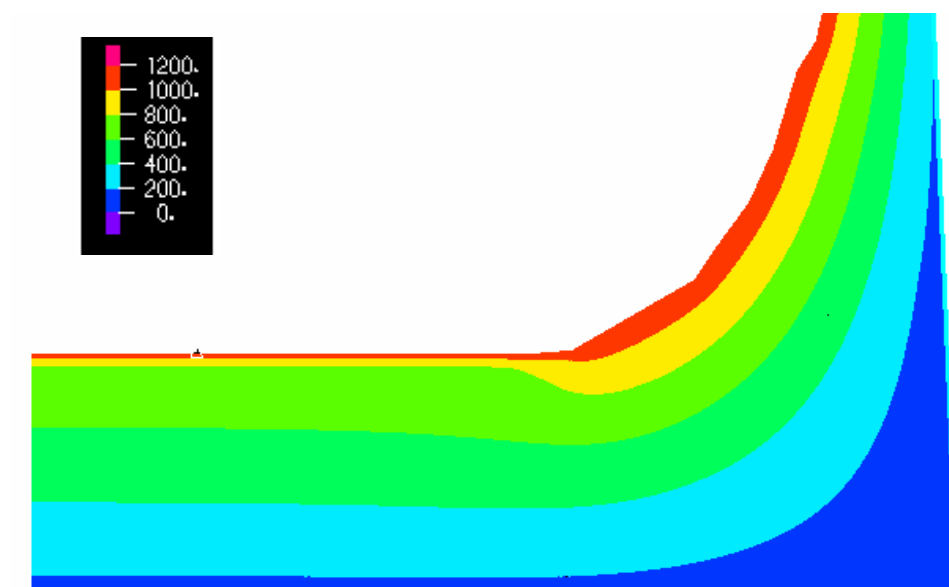


Figura 5.13: Resultado do modelo para o perfil considerado como real.

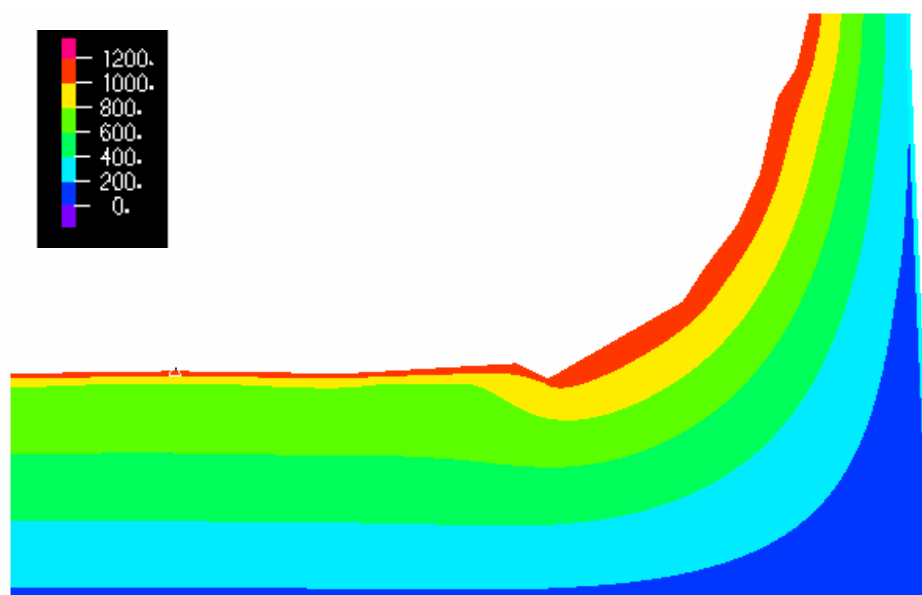


Figura 5.14: Resultado da simulação considerando 5% de ruído.

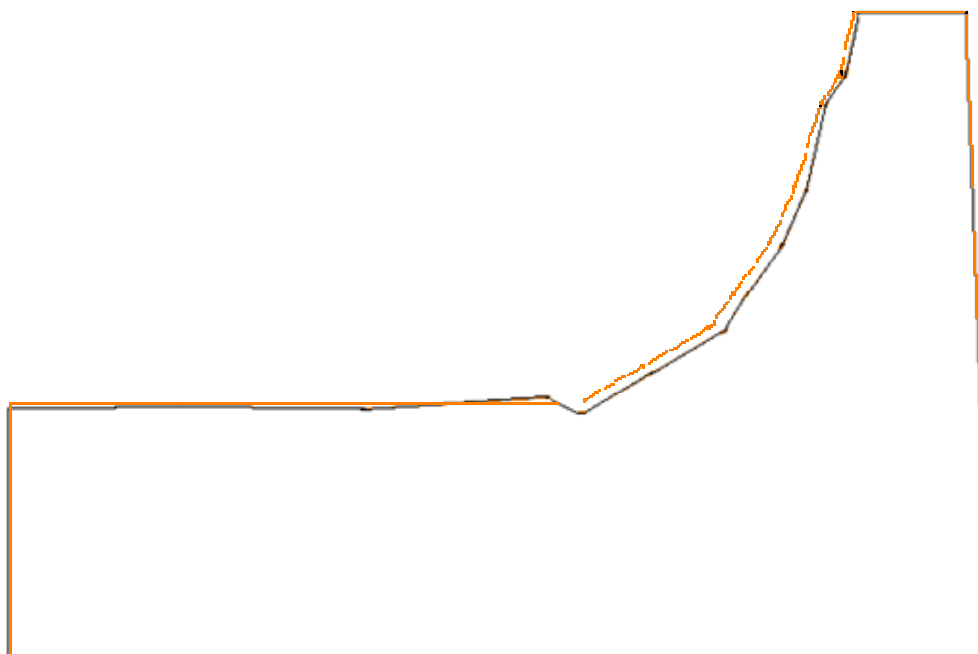


Figura 5.15: Resultado comparativo do perfil de desgaste real e o calculado.

Tabela V.1: Resultado das diferenças da temperatura padrão e o resultado das simulações e dos erros de estimativa da linha de desgaste.

	Temperatura				Espessura			
	Real	Termopar	Calculado	ΔT (%)		Real	Calculado	ΔE (%)
Base 1	397.75	417.64	419.37	-0.44	V1	1.81	1.78	1.66
Base 2	399.24	419.20	419.98	-0.20	V2	1.81	1.80	0.55
Base 3	406.07	426.38	424.70	0.41	V3	1.81	1.78	1.66
Base 4	416.02	436.82	436.37	0.11	V4	1.81	1.86	-2.76
Base 5	353.64	371.32	373.75	-0.69	V5	1.83	1.74	4.92
EL8350	83.41	87.59	86.91	0.81	V6	1.90	1.80	5.26
EL8700	103.61	108.79	108.50	0.29	V7	1.70	1.61	5.29
EL9300	122.53	128.65	128.69	-0.03	V8	1.40	1.30	7.14
EL9700	173.55	182.23	182.77	-0.31	V9	1.20	1.11	7.58
EL10300	199.36	209.32	209.37	-0.02	V10	1.00	0.96	3.55
EL10700	232.44	244.06	242.80	0.54	V11	0.90	0.86	4.44
EL10701	251.96	264.55	263.22	0.53	V12	0.80	0.77	4.33

5.3- Avaliação do desgaste.

Para se avaliar a evolução do desgaste foi realizado um cálculo por ano para cada direção do cadinho. O período escolhido foi determinado pela máxima temperatura obtida naquele ano. Observamos que a temperatura a partir do ano de 2002 em algumas direções apresentava temperatura menor devido à formação de uma grande camada protetora ou simplesmente um cascão. Como a finalidade do modelo é identificar a isoterma de máximo desgaste, a partir deste ano o modelo não foi rodado, ou seja, o desgaste máximo do último ano de aumento de temperatura ficou congelado para os próximos anos.

A Figura 5.16 mostra o perfil de temperatura esperado para cadinho original sem desgaste. O resultado foi utilizado para verificar qual seria a temperatura do termopar mínima para que houvesse o desgaste. Para se conseguir este resultado foi colocada a temperatura de 1150°C em toda superfície interna do cadinho. As cores estão identificando as isotermas de 200°C, 400 °C, 600 °C, 800 °C, 1000 °C e 1150 °C. Com essas informações verificamos que o desgaste da parede do cadinho iniciou-se a partir do ano de 1997, por isso, a avaliação de desgaste também se iniciou por esta data. Para facilitar a visualização da evolução de desgaste, será apresentada a atualização do perfil máximo de desgaste até o ano do cálculo.

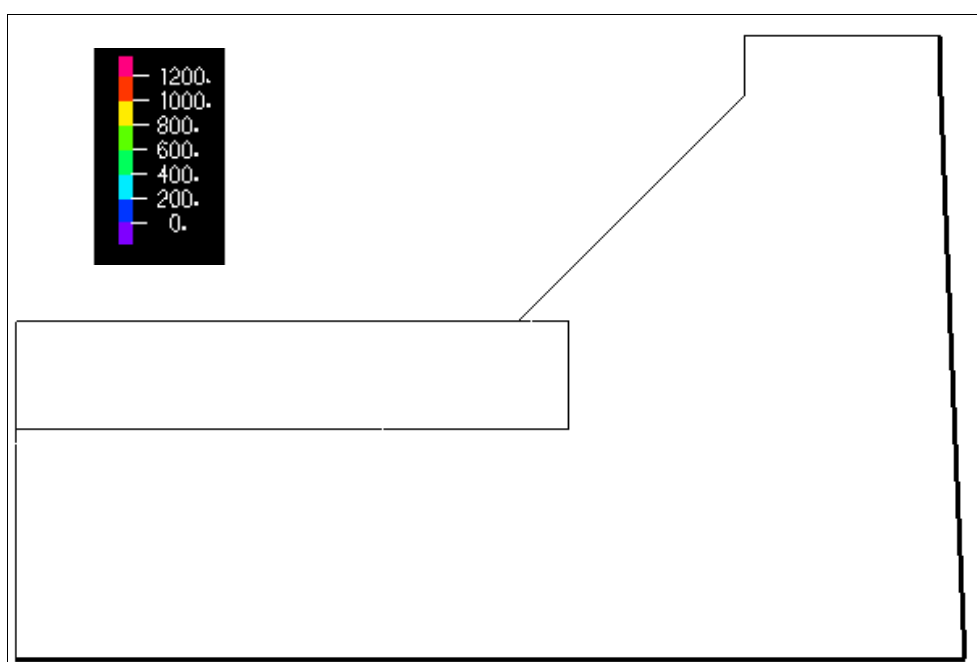


Figura 5.16: Perfil de temperatura do cadinho original.

Para a discussão dos resultados começaremos com o furo de gusa 1. Comparando-se as temperaturas dos termopares e o resultado do modelo de desgaste para o cadinho original, verificamos que o início do desgaste iniciou-se na parede em 1998 e na base já no ano de 1997. Devido ao fato do modelo não ser programado para inclusão de camada agregada na parede para redução da isoterma naquela posição, o cálculo só foi possível iniciar-se a partir do ano de 1998. As Figuras 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20 apresentam os resultados do modelo para os anos de 1998, 1999, 2000 e 2001. Verifica-se que o desgaste do revestimento cerâmico da base apresenta um grande desgaste já no ano de 1998. Este resultado já é esperado, pois este refratário funciona como um sacrifício para se ajustar no perfil de passagem dos líquidos. Para os demais anos o desgaste da base apresenta pequenas variações e sem desgastar o bloco de carbono, mostrando que a refrigeração da soleira está suficiente para formar uma camada agregada. Quanto à parede, o perfil do desgaste se ajustou para um perfil em forma de taça, como esperado. Para reforma de 1994, todo projeto do cadinho foi modificado para se evitar o desgaste na forma de “pata de elefante”. Apenas no ano de 1999 pode ser observado um início de desgaste maior na parte inferior da parede, mas já no próximo ano todo perfil do cadinho foi ajustado para o padrão taça. A partir do ano de 2001 o perfil de desgaste ficou estabilizado.

Para o furo de gusa 2, já foi possível iniciar a avaliação do desgaste pelo modelo no ano de 1997, entretanto pode-se observar pela evolução das temperaturas antes de 1997, que já existia um desgaste na base do cadinho. As Figuras 5.21, 5.22, 5.23, 5.24, 5.25, 5.26 e 5.27 apresentam os resultados do modelo para os anos de 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002 e 2005. Verifica-se que o desgaste do revestimento cerâmico da base é menor do que o furo de gusa 1. Por estes dois furos estarem diametralmente oposto, podemos concluir que o desgaste do fundo está deslocado para o furo 1. Isto pode ser explicado por um fluxo preferencial de gusa nesta região devido à disposição do homem morto. Quanto ao refratário da base notamos que o desgaste evoluiu rapidamente até 1998, sendo que a partir deste período pequenas variações são observadas. Quanto à parede, o perfil também se ajustou para um perfil em forma de taça, mas apresentando um desgaste menor do que o furo 1 e localizado na região superior da parede. Provavelmente por apresentar uma grande espessura residual, o desgaste dos blocos não estabiliza no ano 2002, sendo que em 2005 acontece nova redução de espessura.

Para o furo de gusa 3, foi possível iniciar a avaliação do desgaste pelo modelo no ano de 1997, entretanto pode-se observar pela evolução das temperaturas antes de 1997, que já existia um desgaste na base do cadinho. As Figuras 5.28, 5.29, 5.30, 5.31 e 5.32, apresentam os resultados do modelo para os anos de 1997, 1998, 1999, 2000 e 2002. Quanto ao refratário da base notamos que o desgaste evoluiu rapidamente até 1999, sendo que a partir deste período pequenas variações são observadas. Quanto à parede, o perfil também se ajustou para um perfil em forma de taça, mas apresentando um desgaste bem maior do que os furos apresentados. A menor espessura está localizada na região superior da parede, perto do furo de gusa.

Para o furo de gusa 4, foi possível iniciar a avaliação do desgaste pelo modelo no ano de 1997. As Figuras 5.33, 5.34, 5.35, 5.36, 5.37 e 5.38, apresentam os resultados do modelo para os anos de 1997, 1998, 1999, 2000, 2001 e 2002. Em 1997 e 1998 o perfil da base apresenta uma distorção no centro da base e na parte superior da parede, que desaparece a partir de 1999. Perfil de desgaste é bem semelhante aos outros furos, com perfil de desgaste estável a partir de 1999 e no formato taça.

As Tabelas V.2, V.3, V.4, V.5, V.6, V.7, V.8, V.9, V.10, V.11, V.12, V.13, V.14, V.15 e V.16 V.17, V.18, V.19, V.20, V.21, V.22 e V.23 e apresentam o resultado comparativo entre os termopares e o resultado do modelo, com as respectivas diferenças e erros relativos. Os erros apresentaram-se baixos, com exceção das elevações 8350, 9300 e 10300. Estas elevações estão 2 metros deslocados da linha da direção do furo de gusa e funcionaram apenas como acompanhamento do resultado do modelo. Para melhorar o resultado do modelo já foi iniciado um projeto para instalação de novos termopares no cadinho visando eliminar estes pontos cegos.

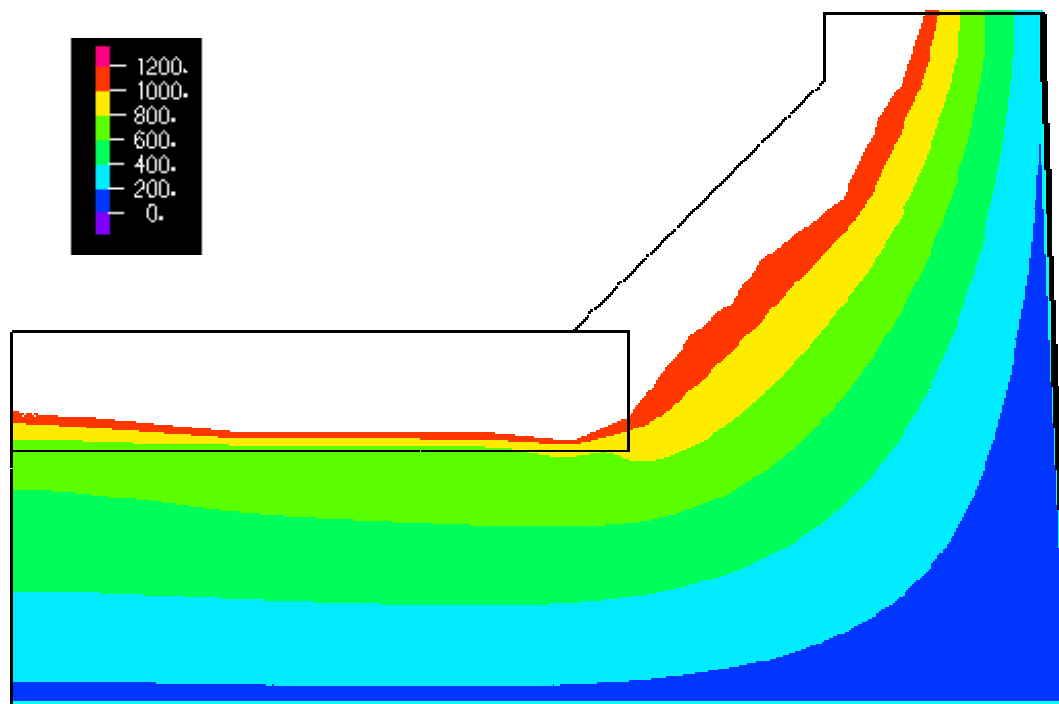


Figura 5.17: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 1 no ano de 1998.

Tabela V.2: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 1 do ano de 1998.

FG1 - 1998				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	376	375,4	0,6	0,2%
B 29	406	405,9	0,1	0,0%
B 24	232	240,6	-8,6	-3,7%
EL7790	75	75,3	-0,3	-0,5%
EL8350	84	92,9	-8,9	-10,7%
EL8700	110	110,2	-0,2	-0,2%
EL9300	118	159,7	-41,7	-35,3%
EL9700	189	188,6	0,4	0,2%
EL10300	198	229,3	-31,3	-15,8%
EL10700	253	253,1	-0,1	0,0%

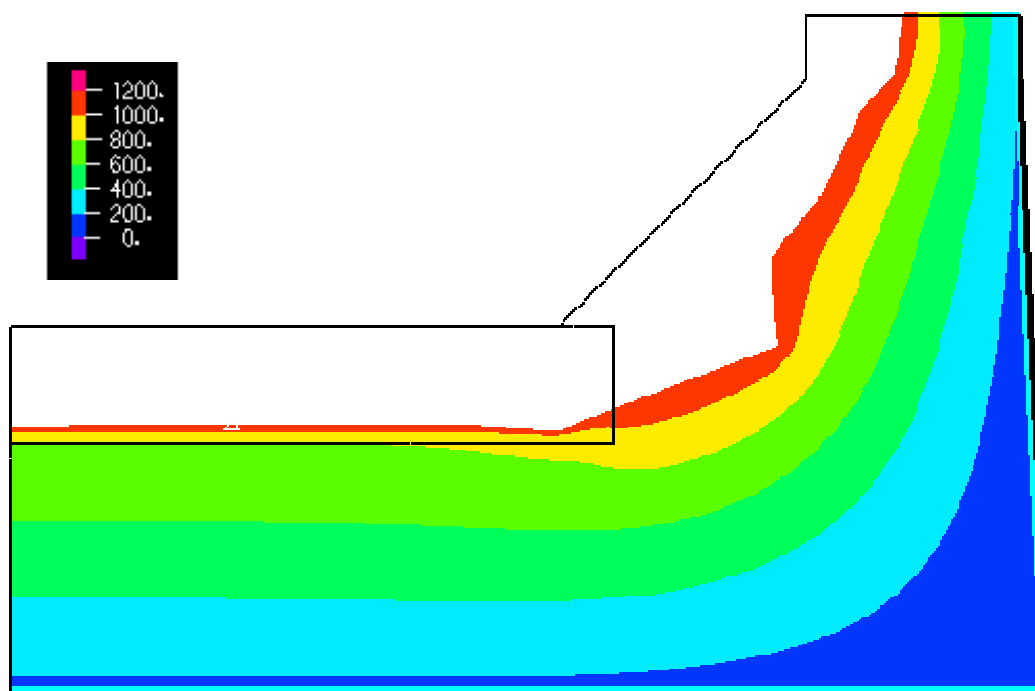


Figura 5.18: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 1 no ano de 1999.

Tabela V.3: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 1 do ano de 1999.

FG1 - 1999				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	423	422,1	0,9	0,2%
B 29	425	422,1	2,9	0,7%
B 24	288	286,6	1,4	0,5%
EL7790	85	84,8	0,2	0,2%
EL8350	90	103,4	-13,4	-14,9%
EL8700	119	119,9	-0,9	-0,8%
EL9300	134	165,0	-31,0	-23,1%
EL9700	189	190,0	-1,0	-0,5%
EL10300	177	232,6	-55,6	-31,4%
EL10700	260	260,7	-0,7	-0,3%

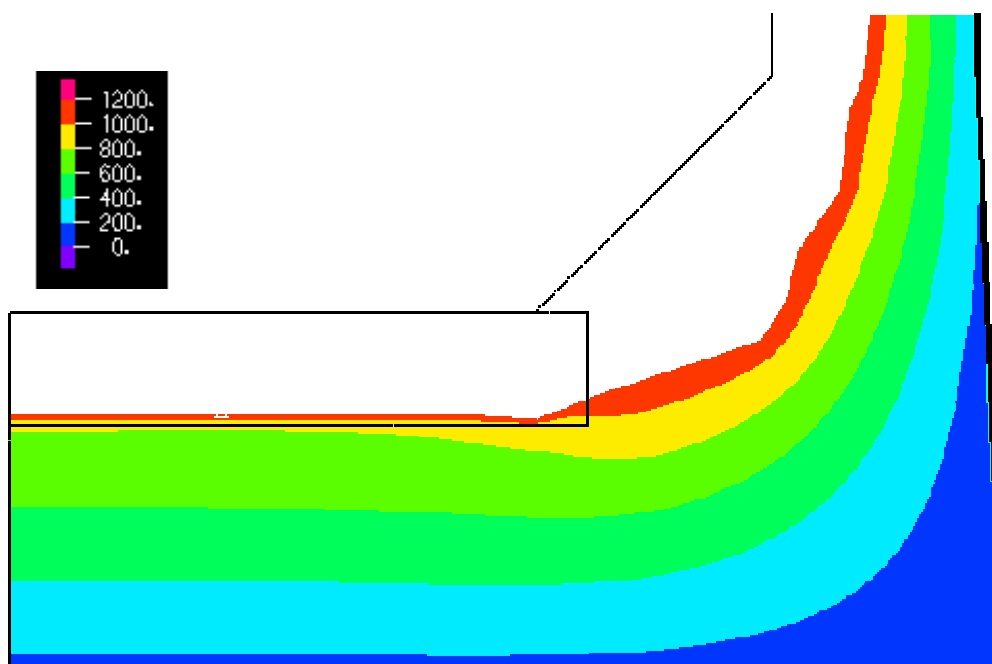


Figura 5.19: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 1 no ano de 2000.

Tabela V.4: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 1 do ano de 2000.

FG1 - 2000				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	422	422,7	-0,7	-0,2%
B 29	425	425,1	-0,1	0,0%
B 24	280	298,3	-18,3	-6,5%
EL7790	92	91,7	0,3	0,3%
EL8350	92	116,3	-24,3	-26,5%
EL8700	139	139,1	-0,1	-0,1%
EL9300	175	199,7	-24,7	-14,1%
EL9700	229	228,9	0,1	0,1%
EL10300	250	260,6	-10,6	-4,2%
EL10700	279	277,8	1,2	0,4%

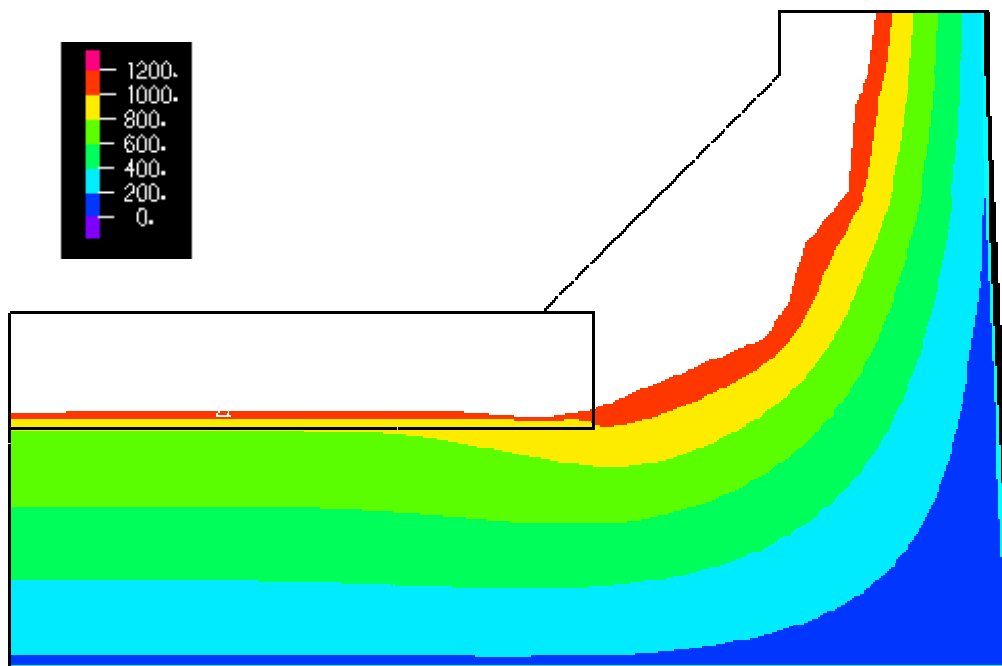


Figura 5.20: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 1 no ano de 2001.

Tabela V.5: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 1 do ano de 2001.

FG1 - 2001				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	386	386,2	-0,2	-0,1%
B 29	425	426,1	-1,1	-0,3%
B 24	275	271,7	3,3	1,2%
EL7790	83	82,9	0,1	0,1%
EL8350	94	104,5	-10,5	-11,2%
EL8700	126	126,3	-0,3	-0,3%
EL9300	161	189,0	-28,0	-17,4%
EL9700	222	221,9	0,1	0,0%
EL10300	170	251,5	-81,5	-48,0%
EL10700	264	264,3	-0,3	-0,1%

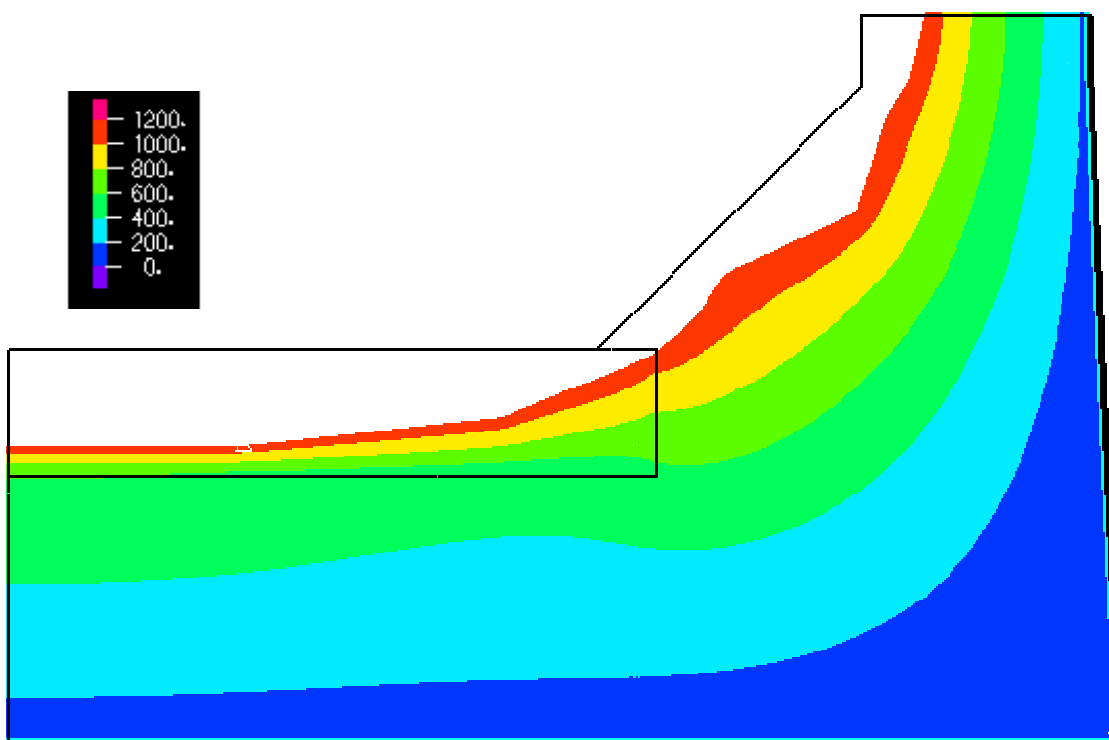


Figura 5.21: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 2 no ano de 1997.

Tabela V.6: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 2 do ano de 1997.

FG2 - 1997				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	309	309,5	-0,5	-0,2%
B 39	264	263,7	0,3	0,1%
B 40	187	187,3	-0,3	-0,2%
EL7790	67	66,5	0,5	0,7%
EL8350	77	82,1	-5,1	-6,6%
EL8700	94	97,3	-3,3	-3,6%
EL9300	97	139,8	-42,8	-44,1%
EL9700	163	162,9	0,1	0,0%
EL10300	160	190,1	-30,1	-18,8%
EL10700	202	203,6	-1,6	-0,8%

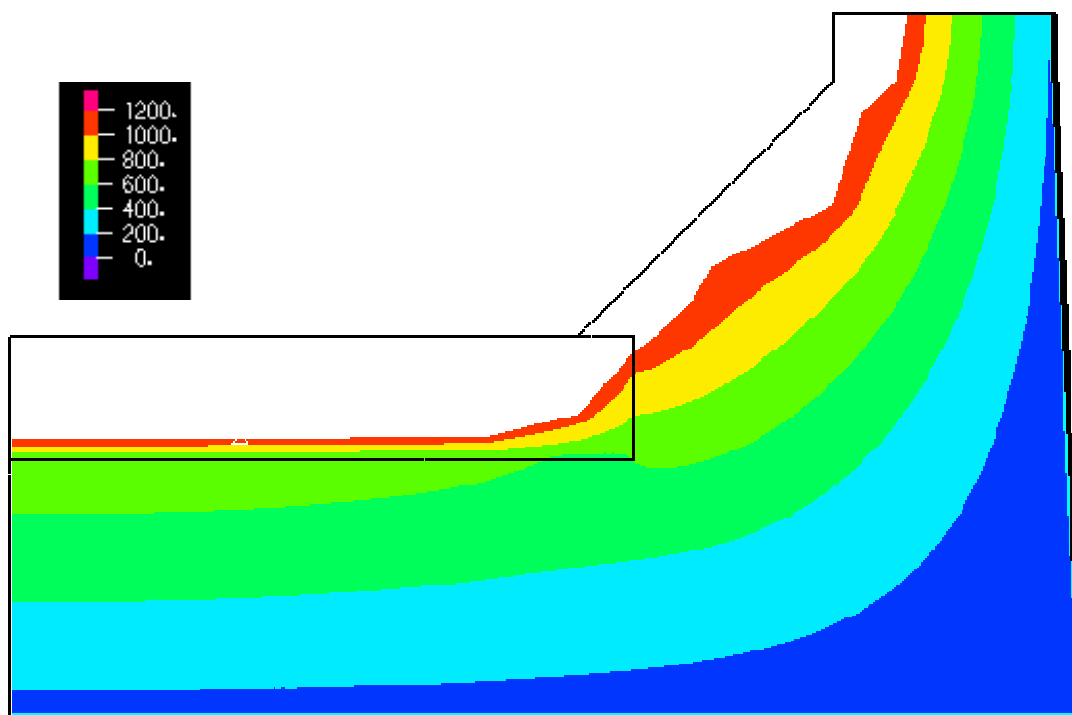


Figura 5.22: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 2 no ano de 1998.

Tabela V.7: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 2 do ano de 1998.

FG2 - 1998				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	376	376,3	-0,3	-0,1%
B 39	315	314,3	0,7	0,2%
B 40	199	199,4	-0,4	-0,2%
EL7790	68	68,2	-0,2	-0,3%
EL8350	76	84,1	-8,1	-10,6%
EL8700	97	99,6	-2,6	-2,7%
EL9300	99	143,6	-44,6	-45,0%
EL9700	169	168,5	0,5	0,3%
EL10300	165	200,9	-35,9	-21,7%
EL10700	218	218,0	0,0	0,0%

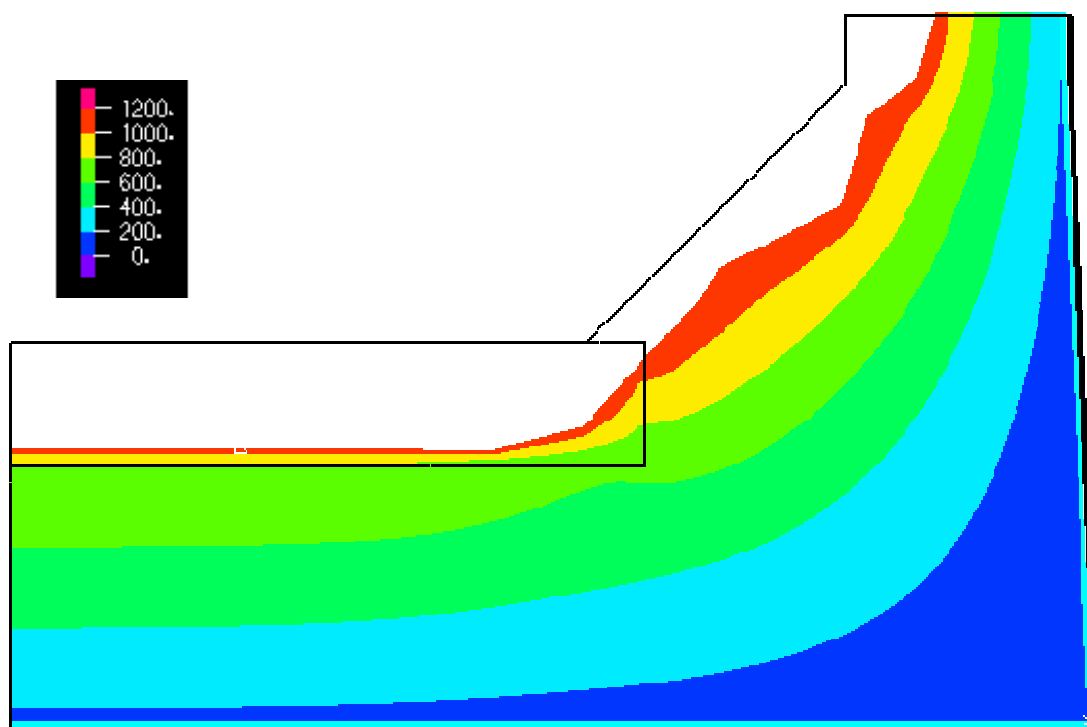


Figura 5.23: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 2 no ano de 1999.

Tabela V.8: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 2 do ano de 1999.

FG2 - 1999				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	423	420,9	2,1	0,5%
B 39	340	339,8	0,2	0,1%
B 40	199	198,0	1,0	0,5%
EL7790	66	66,6	-0,6	-0,9%
EL8350	78	81,1	-3,1	-4,0%
EL8700	95	95,4	-0,4	-0,4%
EL9300	103	137,1	-34,1	-33,1%
EL9700	162	163,5	-1,5	-0,9%
EL10300	159	205,9	-46,9	-29,5%
EL10700	231	231,6	-0,6	-0,3%

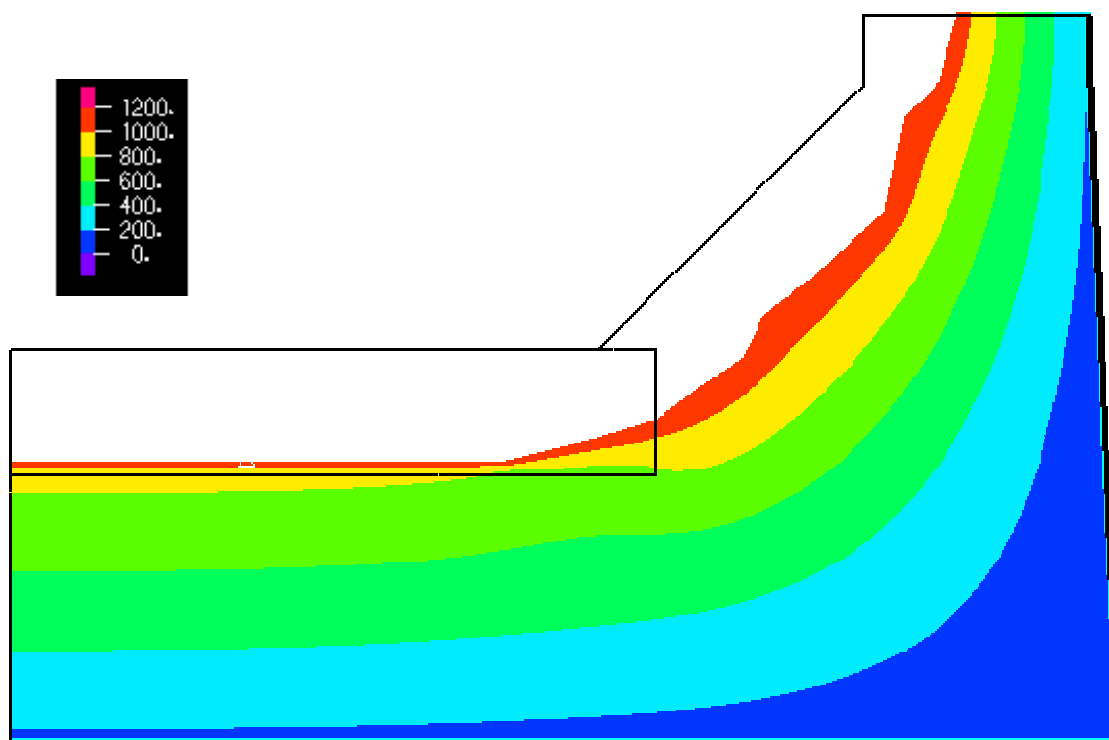


Figura 5.24: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 2 no ano de 2000.

Tabela V.9: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 2 do ano de 2000.

FG2 - 2000				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	422	422,5	-0,5	-0,1%
B 39	352	351,2	0,8	0,2%
B 40	233	232,0	1,0	0,4%
EL7790	74	74,8	-0,8	-1,1%
EL8350	84	92,7	-8,7	-10,3%
EL8700	105	109,9	-4,9	-4,7%
EL9300	121	157,9	-36,9	-30,5%
EL9700	184	184,1	-0,1	0,0%
EL10300	183	218,5	-35,5	-19,4%
EL10700	238	238,4	-0,4	-0,2%

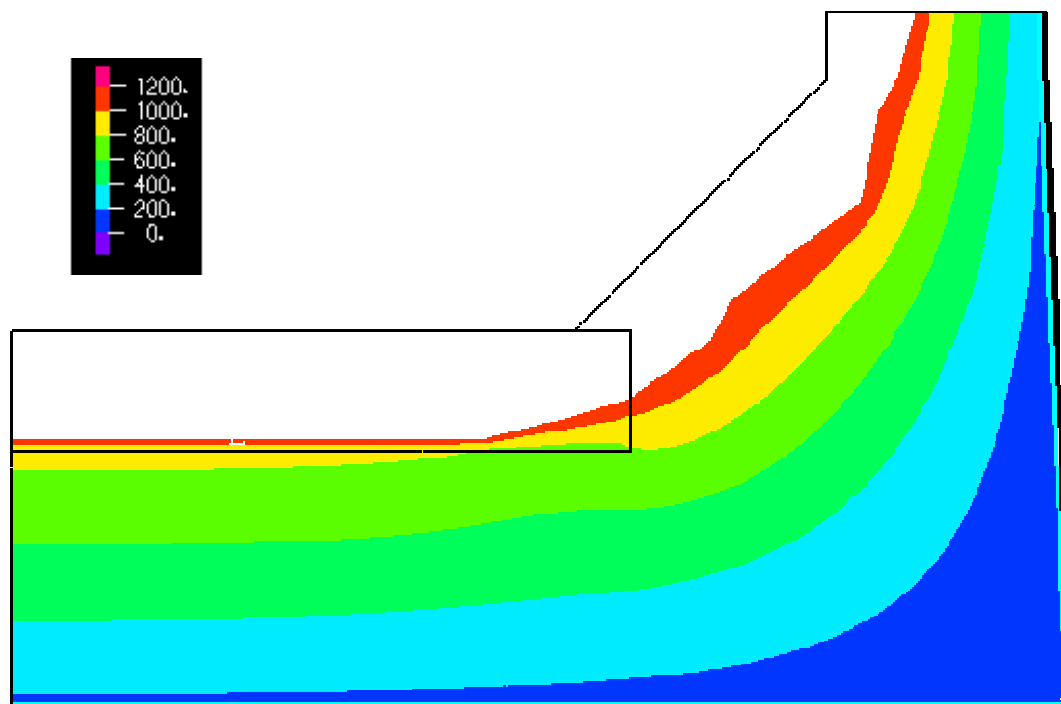


Figura 5.25: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 2 no ano de 2001.

Tabela V.10: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 2 do ano de 2001.

FG2 - 2001				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	386	386,5	-0,5	-0,1%
B 39	346	346,3	-0,3	-0,1%
B 40	232	232,4	-0,4	-0,2%
EL7790	75	75,5	-0,5	-0,7%
EL8350	90	94,1	-4,1	-4,6%
EL8700	114	112,4	1,6	1,4%
EL9300	133	163,4	-30,4	-22,9%
EL9700	191	190,9	0,1	0,0%
EL10300	185	223,5	-38,5	-20,8%
EL10700	241	240,9	0,1	0,0%

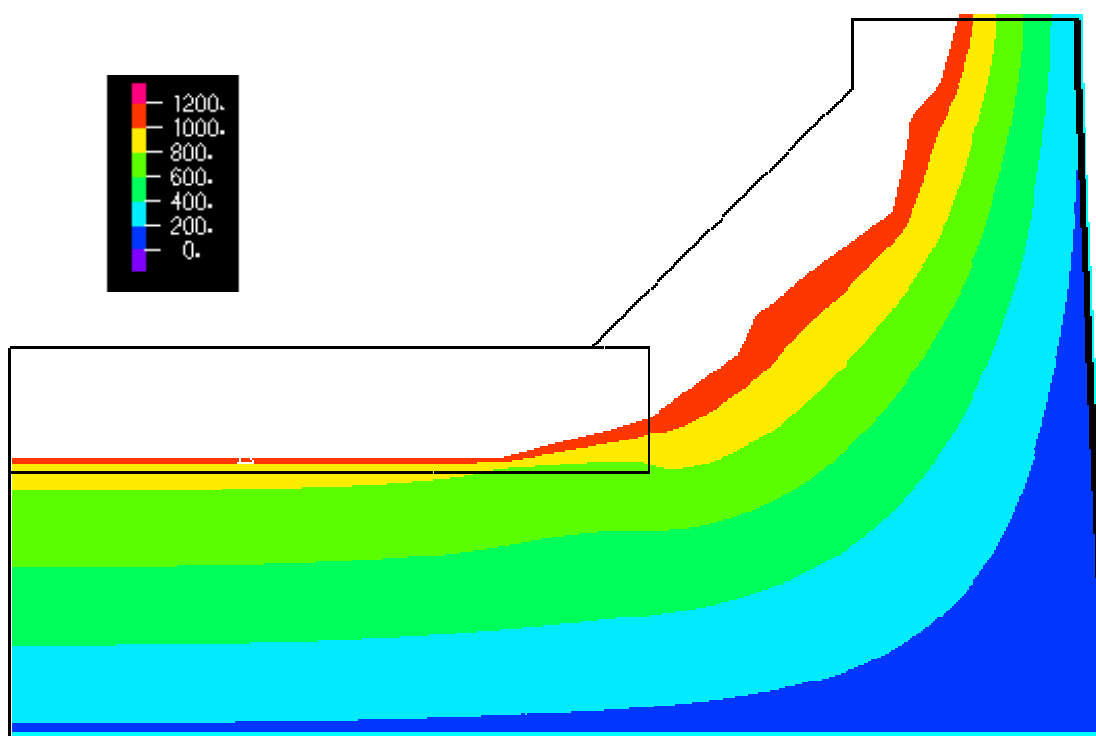


Figura 5.26: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 2 no ano de 2002.

Tabela V.11: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 2 do ano de 2002.

FG2 - 2002				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	375	373,9	1,1	0,3%
B 39	338	339,3	-1,3	-0,4%
B 40	227	227,7	-0,7	-0,3%
EL7790	72	73,8	-1,8	-2,5%
EL8350	113	91,1	21,9	19,4%
EL8700	107	108,0	-1,0	-0,9%
EL9300	164	155,8	8,2	5,0%
EL9700	183	184,1	-1,1	-0,6%
EL10300	169	226,1	-57,1	-33,8%
EL10700	251	251,5	-0,5	-0,2%

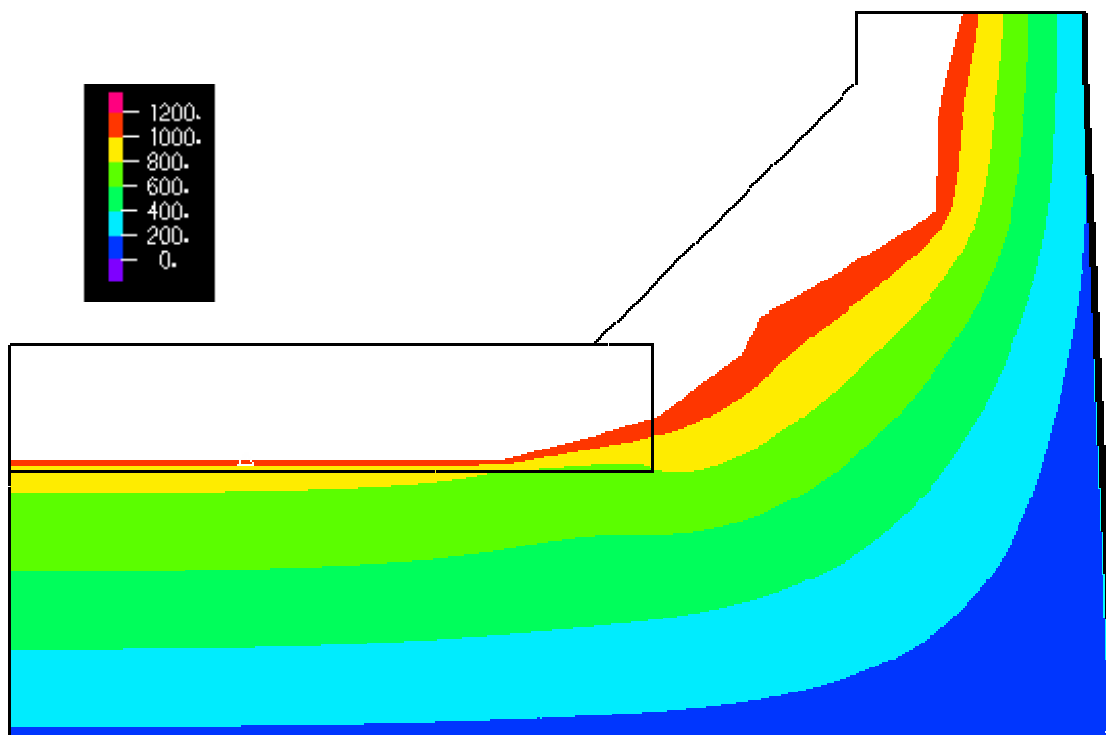


Figura 5.27: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 2 no ano de 2005.

Tabela V.12: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 2 do ano de 2005.

FG2 - 2005				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	355	355,3	-0,7	-0,2%
B 39	291	291,4	-0,8	-0,3%
B 40	209	210,3	-1,3	-0,6%
EL7790	72	74,4	-2,4	-3,4%
EL8350	90	95,9	-5,6	-6,2%
EL8700	81	118,0	-36,5	-44,8%
EL9300	146	181,2	-35,2	-24,1%
EL9700	216	214,6	1,4	0,6%
EL10300	231	239,3	-8,7	-3,8%
EL10700	247	245,7	0,9	0,4%

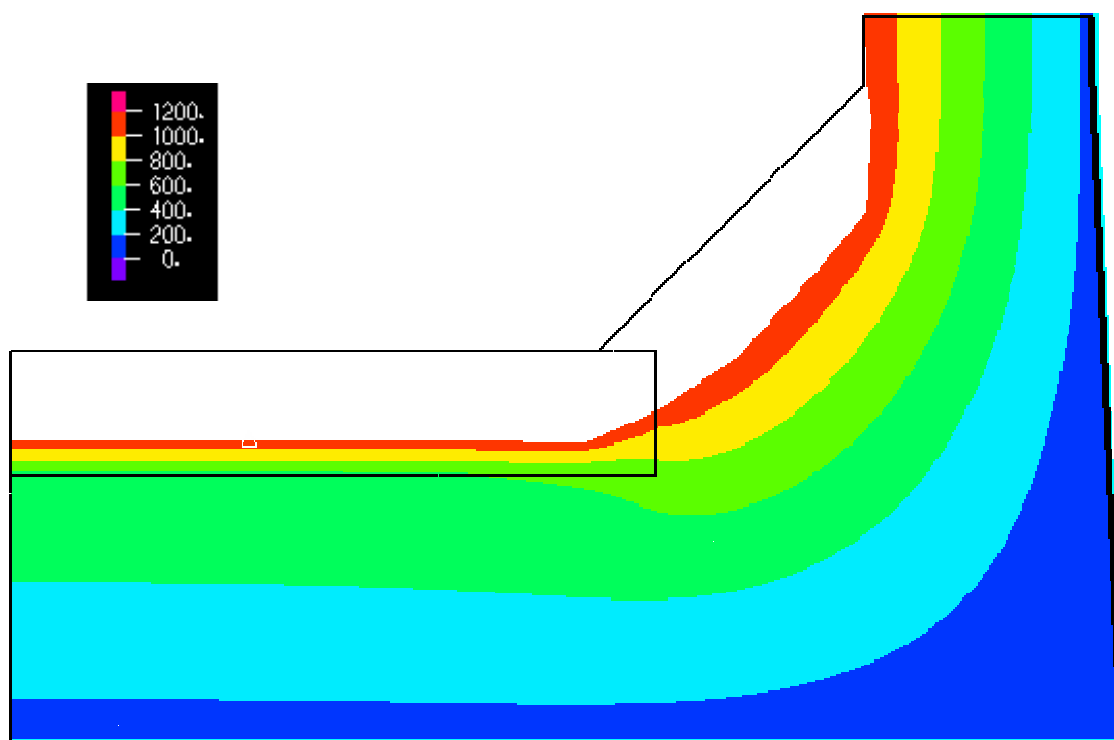


Figura 5.28: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 3 no ano de 1997.

Tabela V.13: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 3 do ano de 1997.

FG3 - 1997				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	309	308,0	1,0	0,3%
B 48	310	310,1	-0,1	0,0%
B 47	316	316,1	-0,1	0,0%
B 46	326	322,5	3,5	1,1%
B 45	279	282,5	-3,5	-1,3%
EL7790	72	71,7	0,3	0,4%
EL8350	77	87,5	-10,5	-13,7%
EL8700	101	102,1	-1,1	-1,1%
EL9300	97	139,8	-42,8	-44,1%
EL9700	156	155,4	0,6	0,4%
EL10300	161	167,0	-6,0	-3,8%
EL10700	172	171,5	0,5	0,3%

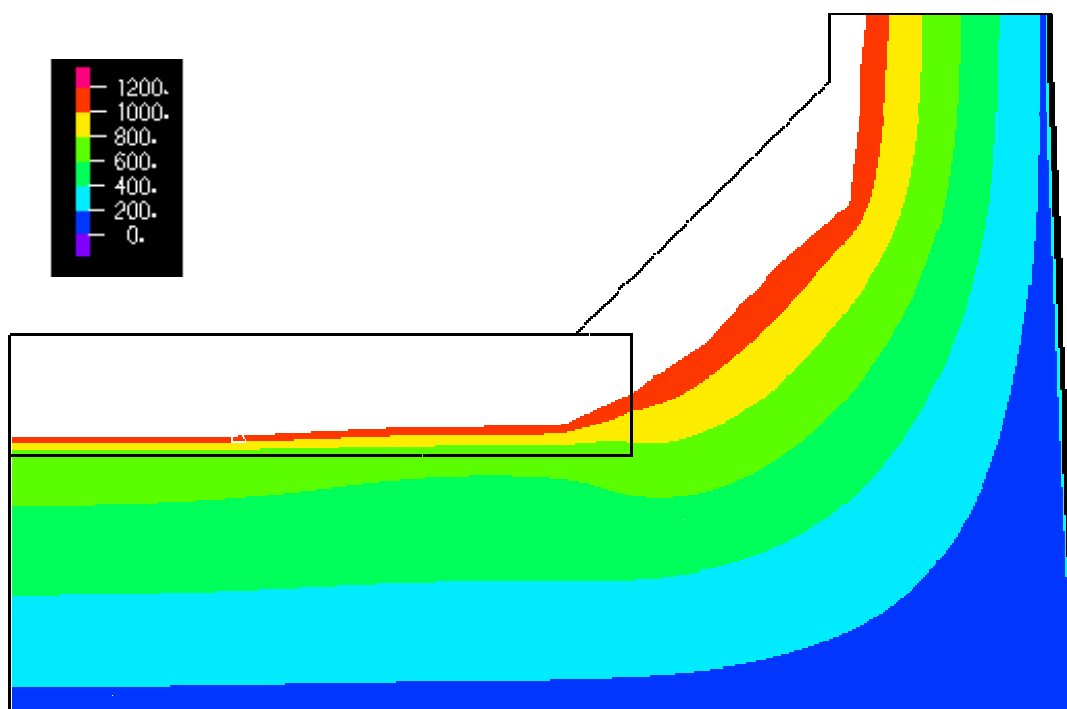


Figura 5.29: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 3 no ano de 1998.

Tabela V.14: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 3 do ano de 1998.

FG3 - 1998				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	376	376,3	-0,3	-0,1%
B 48	375	373,2	1,8	0,5%
B 47	373	375,0	-2,0	-0,5%
B 46	364	364,3	-0,3	-0,1%
B 45	296	300,3	-4,3	-1,4%
EL7790	73	73,8	-0,8	-1,1%
EL8350	76	90,8	-14,8	-19,5%
EL8700	106	107,0	-1,0	-0,9%
EL9300	96	150,2	-54,2	-56,5%
EL9700	170	170,1	-0,1	-0,1%
EL10300	172	187,4	-15,4	-8,9%
EL10700	194	194,4	-0,4	-0,2%

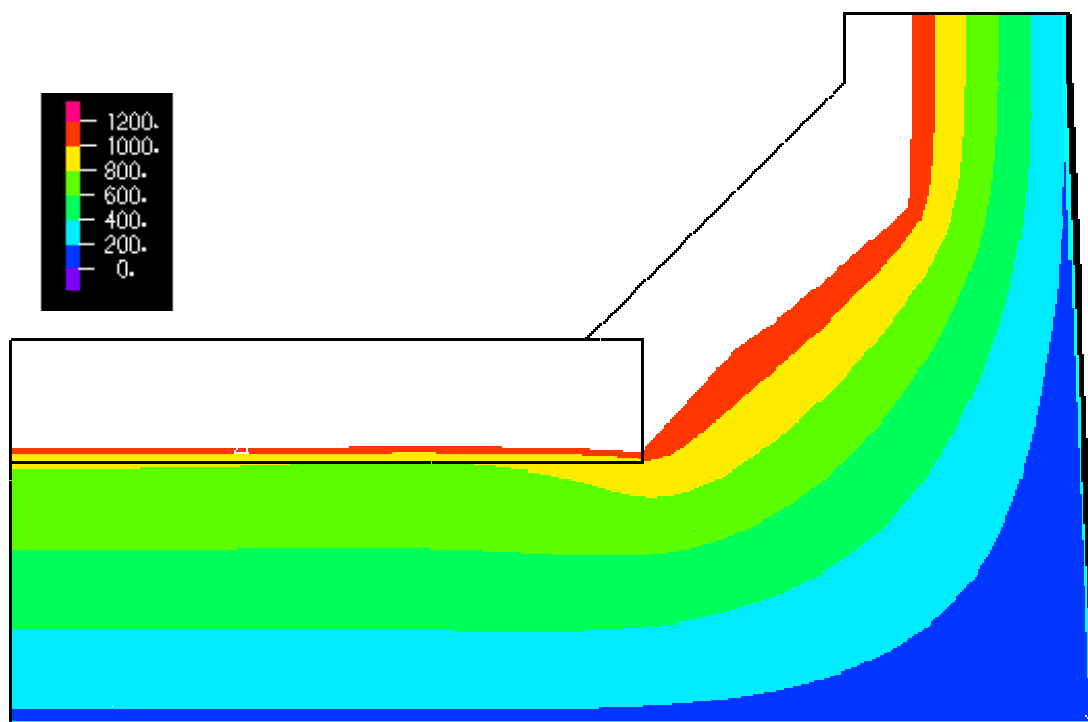


Figura 5.30: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 3 no ano de 1999.

Tabela V.15: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 3 do ano de 1999.

FG3 - 1999				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	423	423,2	-0,2	0,0%
B 48	419	421,3	-2,3	-0,5%
B 47	424	423,4	0,6	0,1%
B 46	425	423,6	1,4	0,3%
B 45	352	351,5	0,5	0,2%
EL7790	82	81,7	0,3	0,4%
EL8350	78	102,5	-24,5	-31,4%
EL8700	123	123,0	0,0	0,0%
EL9300	103	180,1	-77,1	-74,9%
EL9700	207	207,8	-0,8	-0,4%
EL10300	196	229,0	-33,0	-16,8%
EL10700	235	235,9	-0,9	-0,4%

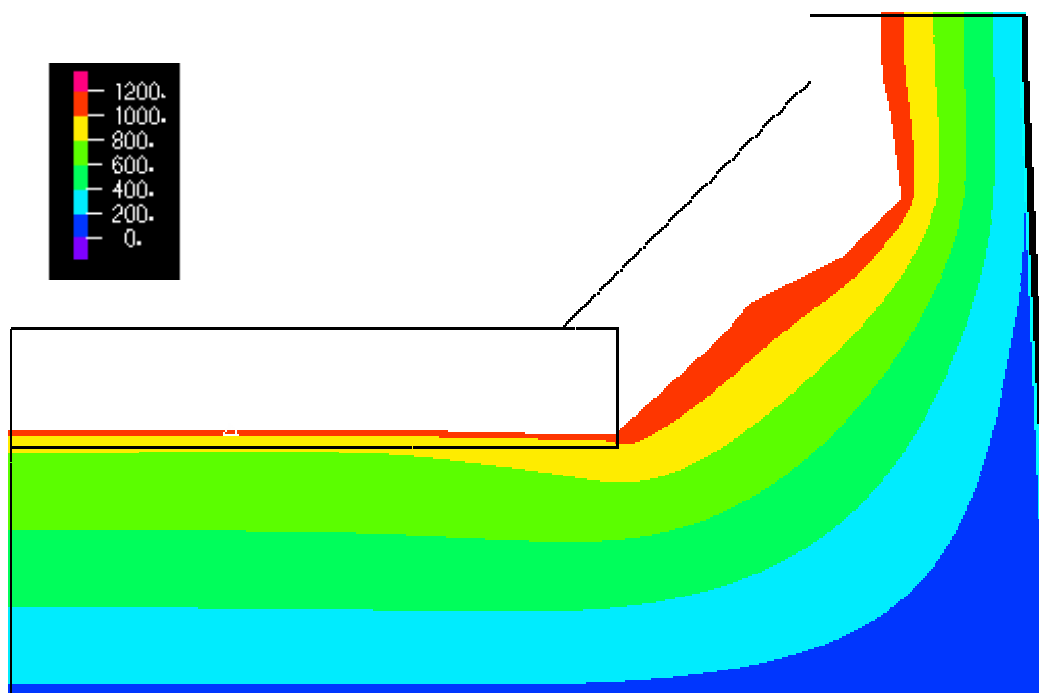


Figura 5.31: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 3 no ano de 2000.

Tabela V.16: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 3 do ano de 2000.

FG3 - 2000				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	422	422,3	-0,3	-0,1%
B 48	422	423,6	-1,6	-0,4%
B 47	414	428,0	-14,0	-3,4%
B 46	425	420,1	4,9	1,1%
B 45	351	352,3	-1,3	-0,4%
EL7790	85	85,0	0,0	-0,1%
EL8350	84	109,4	-25,4	-30,2%
EL8700	135	134,2	0,8	0,6%
EL9300	120	204,9	-84,9	-70,7%
EL9700	239	238,6	0,4	0,2%
EL10300	211	253,4	-42,4	-20,1%
EL10700	252	253,9	-1,9	-0,8%

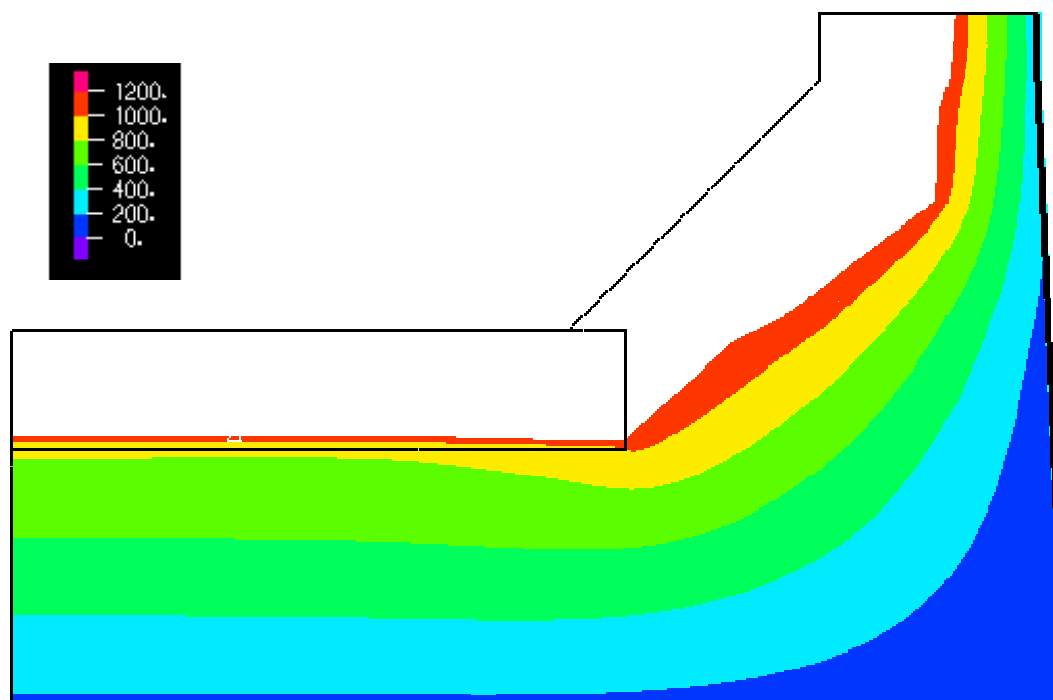


Figura 5.32: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 3 no ano de 2002.

Tabela V.17: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 3 do ano de 2002.

FG3 - 2002				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	375	372,8	2,2	0,6%
B 48	363	373,2	-10,2	-2,8%
B 47	371	374,2	-3,2	-0,9%
B 46	377	373,5	3,5	0,9%
B 45	335	330,2	4,8	1,4%
EL7790	86	85,9	0,1	0,1%
EL8350	92	112,8	-20,8	-22,7%
EL8700	141	141,4	-0,4	-0,3%
EL9300	147	230,0	-83,0	-56,5%
EL9700	285	284,8	0,2	0,1%
EL10300	253	333,4	-80,4	-31,8%
EL10700	357	356,9	0,1	0,0%

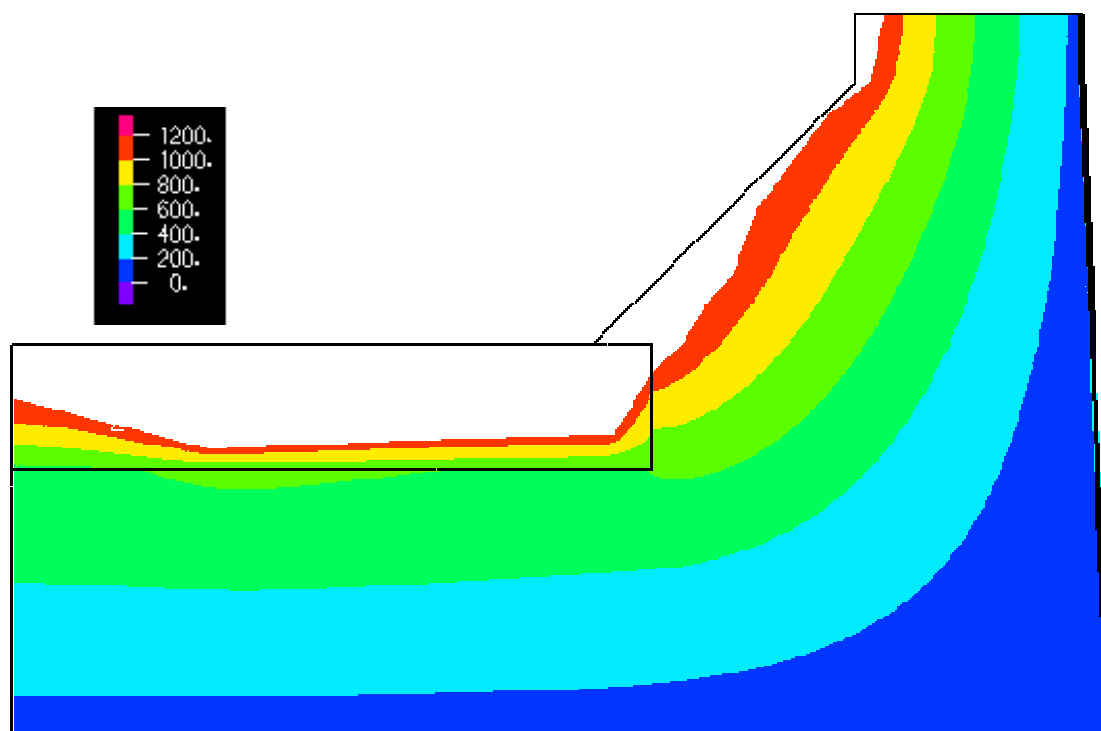


Figura 5.33: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 4 no ano de 1997.

Tabela V.18: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 4 do ano de 1997.

FG4 - 1997				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	309	318,7	-9,7	-3,2%
B 48	323	324,7	-1,7	-0,5%
B 47	315	316,8	-1,8	-0,6%
B 46	302	297,4	4,6	1,5%
B 45	242	242,8	-0,8	-0,3%
EL7790	65	63,8	1,2	1,8%
EL8350	75	76,3	-1,3	-1,8%
EL8700	87	88,1	-1,1	-1,2%
EL9300	99	120,3	-21,3	-21,5%
EL9700	137	136,9	0,0	0,0%
EL10300	132	157,0	-25,0	-18,9%
EL10700	199	167,3	31,7	15,9%

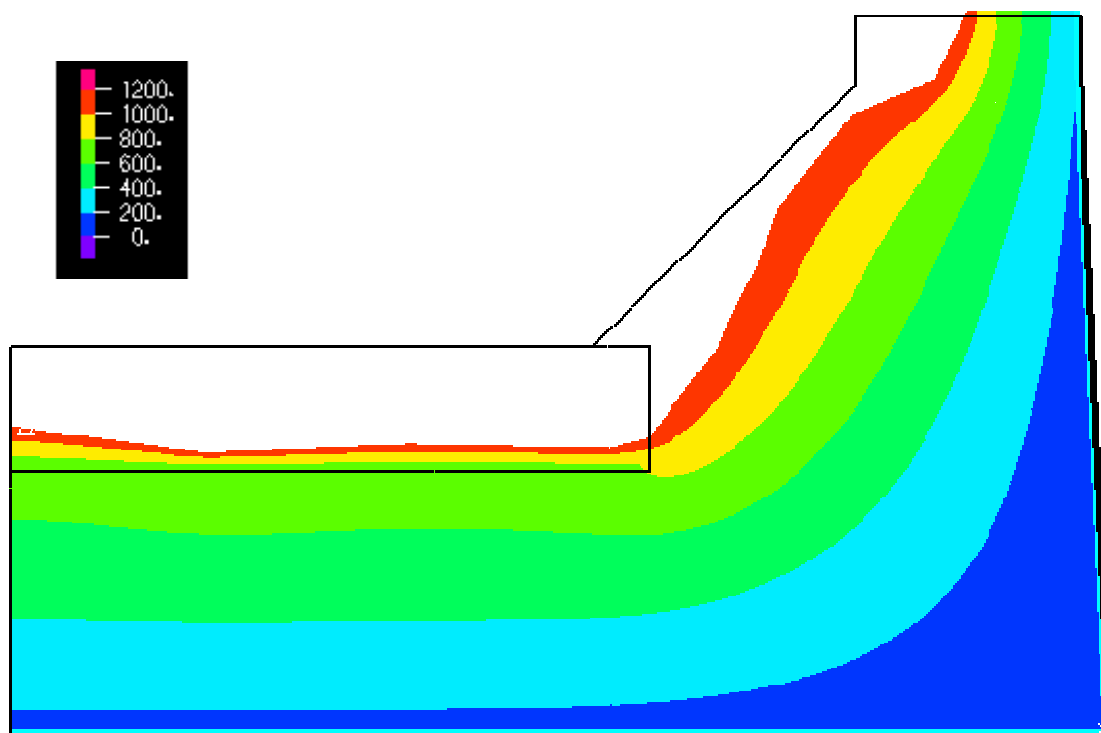


Figura 5.34: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 4 no ano de 1998.

Tabela V.19: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 4 do ano de 1998.

FG4 - 1998				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	376	384,4	-8,4	-2,2%
B 48	392	390,2	1,8	0,5%
B 47	386	386,8	-0,8	-0,2%
B 46	379	378,0	1,0	0,3%
B 45	298	302,4	-4,4	-1,5%
EL7790	71	71,2	-0,2	-0,4%
EL8350	73	86,0	-13,0	-17,9%
EL8700	99	100,3	-1,3	-1,4%
EL9300	111	142,4	-31,4	-28,3%
EL9700	170	169,8	0,2	0,1%
EL10300	168	219,2	-51,2	-30,5%
EL10700	253	253,3	0,0	0,0%

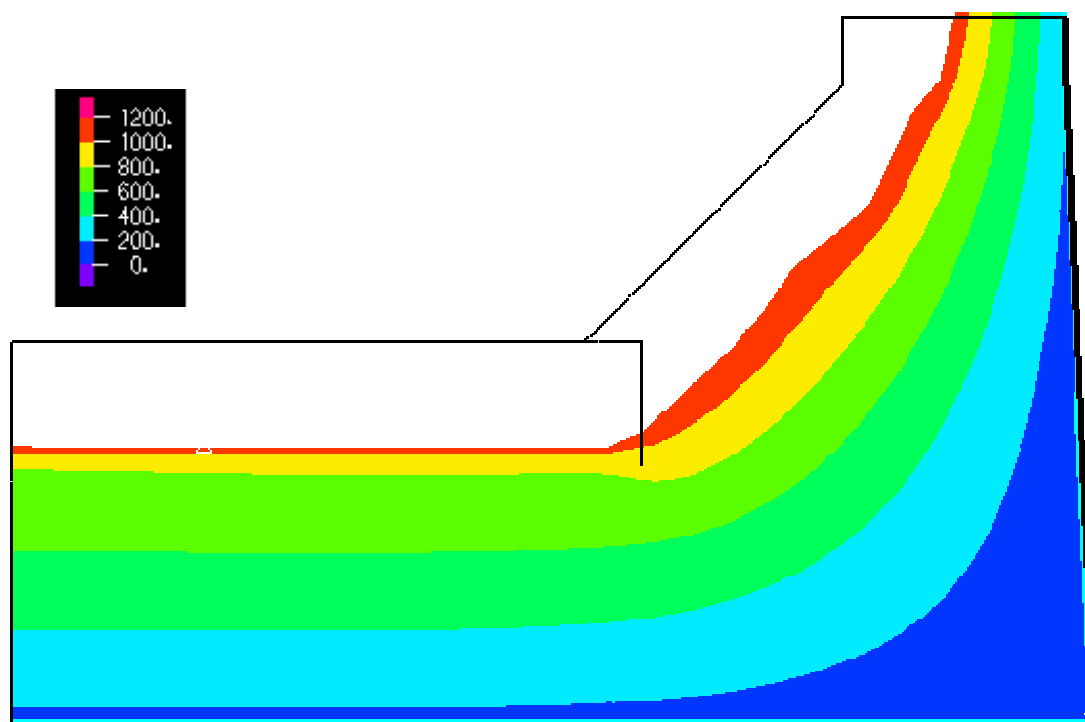


Figura 5.35: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 4 no ano de 1999.

Tabela V.20: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 4 do ano de 1999.

FG4 - 1999				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	423	421,4	1,6	0,4%
B 48	417	422,9	-5,9	-1,4%
B 47	423	422,9	0,1	0,0%
B 46	395	395,1	-0,1	0,0%
B 45	316	314,6	1,4	0,5%
EL7790	76	76,5	-0,5	-0,7%
EL8350	78	95,1	-17,1	-21,9%
EL8700	110	113,3	-3,3	-3,0%
EL9300	135	165,8	-30,8	-22,8%
EL9700	197	197,4	0,0	0,0%
EL10300	165	244,4	-79,4	-48,1%
EL10700	273	272,5	0,0	0,0%

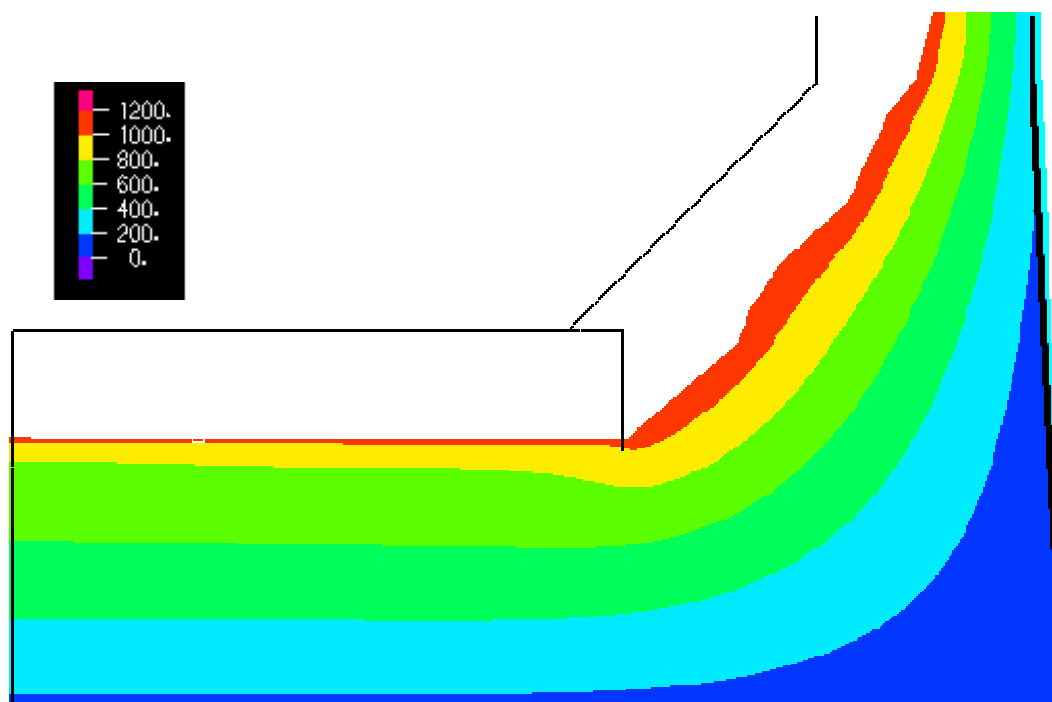


Figura 5.36: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 4 no ano de 2000.

Tabela V.21: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 4 do ano de 2000.

FG4 - 2000				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	422	423,4	-1,4	-0,3%
B 48	425	425,0	0,0	0,0%
B 47	425	426,0	-1,0	-0,2%
B 46	425	425,1	-0,1	0,0%
B 45	347	346,0	1,0	0,3%
EL7790	82	79,5	2,5	3,1%
EL8350	90	97,9	-7,9	-8,8%
EL8700	117	115,8	1,2	1,1%
EL9300	159	166,7	-7,7	-4,8%
EL9700	196	196,3	0,0	0,0%
EL10300	250	239,5	10,5	4,2%
EL10700	264	264,4	0,0	0,0%

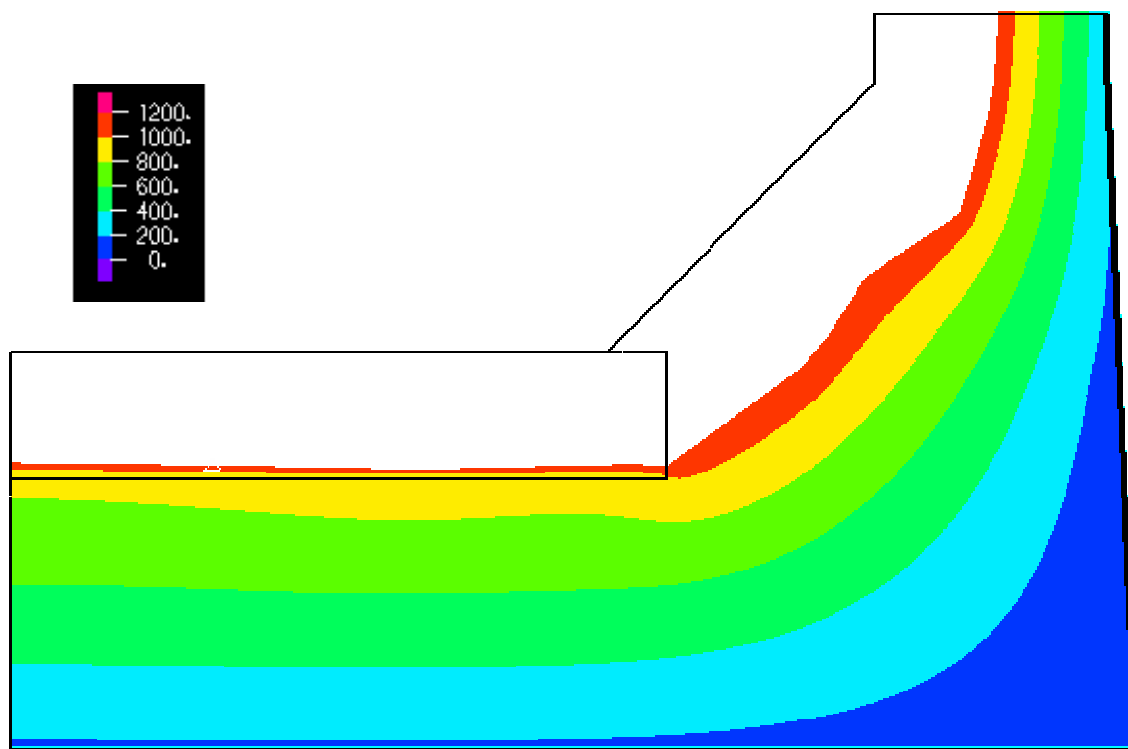


Figura 5.37: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 4 no ano de 2001.

Tabela V.22: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 4 do ano de 2001.

FG4 - 2001				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	386	410,3	-24,3	-6,3%
B 48	419	431,6	-12,6	-3,0%
B 47	437	436,5	0,5	0,1%
B 46	418	408,6	9,4	2,2%
B 45	344	347,0	-3,0	-0,9%
EL7790	83	83,7	-0,7	-0,9%
EL8350	95	106,5	-11,5	-12,1%
EL8700	131	129,5	1,5	1,1%
EL9300	161	197,7	-36,7	-22,8%
EL9700	240	239,0	1,0	0,4%
EL10300	195	286,3	-91,3	-46,8%
EL10700	308	306,9	1,1	0,4%

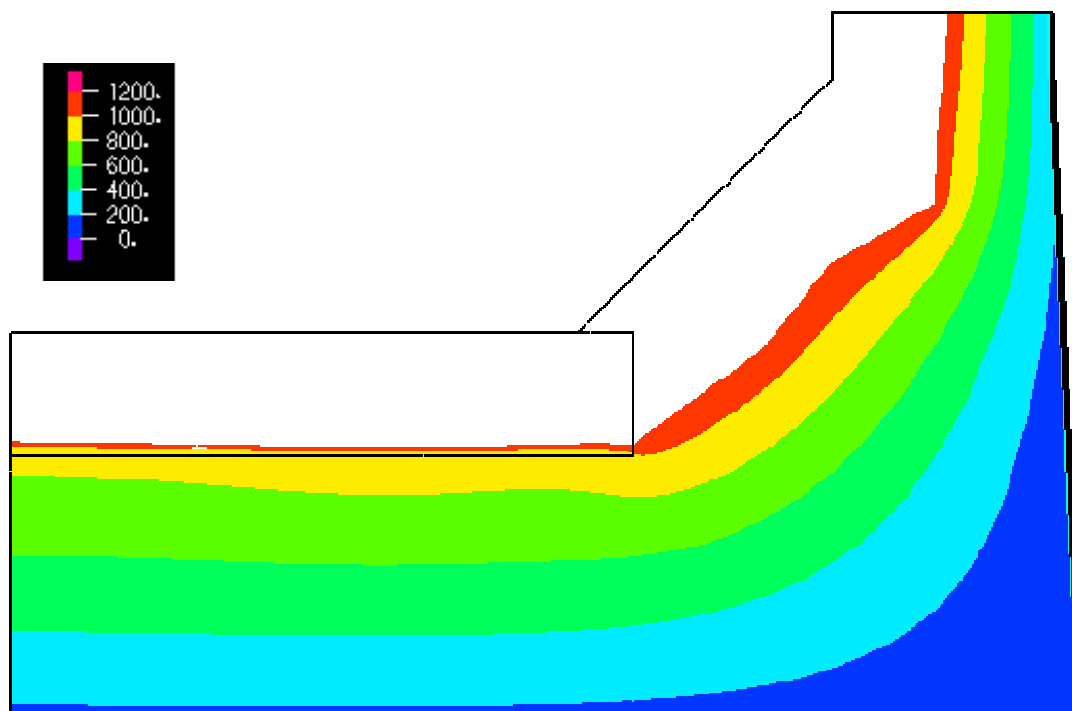


Figura 5.38: Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 4 no ano de 2002.

Tabela V.23: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção do Furo de gusa 4 do ano de 2002.

FG4 - 2002				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	375	375,4	-0,4	-0,1%
B 48	395	396,5	-1,5	-0,4%
B 47	416	416,0	0,0	0,0%
B 46	395	393,4	1,6	0,4%
B 45	315	322,5	-7,5	-2,4%
EL7790	81	81,5	-0,5	-0,6%
EL8350	113	105,3	7,7	6,8%
EL8700	130	130,4	-0,4	-0,3%
EL9300	168	205,1	-37,1	-22,1%
EL9700	246	244,4	1,6	0,7%
EL10300	195	259,2	-64,2	-32,9%
EL10700	256	255,7	0,3	0,1%

Para a discussão dos resultados fora dos furos de gusa, temos a direção 0° e 180° . O comportamento do perfil de temperatura foi bem diferente, sendo que já em 1999 todo desgaste estava estabilizado e com grande espessura residual dos blocos da parede. Para direção 180° , esta estabilização ocorreu em 1998. Basicamente somente houve um ajuste da parede para o perfil natural de líquidos do cadinho. Também observamos nestas direções que o perfil de desgaste está com eixo deslocado para o 0° . As Figuras 5.39, 5.40 e 5.41 apresentam os resultados do modelo da direção 0° para os anos de 1997, 1998 e 1999, e a Figura 5.42 apresenta os resultados do modelo da direção 180° para o ano de 1998.

O comportamento dos erros também foi diferente. Mesmo com o deslocamento de alguns termopares do eixo da direção, os erros apresentados foram bem menores. O cogumelo de proteção dos furos de gusa somado ao ciclo de abertura dos furos para retirada de líquidos provoca uma grande interferência no contato líquidos/blocos na região dos furos. Este fenômeno não existe na região fora dos furos. As Tabelas V.24, V.25 e V.26 apresentam os resultados da direção 0° para os anos de 1997, 1998 e 1999, e a Tabela V.27 apresenta o resultado na direção 180° para o ano de 1998.

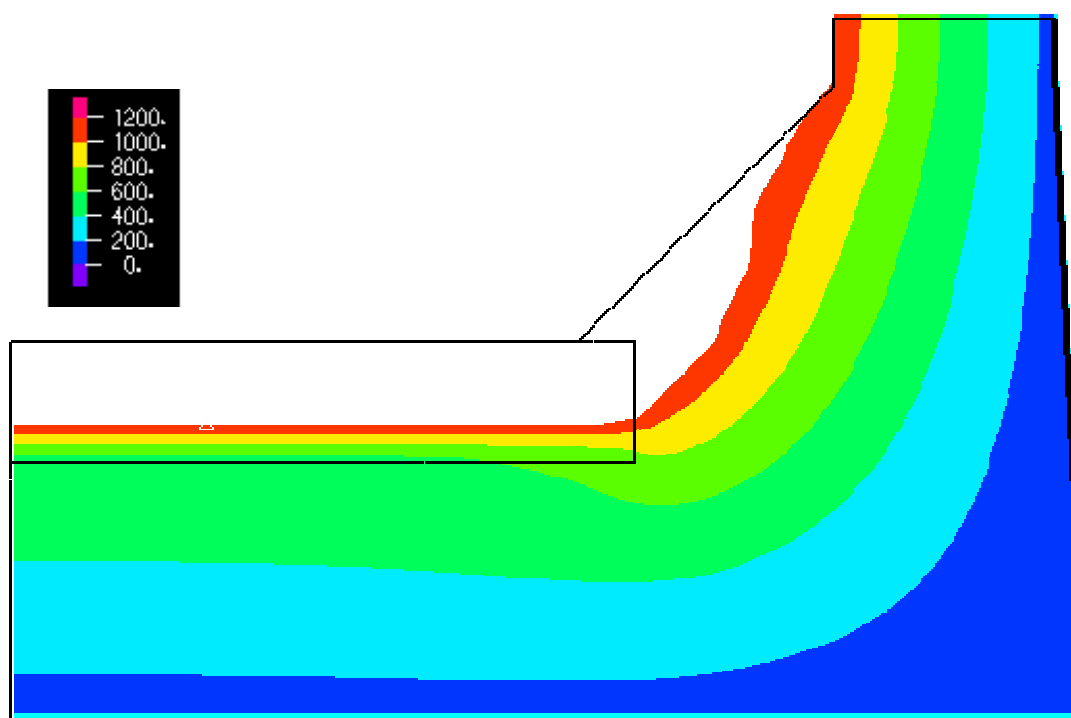


Figura 5.39: Perfil de temperatura na direção 0° no ano de 1997.

Tabela V.24: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção 0° do ano de 1997.

1997				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	309	307,4	1,6	0,5%
B 49	284	283,2	0,8	0,3%
EL7790	70	68,6	1,4	2,0%
EL8350	88	81,5	6,5	7,4%
EL8700	93	93,2	-0,2	-0,2%
EL9300	114	123,7	-9,7	-8,5%
EL9700	136	137,0	-1,0	-0,8%
EL10300	138	150,6	-12,6	-9,2%

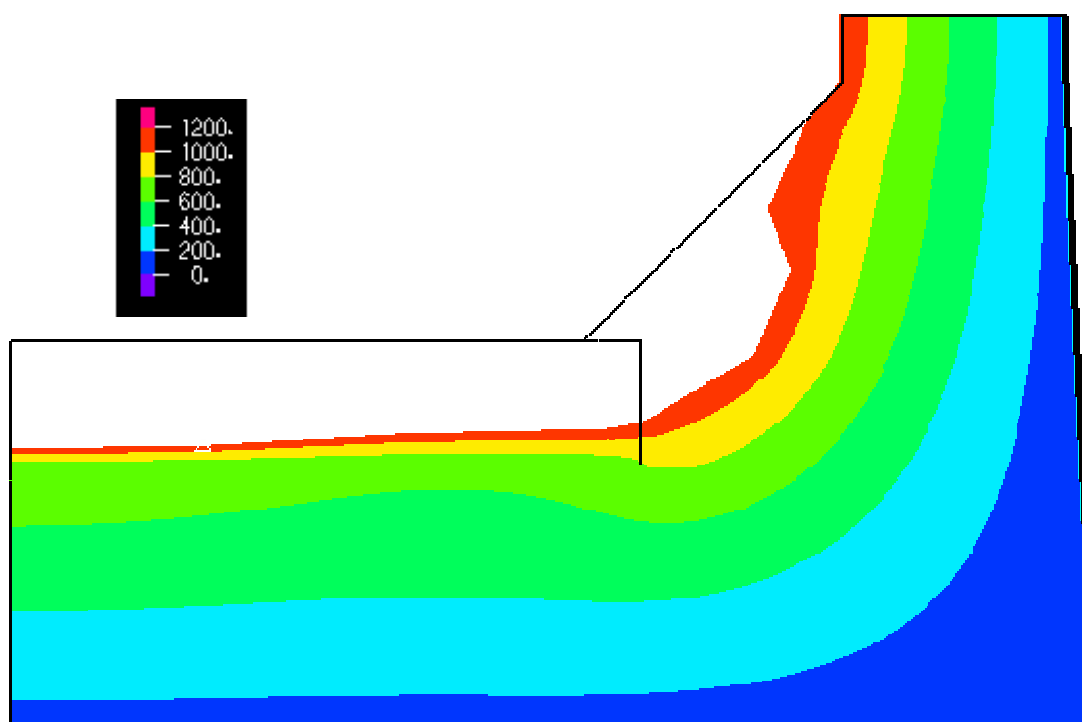


Figura 5.40: Perfil de temperatura na direção 0° no ano de 1998.

Tabela V.25: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção 0° do ano de 1998.

1998				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	376	375,6	0,4	0,1%
B 49	294	296,3	-2,3	-0,8%
EL7790	72	72,3	-0,3	-0,4%
EL8350	90	86,4	3,6	4,0%
EL8700	100	98,7	1,3	1,3%
EL9300	138	129,7	8,3	6,0%
EL9700	140	141,7	-1,7	-1,2%
EL10300	157	152,8	4,2	2,7%

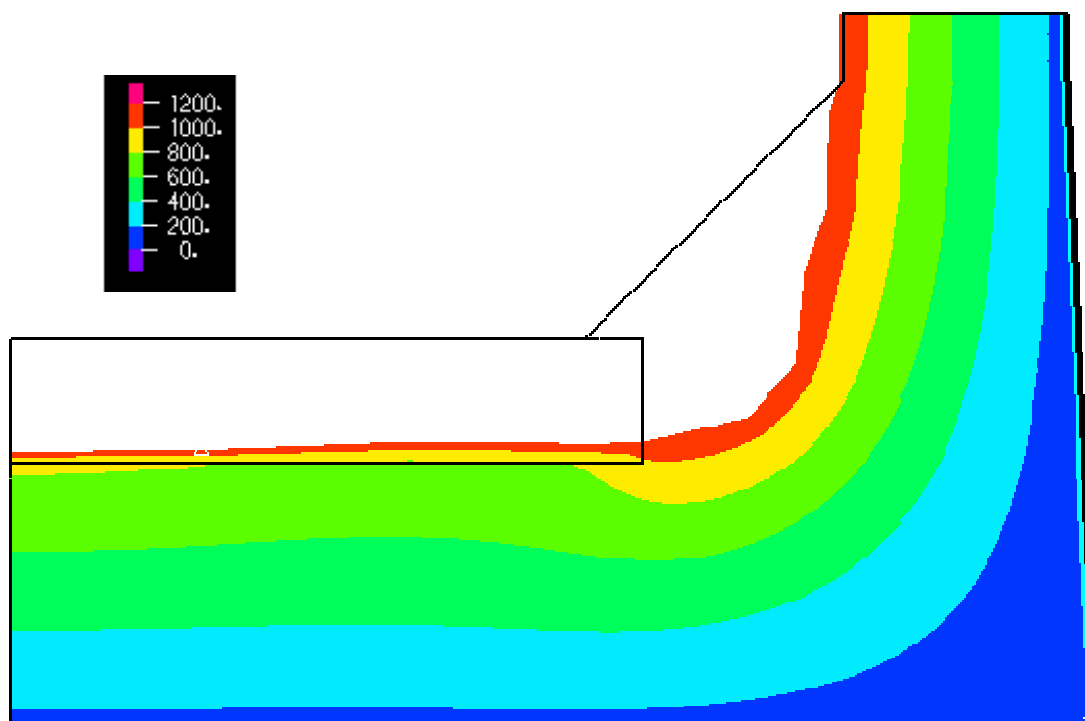


Figura 5.41: Perfil de temperatura na direção 0° no ano de 1999.

Tabela V.26: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção 0° do ano de 1999.

1999				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	423	422,9	0,1	0,0%
B 49	371	370,3	0,7	0,2%
EL7790	83	82,4	0,6	0,8%
EL8350	93	98,6	-5,6	-6,0%
EL8700	112	112,3	-0,3	-0,3%
EL9300	155	146,1	8,9	5,8%
EL9700	157	157,1	-0,1	-0,1%
EL10300	131	164,5	-33,5	-25,6%

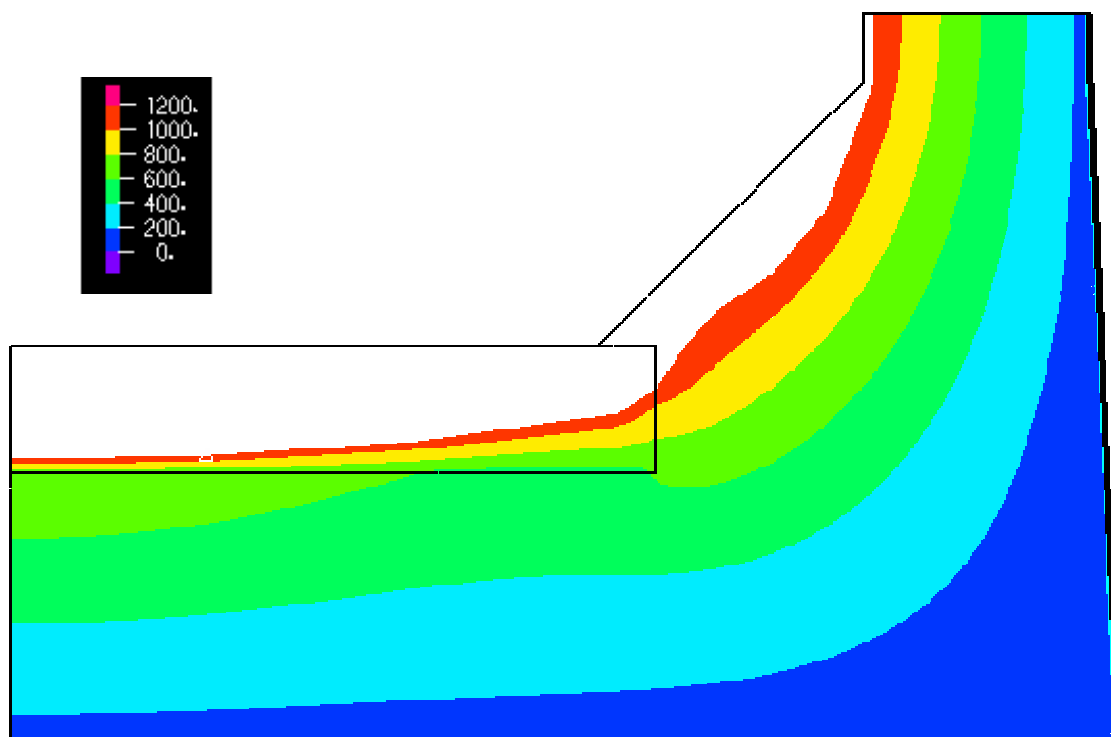


Figura 5.42: Perfil de temperatura na direção 180° no ano de 1998.

Tabela V.27: Comparação entre os valores dos termopares lidos e calculados na direção 180° do ano de 1998.

180° - 1998				
	Termopar	Modelo	ΔT	Erro
B 34	376	377,0	-1,0	-0,3%
B 35	213	215,0	-2,0	-0,9%
EL7790	68	66,9	1,1	1,6%
EL8350	76	81,0	-5,0	-6,6%
EL8700	93	94,2	-1,2	-1,3%
EL9300	137	129,6	7,4	5,4%
EL9700	147	146,3	0,7	0,5%
EL10300	157	163,0	-6,0	-3,8%

5.4- Consolidação dos resultados.

Apesar do projeto do cadinho ser simétrico e a meta é trabalhar com os mesmos procedimentos operacionais, como tempo de corrida, comprimento de furo de gusa e outros, o desgaste dos blocos de carbono não é simétrico. As Figuras 5.43, 5.44, 5.45, 5.46, 5.47 e 5.48 apresentam os resultados atuais de desgaste do furo de gusa 1, furo 2, furo 3, furo 4, direção 0° e direção 180° considerando as informações de temperatura até o final de 2005. Logicamente para comparação dos dados medidos após o encerramento da campanha e a avaliação do modelo, estes resultados serão atualizados anualmente até a data de fim de campanha. Podemos verificar que a região base com menor desgaste é a região do furo de gusa 2 e direção 180° e a de maior desgaste é a região do furo de gusa 1 e a direção 0°. Coincidentemente, são as regiões de entrada e saída respectivamente da refrigeração da soleira. Com esta informação já estamos modificando o projeto de refrigeração para reforma de 2009 possibilitando a mudança do fluxo de água da base. Quanto ao desgaste da parede o ponto de menor espessura e que provavelmente determinará o encerramento da campanha, está localizado na região do furo de gusa 3. Com esta informação já estamos trabalhando especialmente neste furo, visando o controle da evolução do desgaste. Apesar da constante injeção de massa de tamponamento para recomposição do cogumelo de proteção, as regiões onde apresentam os maiores desgastes estão localizadas nos furos de gusa. Geralmente os pontos críticos estão localizados na região ao lado dos furos devido à falta de proteção do cogumelo. A causa que pode ter levado a degradação dos furos pode estar ligada as práticas operacionais que levavam o cadinho a trabalhar com o comprimento de furo de gusa insuficiente e com muitas trincas.

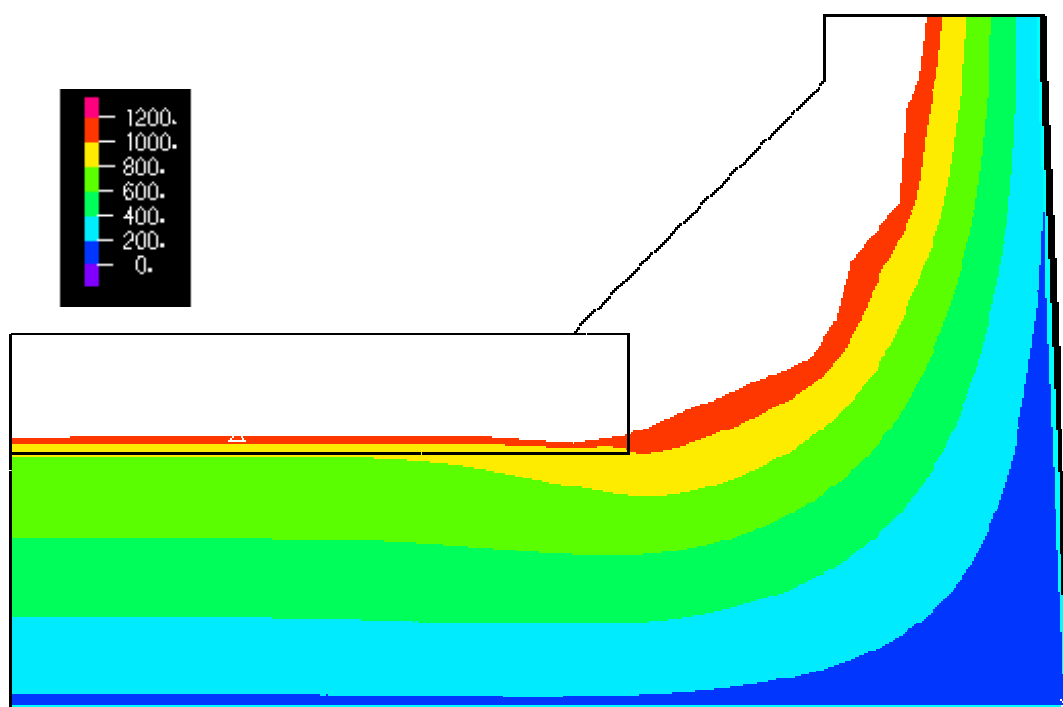


Figura 5.43: Perfil atual de desgaste na direção do furo de gusa 1.

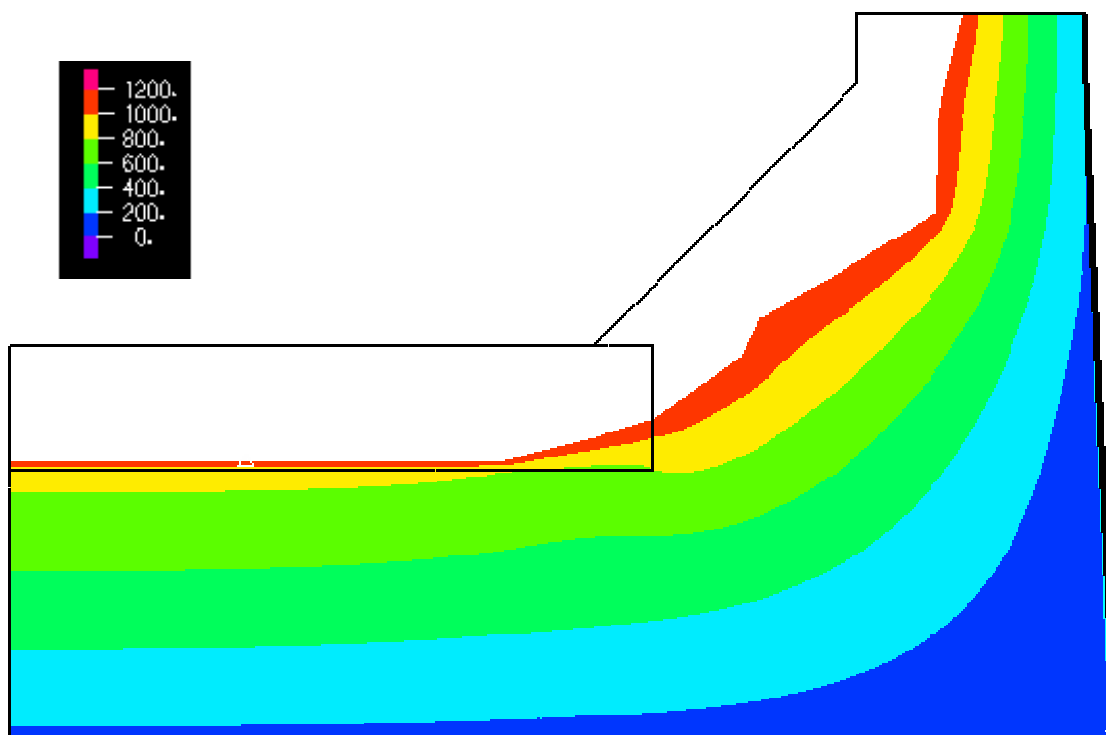


Figura 5.44: Perfil atual de desgaste na direção do furo de gusa 2.

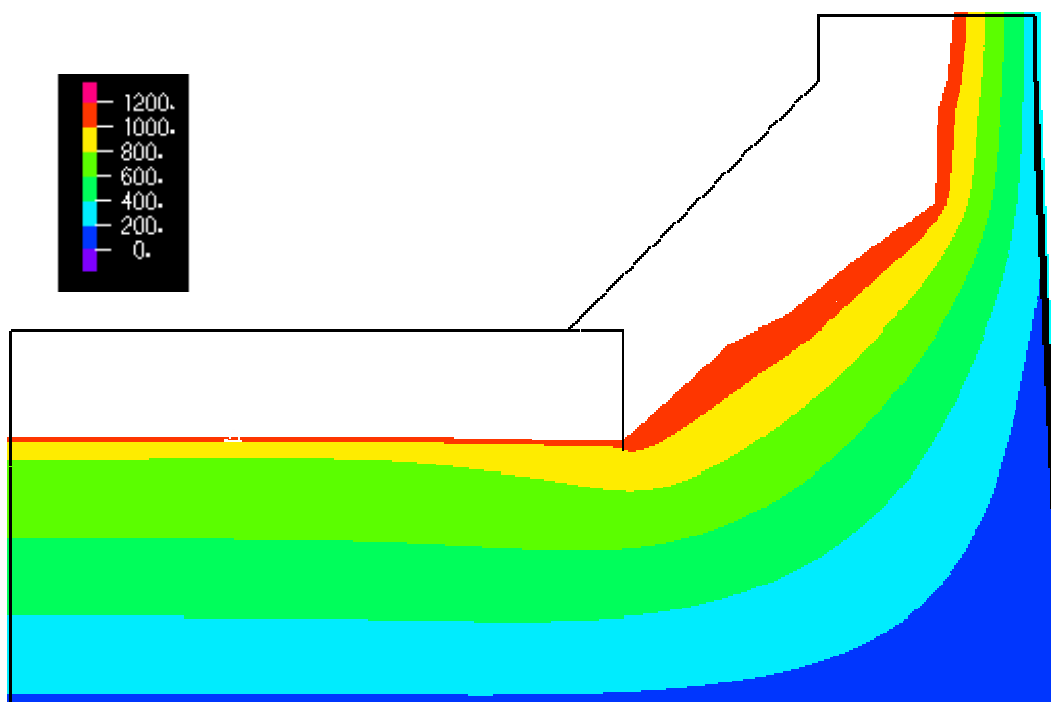


Figura 5.45: Perfil atual de desgaste na direção do furo de gusa 3.

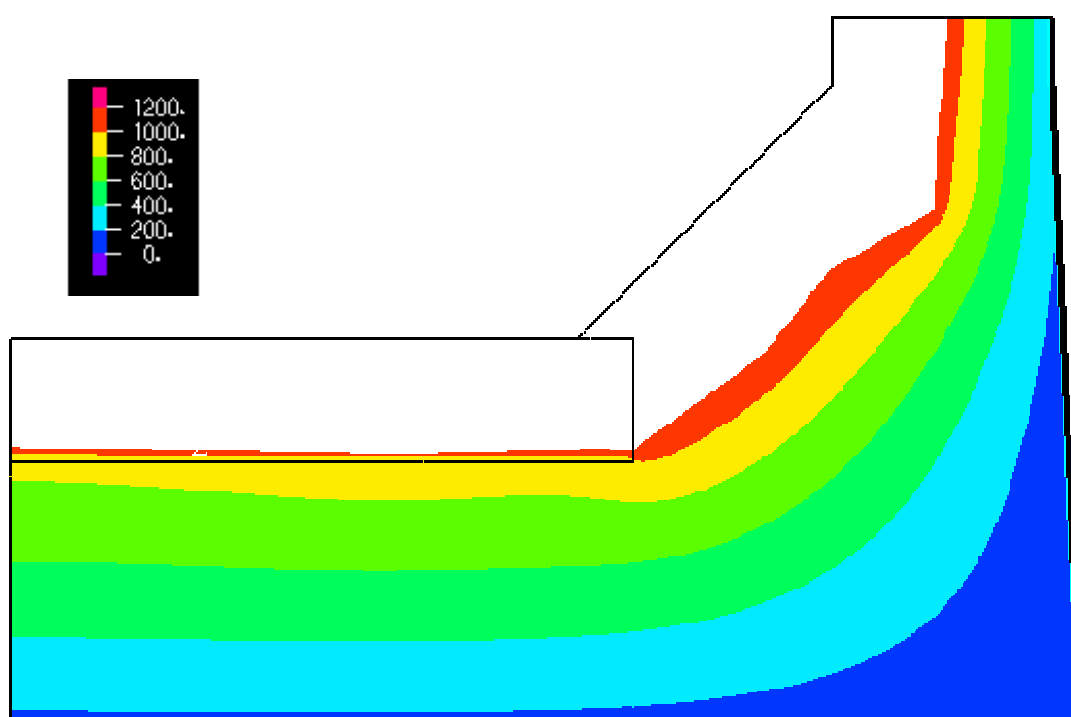


Figura 5.46: Perfil atual de desgaste na direção do furo de gusa 4.

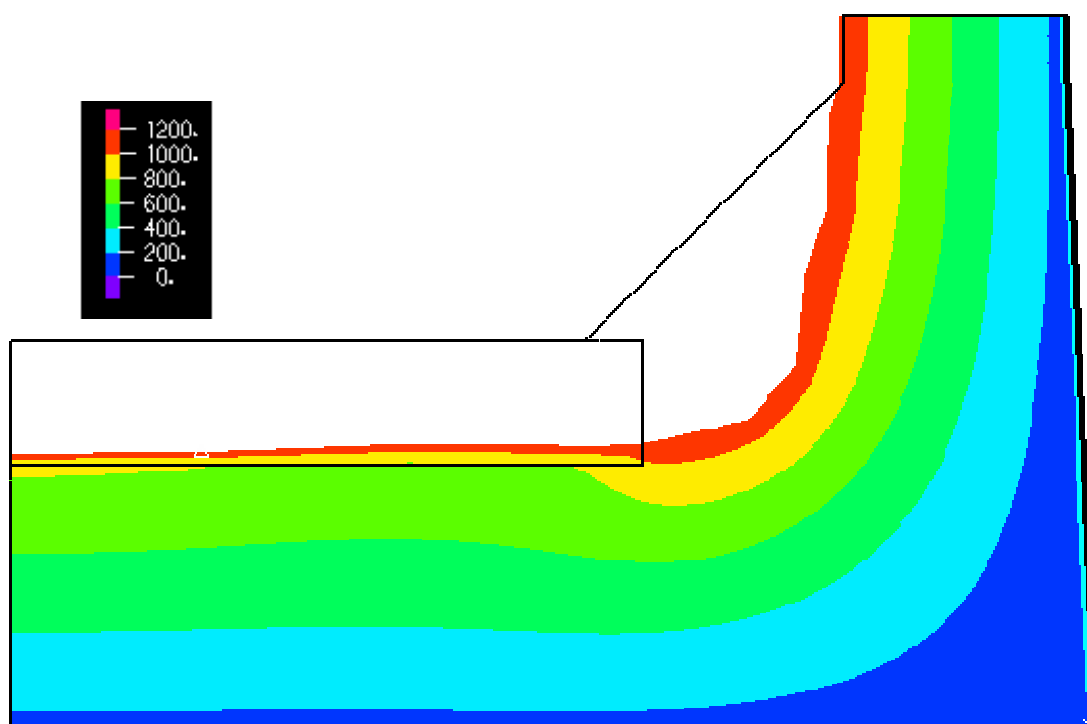


Figura 5.47: Perfil atual de desgaste na direção do 0°.

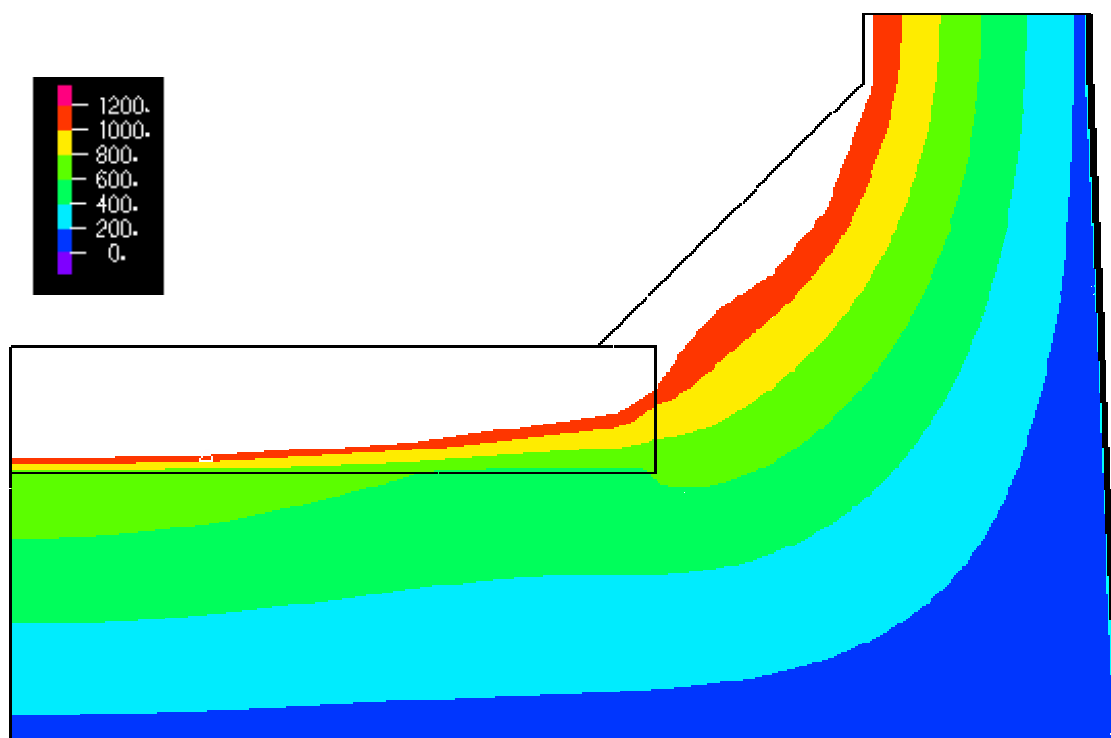


Figura 5.48: Perfil atual de desgaste na direção do 180°.

As Figuras 5.49, 5.50, 5.51 e 5.52 mostram os gráficos de evolução do desgaste da parede cadinho nas elevações 9300, 9700, 10300 e 10700. Estas posições foram escolhidas por apresentarem as menores espessuras residuais. Em todas as elevações o desgaste fica estabilizado a partir de 2002, com um pequena exceção para o furo de gusa 2 que apresenta também redução de espessura em 2005. Este fenômeno pode ser explicado por várias anormalidades operacionais como a entrada ou operação da injeção de carvão pulverizado somada ao aumento de produção do forno em 1999, abafamento do cadinho sem a corrida de salamandra para reforma em 2001 e o resfriamento do cadinho em 2002. A partir de 2003, o ritmo operacional do alto-forno ficou mais estável e iniciou-se em 2004 um grande trabalho de melhoria das praticas operacionais da casa de corrida juntamente com alguns investimentos em novos equipamentos. Estes fenômenos também podem ser observados nos gráficos de evolução da temperatura apresentado o item 5.1. Outro fator importante para minimizar o desgaste, foi à implantação de um padrão de controle da temperatura do cadinho. Este padrão indica as contramedidas necessárias que podem ser de simples controle da viscosidade dos líquidos à parada emergencial de 24 horas para redução da temperatura.

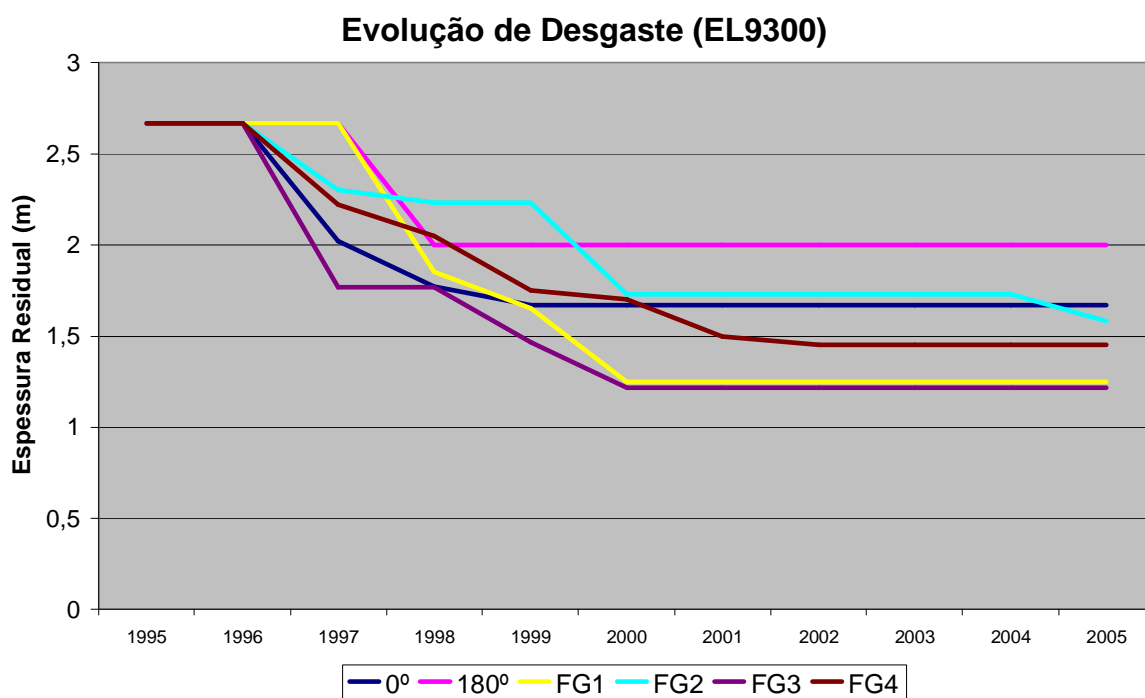


Figura 5.49: Evolução do desgaste da parede na elevação 9300.

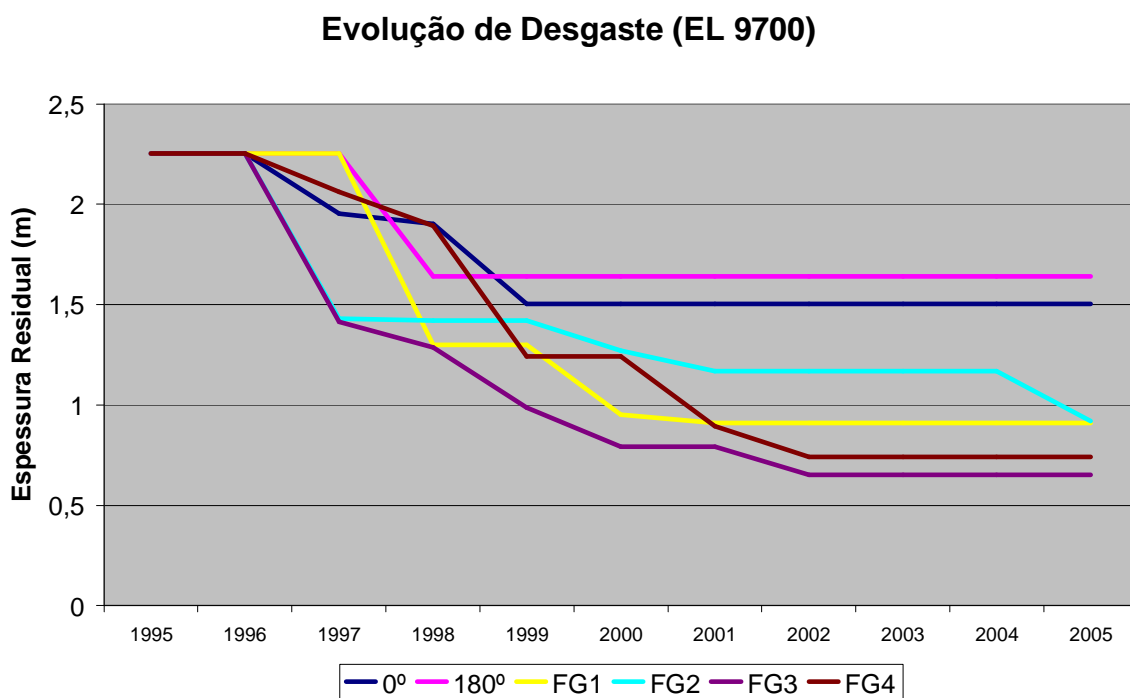


Figura 5.50: Evolução do desgaste da parede na elevação 9700.

Evolução de Desgaste (EL10300)

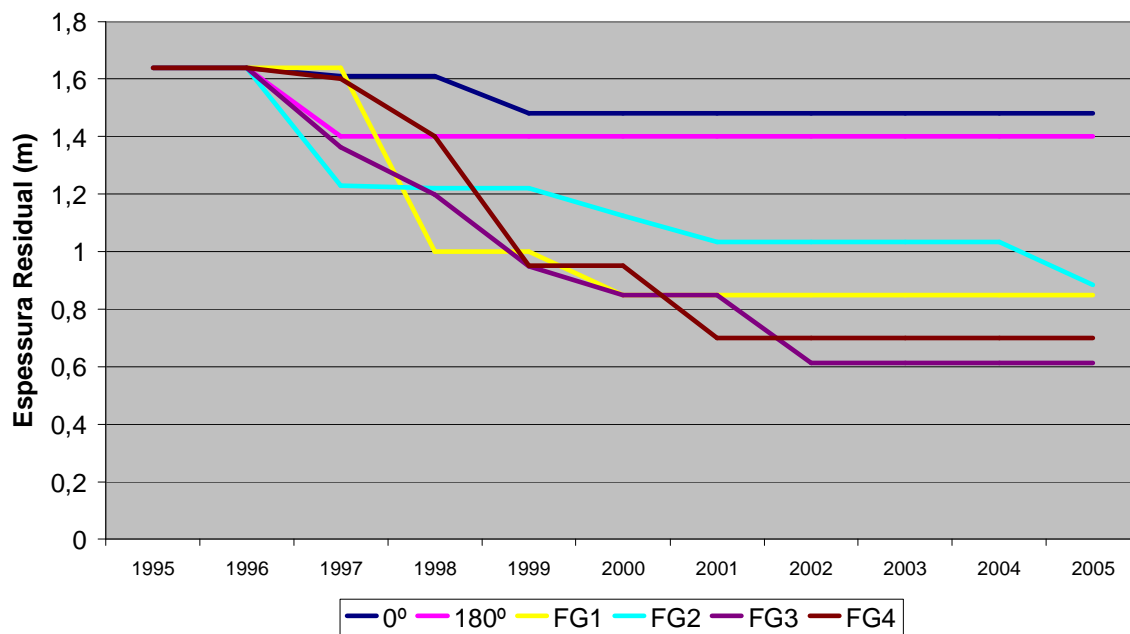


Figura 5.51: Evolução do desgaste da parede na elevação 10300.

Evolução de Desgaste (EL10700)

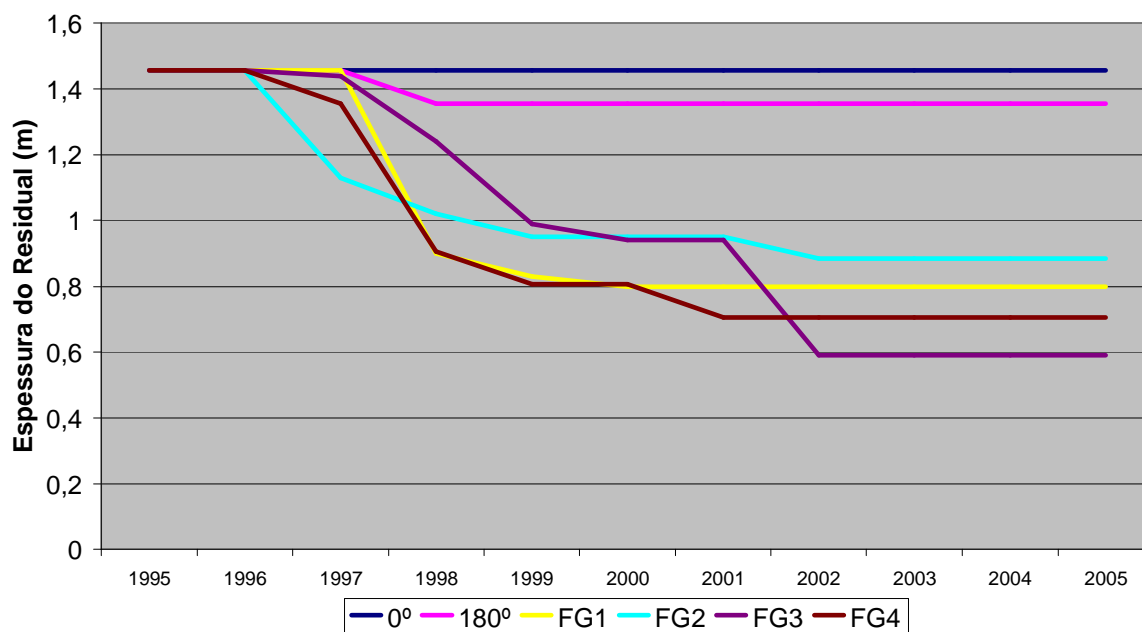


Figura 5.52: Evolução do desgaste da parede na elevação 10700.

5.5- Validação do modelo.

Devido à característica do modelo, alguns cuidados podem contribuir para uma maior confiabilidade na sua aplicação. Os cuidados são em relação aos termopares, condutividade térmica dos materiais, a constante de convecção e anormalidades ao longo da campanha.

Os cuidados em relação aos termopares estão ligados à quantidade, distribuição e precisão de sua localização, técnica de instalação, escolha do tipo adequado para a ordem de grandeza a ser medida, durabilidade de acordo com a campanha ou dispositivo que permita a sua reposição em caso de danificação e sistema adequado para aquisição de valores das temperaturas medidas. Um sistema de gerenciamento dos dados é importante para validar as informações obtidas para o uso em tempo real. Se alguns desses fatores não estiverem adequados, podem causar alguns tipos de distorções nos valores medidos e por consequência causar anormalidade na solução, uma vez que tais valores são dados de entrada, nos quais esta se baseia.

A condutividade térmica é também um dado de entrada, por consequência, a solução será tão boa quanto mais próxima da realidade. No caso específico deste trabalho os valores não foram obtidos por testes internos. Toda informação de condutividade foi enviada pelo fornecedor. Quando do processo de fabricação, foram retiradas amostras onde os testes foram realizados.

A constante de convecção depende muito do controle do fluxo de água de refrigeração do cadinho. É bastante comum alterar a vazão de água para controle da formação da camada agregada no fundo do cadinho. Este procedimento afeta a constante de convecção e por consequência as temperaturas dos termopares. Outra medida adotada é o fechamento da água da parede durante paradas para realização de serviços. Mas o mais importante para estabilidade da constante de convecção é a limpeza periódica da carcaça. Poucos milímetros de sujeira podem reduzir muito a eficiência de retirada de calor. Em alto-fornos mais modernos este problema é minimizado pela utilização da refrigeração interna por "staves coolers". A água é muito bem tratada para evitar a formação de incrustações.

Existe uma grande quantidade de anormalidades que podem afetar o resultado do modelo de desgaste. Estas ocorrências podem ser a penetração do gusa através de juntas, trincamento do bloco de carbono, presença de vapores de água proveniente de trincas da carcaça ou do sistema de refrigeração e vazios na massa socada provocados pela passagem de gás.

A comprovação de modelos é bastante peculiar. O primeiro grande teste para o modelo será na localização da melhor posição do furo da salamandra. Entretanto a comprovação do modelo de desgaste do cadinho será, após o fim da campanha programado para 2009, confrontando os perfis de desgaste medidos durante a demolição e o perfil calculado pelo modelo. Pode ser possível que estes resultados levem a um ajuste mais consistente do modelo. Fazendo-se uma análise nos resultados obtidos pelo modelo e nas suas potencialidades, este modelo se mostrou adequado pela coerência dos resultados, evidenciando uma grande expectativa na sua aplicação na avaliação do desgaste do cadinho de alto-forno até o final da campanha atual.

6 – CONCLUSÃO

A monitoração do alto-forno através de modelo para avaliação do desgaste do cadinho durante a operação de altos-fornos é muito importante. Principalmente no final da vida útil, onde todo cuidado com segurança operacional, pessoas, meio ambiente e economia se acentuam, em relação à necessidade de se ter uma ferramenta precisa no momento mais adequado para se encerrar a campanha. Isto também facilita melhorar o planejamento para uma reforma total do alto-forno.

O modelo se mostrou muito flexível e aplicável a qualquer tipo de cadinho com quaisquer projetos e diferentes qualidades e quantidades de materiais. Dependendo apenas de um arranjo adequado dos termopares, sistema de aquisição de temperaturas confiáveis e condutividade térmica de cada material que o compõe.

O modelo orienta a operação do alto-forno com relação à evolução da espessura residual do bloco de carbono, através de um acompanhamento ao longo da campanha, para com este adotar medidas operacionais cabíveis, como o controle da refrigeração do cadinho, utilização de TiO_2 , fechamento de ventaneira, controle do comprimento dos furos de gusa, injeção de material carbonoso, intensificação na limpeza da carcaça ou até mesmo uma eventual redução da produção.

A formulação do modelo foi direcionada para melhor retorno entre confiabilidade e simplicidade, através da transferência das condições de contorno para superfícies externas dos blocos de carbono, estabelecendo limites fictícios tanto para parede como para o fundo. Com estes procedimentos se reduzem os dados de entrada e as incertezas, ou seja, na determinação da condutividade térmica da massa socada durante a evolução da campanha, coeficiente de convecção devido ao filmes de refrigeração da parede ou tubulação de água da soleira. Além destes procedimentos, o método de elementos finitos e regulação de Gauss-Newton são técnicas numéricas bastante robustas que se primam pela precisão e flexibilidade de seus recursos.

Os resultados de simulação do modelo com o propósito de avaliação do desgaste do cadinho do alto-forno 1 da Gerdau Acominas, se mostraram bastante coerentes, evidenciando ser uma ferramenta poderosa para qual foi proposto.

7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista a grande importância do monitoramento e controle térmico do cadinho para a segurança operacional e também para o aumento da vida útil, o contínuo aprimoramento do modelo de desgaste, sugere-se o desenvolvimento dos seguintes trabalhos:

- Automatização do modelo de desgaste para cálculo em tempo real da espessura residual do bloco de carbono do cadinho.
- Introdução no modelo do cálculo da espessura de gusa solidificado e estudo de controle de formação e proteção de refratários.
- Modelo tridimensional baseado na técnica de elementos finitos na parede refratária, e ainda considerar os efeitos dinâmicos do metal líquido.

Para aprimoramento da rotina operacional do alto-forno através do modelo de desgaste atual é possível desenvolver vários estudos que poderão gerar grande retorno. Os seguintes trabalhos são sugeridos:

- Simulações para projetos de revestimento do cadinho.
- Estudo para se determinar a melhor localização para instalação dos termopares.
- Estudo para se avaliar o efeito de ocorrências operacionais no aumento do desgaste do revestimento refratário do cadinho.
- Adequação do sistema de refrigeração.
- Avaliação da carga térmica do cadinho.

8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. C. Método de Landweber Sem Derivadas para Identificação de Parâmetros em Equações Diferenciais Parciais Elípticas. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. 57p (Dissertação, Mestrado Matemática e computação física).

ANAN et al. Recent blast furnace relining Technologies at Nippon Steel; Nippon Steel Corporation, No prelo 2003.

CAMPBELL, P.J AND STANDISH N. – Diagnosing blast furnace hearth conditions – Iron e steelmaker, 11 (9):39-45, 1984.

CARNEIRO et al. Sistema automatizado para monitoramento do desgaste em cadinho dos altos-fornos da Usiminas. In: Seminário de Redução de Minério de Ferro, 30, 1999, Belo Horizonte. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1999, P. 625 -639.

CAPASSO V. Security-Related Parts of a Blast Furnace Model. Acesso em 2005. Disponível em <http://www.it.lut.fi/mat/EcmiNL/ecmi23/node5.html>

FERREIRA, J. P. Avaliação de desgaste do cadinho de altos-fornos através de modelo matemático. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1992. 150p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

FUJIHARA et al. Study of lining construction for blast furnace hearth bottom & wall; Carbon blocks for blast furnace hearth. Tokyo: Nippon Electrode CO. LTD, 1989 .14p.

FUJIHARA S., TAMURA S., IKEDA M. AND NAKAI M.: *Nippon Steel Tech. Rep.*, 41 (1989), 1.

HOFER et al. On-line wear determination for improved life-time of blast furnace hearth based on heat-flux meters. In: 3^o International conference on science and technology of ironmaking, 3^o, 2003, METEC Congress 03. Proceedings... Dusseldorf: VDEh, 2003. p. 491-495.

HUANG et al. Numerical Investigation of Transient Hot Metal Flows in a Blast Furnace Hearth. In: The Iron & Steel Technology Conference and Exposition and ICS 2005, 2005, AISTECH 2005 PROCEEDINGS, Volume 1, Charlotte: AISTECH , 2005. p. 199-207.

HUANG et al. Evaluation of Internal Conditions in a Blast Furnace Hearth Using a 3-D CFD Model. In: The Iron & Steel Technology Conference and Exposition and ICS 2005, 2005, AISTECH 2005 PROCEEDINGS, Volume 1 ... Charlotte: AISTECH , 2005. p. 283-292.

HUANG et al. Hearth Skulls and Hearth Wear Investigation of ISPAT Inland's #7 Blast Furnace. In: The Iron & Steel Technology Conference and Exposition and ICS 2005, 2005, AISTECH 2005 PROCEEDINGS, Volume 1... Charlotte: AISTECH , 2005. p. 101-112.

MCNALLY et al. Advances & advantages with ceramic cup technology. In: ALAFAR, 2000. Mexico:. p.1-16. Acesso em 2005. Disponível em <HTTP://WWW.SGICREF.COM/MEDIA/DOCUMENTS/S00000000000000000004/ICCE RAMCUP.PDF>.

NOGUES, M., LEPRINCE, G., "Measurement of residual refractory thickness in blast furnace hearth using acoustic methods", Rev. Met. – CIT, 90, 1993, p 773-777.

OMATSU et al. Advances in blast furnace equipment technology mainly for extending furnace life. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE AND TECHNOLOGY OF IRONMAKING, 3º, 2003, METEC Congress 03. Proceedings... Dusseldorf: VDEh, 2003. p.376-379.

PERCO, J.F. AND SPIRKO, E.J. – Blast furnace refractory lining wear status using radioactive sources – Ironmaking Proceeding, 33, Atlantic City, 1974.

RADMOSER, E. Security-Related Parts of a Blast Furnace Model. Acesso em 2005. Disponível em [http://www.it.lut.fi/mat/EcmiNL/ecmi23/node5.html\(2005\)](http://www.it.lut.fi/mat/EcmiNL/ecmi23/node5.html(2005)).

SADRI A., Inspection on Blast furnace, Relatório de inspeção realizada na Gerdau Açominas, (2003).

SAKAMOTO, Y. et al – Diagnosis techniques for in- operation blast furnace linings – Talkbutsu overseas, 2(1): 65-70, Ap. 1982.

SANTOS, R. J., Controle das Temperaturas dos Blocos de Carbono do Alto-Forno, Através do seu Sistema de Refrigeração, Visando o Prolongamento da Campanha Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2005. 110p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

SHIBATA K., KIMURA Y., SHIMIZU M., AND INABA S., Dynamics of Dead-Man Coke and Hot Metal Flow in a Blast-Furnace Hearth, ISIJ Int., Vol. 30, pp. 208-215, 1990

SHINOTAKE et al. Investigation of Blast-furnace Hearth Sidewall Erosion by Core Sample Analysis and Consideration of Campaign Operation. ISIJ International, 43, 3, pp. 321–330, 2003.

SHULTZ, R.L. AND BRENNEMAN – Armco installation experience with radioisotopes for measuring blast furnace lining life- In: Ironmaking Proceeding, 33, Atlantic City, 1974.

SUTIN et al. Portable Acoustic Instrumentation for Blast Furnace Wall Diagnostics. In: The Iron & Steel Technology Conference and Exposition and ICS 2005, 2005, AISTECH 2005 PROCEEDINGS, Volume 1... Charlotte: AISTECH , 2005. p. 121-130.

TALAAT et al. A Non-Traditional Taphole Repair at L Blast Furnace. In: The Iron & Steel Technology Conference and Exposition and ICS 2005, xx , 2005, AISTECH 2005 PROCEEDINGS, Volume 1 ... Charlotte: AISTECH , 2005. p. 93-99.

TANAKA M.. Recent Applications of the Boundary Element Method to Some Inverse Problems in Engineering. In: International Congress on Computational Mechanics, 5^o , 2005, GRACM, Volume 1 ... Limassol:

TORRKULLA et al. Model of the State of the Blast Furnace Hearth. ISIJ International, 40, 5, pp. 438–447, 2000.

VELHO, H.C. Problema inverso: Conceitos Básicos e Aplicações. Acesso em 2005. Disponível em www.lac.inpe.br/~haroldo/CursoPI/CursoPI.pdf.

YOSHIKAWA et al. Application of computer to estimation of refractory wear and solidified-layer distributions in the blast furnace hearth. *Taikabutsu*, vol. 12, 4, pp. 29–36, 1990.

YOSHIKAWA F., AND SZEKELY J., Mechanism of Blast Furnace Hearth Erosion, *Ironmak. Steelmak.*, Vol. 8, pp. 159-168, 1981.

WU et al. Mathematical model for on-line prediction of bottom and hearth of blast furnace by particular solution boundary element method. *Applied Thermal Engineering* , 2003, 23, pp. 2079–2087.

ZULLI P., Blast Furnace Hearth Drainage with and without a Coke-free Layer, Ph. D. thesis, The University of New South Wales, Sydney, Australia, No prelo 1991.

ZULLI et al. Monitoring the blast furnace hearth refractory with the 1150°C isotherm and acoustic wave measurements. In: 3^o International conference on science and technology of ironmaking, 3^o, 2003, METEC Congress 03. Proceedings... Dusseldorf: VDEh, 2003. p. 462-470.

Apresentação de refratários de alto-fornos da Corus. Acesso em 2005. Disponível em www.corusresearch.com/pdf/BF_refractory_lining_1.PDF.

Apresentação de modelo matemático do cadinho de alto-forno da Corus. Acesso em 2005. Disponível em http://www.corusresearch.com/pdf/Ironmaking_Mathematical_Modelling_BF_heartha.PDF

Apresentação de modelo de desgaste do cadinho de alto-forno da Vai. Acesso em 2005. Disponível em http://www.vai.at/view.php3?f_id=9350&LNG=EM.

Apresentação dos tijolos prensados a quente da Graftech. Acesso em 2005. Disponível em <http://www.graftech.com/GrafTech/Products+and+Services/Refractory+Systems/Blast+Furnace+Refractories/Default.htm>.

Catálogo de produtos do grupo ECIL. Acesso em 2005 Disponível em http://www.ecil.com.br/pt/ti/produtos/sensores_temperatura/termopares.pdf(2005).