

Renato Alfredo Schröter

**MODELO DE REATOR A PLASMA PARA TRATAMENTO DE
CINZAS DE INCINERAÇÃO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Engenharia .

**São Paulo
2001**

**MODELO DE REATOR A PLASMA PARA TRATAMENTO DE
CINZAS DE INCINERAÇÃO**

Renato Alfredo Schröter

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Engenharia .

Área de concentração:
Energia e Fluidos

Orientadora:
Miriam Rocchi Tavares

São Paulo
2001

*À Josiane,
à Helena e
à Beatriz.*

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Josiane pelo apoio.

Às minhas filhas Helena e Beatriz pela motivação.

Aos meus pais Reinaldo e Otiva pelo estímulo.

À Prof.^a Miriam Rocchi Tavares pela orientação.

Aos colegas do grupo de plasma do IPT Roberto, Mário, Lourenço, Oskar e Antônio Carlos pelo apoio técnico.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo pelo fornecimento da infra-estrutura.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

ERRATA

Modelo de Reator a Plasma para Tratamento de Cinzas de Incineração

Pg. 3 - Capítulo 2 ao invés de Capítulo 0

Pg. 7 - estequiométrico ao invés de estequiométrico

Pg. 12 - "quencher" ao invés de quencher

Pg. 22 - Em países com grande parcela de geração hidrelétrica, há menor geração de dióxido de carbono associada à utilização do plasma térmico, quando

comparado a processos de combustão. Nestas condições, o uso de plasma térmico contribui para o controle do efeito estufa.

Pg. 42 - a fórmula 3.13 completa é:

$$F_{3-1} = \frac{1}{R} - \frac{\pi R}{1} \left\{ \cos^{-1} \frac{A}{B} - \frac{2L}{1} \left[\sqrt{(A+2)^2 - (2R)^2} \cos^{-1} \frac{R}{A} + B \sin^{-1} \frac{1}{R} - \frac{\pi A}{2} \right] \right\}$$

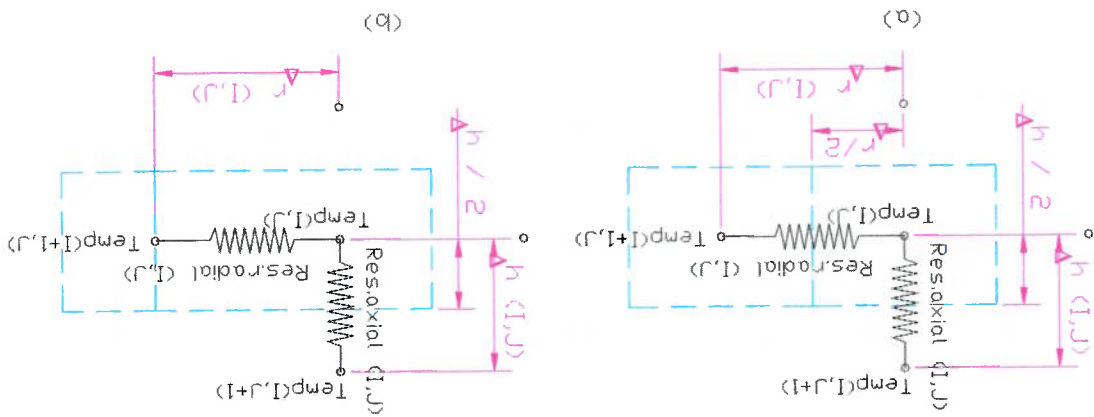
Pg. 51 - Abaixo da eq. (3.31): Observou-se (Incropera, 1996) que ...

Pg. 57 - Na figura 4.2a, onde consta Termopar 2, 180mm prof., lê-se Termopar 3

Pg. 60 - EFGHLK ao invés de EFGHIJK

Pg. 65 - Muitos fatores de forma definido pelos vértices entre as superfícies 43 e 18, e 17 e 41 na figura 4.5.

Pg. 83 - A figura abaixo substitui a figura 4.11



Pg. 108-Legenda da Figura:

Figura 5.3: Curvas de temperaturas medidas nos termopares

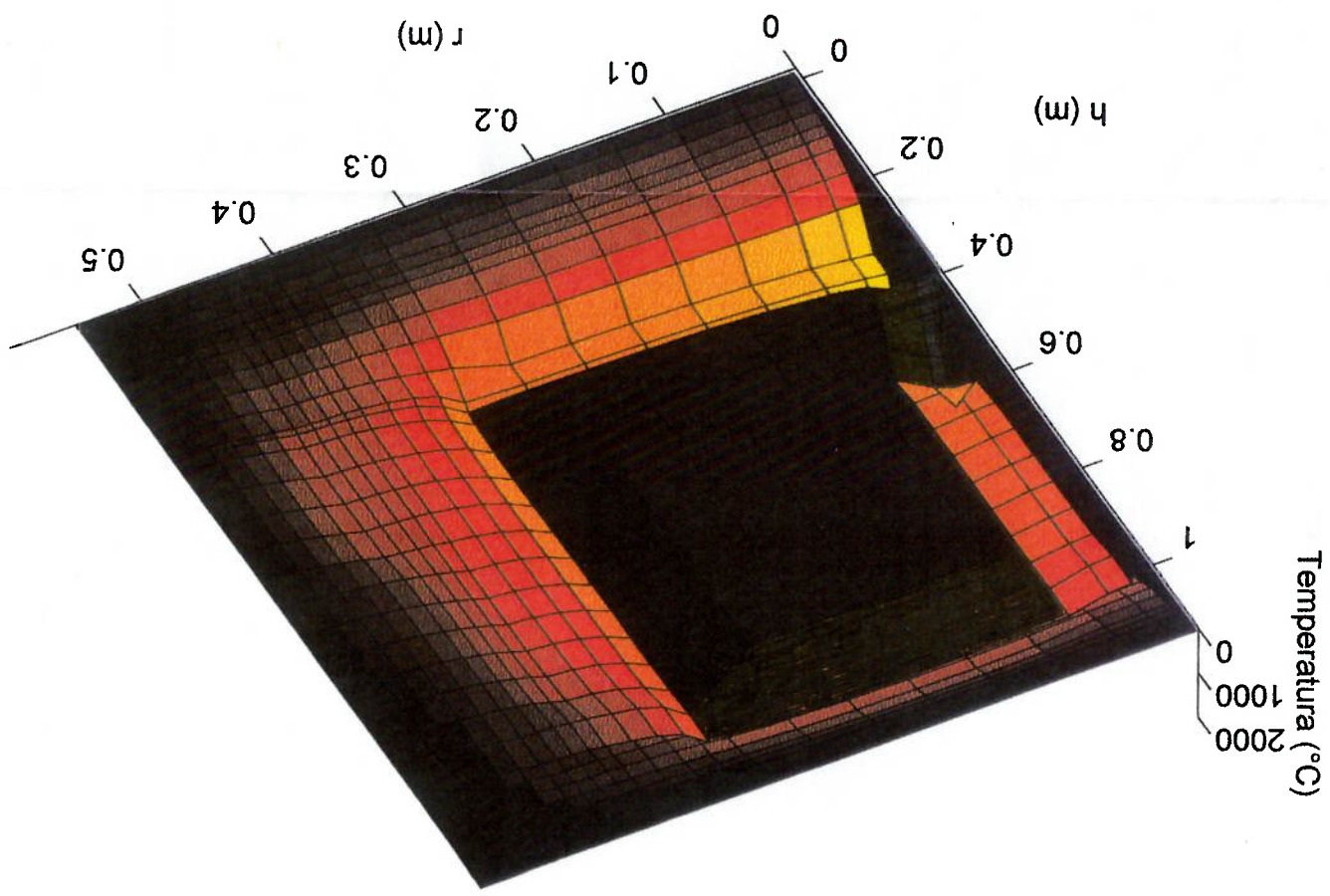


Figura 5.12: Distribuição de temperaturas após 6 horas de ensaio (equivalente à tabela A3 do Apêndice)

SUMÁRIO

Lista de tabelas	
Lista de Figuras	
Lista de Símbolos	
Resumo	
“Abstract”	

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Destinação de Resíduos Sólidos	4
2.2 Alternativas à Incineração	7
2.2.1 Pirólise	7
2.2.2 Autoclaves	7
2.2.3 Microondas	8
2.2.4 Termoselect	8
2.2.5 Plasma Térmico	9
2.2.6 Fornos de Cimento	9
2.3 Incineração	10
2.3.1 Sistemas de Incineração	10
2.3.2 Modelos de Incineradores	13
2.3.3 Emissões em Incineradores	14
2.4 Plasma Térmico	18
2.4.1 Introdução	19
2.4.2 Características do Plasma Térmico	20
2.4.3 Tochas de Plasma	22
2.4.4 Reatores a Plasma Térmico	26
2.4.5 Aplicações Industriais	28

34	3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	
34	3.1 Definição do Problema	
36	3.2 Condução	
37	3.3 Radiação Térmica	
39	3.3.1 Propriedades Superficiais	
40	3.3.2 Fatores de Forma	
46	3.3.3 Transferência de Calor entre Superfícies Cinzentas Formando Invólucro	
50	3.4 Correlações Empíricas para Convecção Natural	
51	3.4.1 Placa e Cilindro Verticais	
52	3.4.2 Placa Horizontal	
54	4. MODELAGEM DO REATOR	
55	4.1 Descrição do Reator Modelado	
58	4.2 Modelo na Região do Plasma	
60	4.3 Modelo na Região Interna do Reator	
62	4.3.1 Discretização da Superfície Interna	
64	4.3.2 Fatores de Forma entre as Superfícies Internas do Modelo	
79	4.4 Condução no Refratário	
81	4.4.1 Descrição do modelo de condução	
86	4.5 Troca de Calor na Carga	
88	4.6 Sequência de Resolução	
90	5. RESULTADOS	
90	5.1 Fatores de Forma	
101	5.2 Modelo de Condução e Radiação	
118	6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	
120	7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
A1	Apêndice	
A2	Tabelas de distribuição de Temperatura	

LISTA DE TABELAS

26	Tabela 2.1: Características operacionais de arco não transferido e arco transferido
64	Tabela 4.1: Características das superfícies internas do modelo
81	Tabela 4.2: Propriedades dos materiais
83	Tabela 4.3: Volumes de controle com fronteiras deslocadas
86	Tabela 4.4: Dimensões da malha
93	Tabela 5.1: Matriz dos fatores de forma incluindo apenas valores exatos
95	Tabela 5.2: Matriz dos fatores de forma incluindo valores exatos ou integrados numericamente sem aproximação
97	Tabela 5.3: Matriz dos fatores de forma calculados
99	Tabela 5.4: Matriz dos fatores de forma empregada no modelo
A1	Tabela A.1: Distribuição de temperaturas após 2 h do início do ensaio
A2	Tabela A.2: Distribuição de temperaturas após 4 h do início do ensaio
A3	Tabela A.3: Distribuição de temperaturas após 6 h do início do ensaio
A4	Tabela A.4: Distribuição de temperaturas após 8 h do início do ensaio
A5	Tabela A.5: Distribuição de temperaturas após 10 h do início do ensaio
A6	Tabela A.6: Distribuição de temperaturas após 12 h do início do ensaio
A7	Tabela A.7: Distribuição de temperaturas após 14 h do início do ensaio
A8	Tabela A.8: Distribuição de temperaturas após 16 h do início do ensaio
A9	Tabela A.9: Distribuição de temperaturas após 18 h do início do ensaio

LISTA DE FIGURAS

6	Figura 2.1: Destinação de Resíduos (Gandolla,1996)
11	Figura 2.2: Esquema de Incineração de lixo
17	Figura 2.3: Fórmulas estruturais de organo-clorados
23	Figura 2.4: Tochas de plasma a) de arco transferido b) de arco não transferido
24	Figura 2.5: Tocha de plasma de arco não transferido em operação no IPT
25	Figura 2.6: Arco de plasma obtido por tocha de arco transferido
31	Figura 2.7: Cinzas vitrificadas após tratamento por plasma térmico
32	Figura 2.8: Vazamento de lodo galvânico após tratamento por plasma térmico
35	Figura 3.1: Esquema do reator a plasma
41	Figura 3.2: Configuração de cilindros concêntricos alinhados
43	Figura 3.3: Configuração de cilindros e disco anular na base
44	Figura 3.4: Configuração para cilindros concêntricos desalinhados
45	Figura 3.5: Configuração para discos coaxiais anulares bloqueados por cilindro
47	Figura 3.6: Balanço energético em superfície sujeita a radiação térmica
55	Figura 4.1: Foto do reator a plasma modelado instalado no IPT
57	Figura 4.2: Esquema do: (a) reator a plasma (b) regiões modeladas
58	Figura 4.3: Gráfico comparativo da curva de potência fornecida durante ensaio do reator e curva adotada no modelo
63	Figura 4.4: Discretização das superfícies internas no modelo do reator
65	Figura 4.5: Discretização das superfícies internas no modelo do reator indicando sombreamento parcial de uma superfície

114	.....	Figura 5.9: Curvas de temperatura calculada e medida para o termopar 5
113	.....	Figura 5.8: Curvas de temperatura calculada e medida para o termopar 4
112	.....	Figura 5.7: Curvas de temperatura calculada e medida para o termopar 3
111	.....	Figura 5.6: Curvas de temperatura calculada e medida para o termopar 2
110	.....	Figura 5.5: Curvas de temperatura calculada e medida para o termopar 1
109	.....	Figura 5.4: Curvas de temperatura nos termopares calculada
108	.....	Figura 5.3: Curvas de temperatura nos termopares medida
107	.....	Figura 5.2: Distribuição energética calculada pelo modelo
106	.....	Figura 5.1: Fluxos energéticos calculados pelo modelo
90	.....	Figura 4.14: Fluxograma simplificado do procedimento de resolução do modelo
85	.....	Figura 4.13: Limites dos materiais refratários e do banho metálico
84	.....	Figura 4.12: Malha dos nós para modelo de condução no refratário do reator a plasma
83	.....	deslocada no sentido radial positivo
	.....	Figura 4.11: Volumes de controle dos pontos nodais: a) volume típico e b) com fronteira
78	.....	central parcialmente sombreados por degrau
	.....	e anel externo (a) entre anel interno e disco anular (b) bloqueados por cilindro
	.....	Figura 4.10: Esquema para integração numérica de fator de forma entre anel interno
76	.....	bloqueados por cilindro central parcialmente sombreados por degrau
	.....	Figura 4.9: Esquema para integração numérica de fator de forma entre discos anulares
73	.....	Figura 4.8: Esquema para determinação de X_r (a) e r_{bloq} (b)
71	.....	Figura 4.7: Esquema com duas circunferências bloqueadas por cilindro concêntricos
67	.....	entre superfícies discretizadas
	.....	Figura 4.6: Invólucro fechado para determinação das equações de forma

Figura 5.10: Curvas de temperatura calculada no pé do arco com termopar 5

115 como referência

116 Figura 5.11: Parcela da energia total absorvida pelo banho

117 Figura 5.12: Distribuição de temperaturas após 6 horas de ensaio

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área, m ²
c	Calor específico, kJ/kg°C
C	Capacidade térmica, kJ/°C
E	Poder emissivo, W/m ²
F _{i,j}	Fator de forma da superfície i para a superfície j
G	Irradiação, W/m ²
H	altura, m
J	Radioatividade, W/m ²
k	Condutividade térmica, W/m°C
L	Comprimento adimensional
q	geração energética, W/m ³ , W/m ²
r	coordenada radial, m
R	Resistência térmica, °C/W
t	tempo, s
T	Temperatura, °C (K)
V	Volume, m ³
x	coordenada axial, m
Xr	Dimensão característica, m
Letras Gregas	
α	absortividade
β	Coefficiente de expansão volumétrica, 1/K
ε	Emissividade
ν	viscosidade cinemática, m ² /s
ρ	Densidade, kg/m ³ Reflexividade
σ	Constante de Stefan-Boltzmann, 5,669 x 10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴
Índices	
b	Corpo negro
bloq	bloqueio
f	final
i	i-ésimo ponto
j	j-ésimo ponto
k	k-ésimo ponto
L	local
m	médio
o	inicial
pl	plasma
proj	projeção
ref	refratário

Grupos Adimensionais

Nu	Número de Nusselt, $h x / k$
Ra	Número de Rayleigh, Gr Pr
Pr	Número de Prandtl, $\mu c_p / k$
Gr	Número de Grashof $\frac{g \beta (T_p - T_\infty) x^3}{\nu^2}$

ABSTRACT

The destination of waste has become a major question in municipal as well as industrial administration in the last years. Huge urban conglomerates produce thousands of kilos of waste daily, making the total residues disposal fairly infeasible. In this context, countries with efficient waste treatment policies frequently choose solutions based on the incineration of remaining residues and, in some cases, either on their thermal energy reutilization. As a consequence the waste mass and volume are drastically decreased, contributing to the reduction of waste disposal areas.

This work deals with numerical modeling of transient heat transfer in a plasma reactor. The simulated equipment is a prototype built at the Institute of Technological Research of São Paulo. It employs a plasma transferred arch torch for ash vitrification. The mathematical model, in cylindrical coordinates, is two-dimensional, and adopts existing plasma torch models as boundary conditions, or alternately, direct measured experimental data.

Results from the numerical simulation during ash processing lead to the evolution of the reactor ladle lining.

The model was validated by experimental data coming from thermocouples placed in the reactor in order to follow heating and cooling cycles.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma modelagem computacional de reator a plasma para tratamento de cinzas de incineração, instalado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São focalizadas as trocas de calor por radiação térmica na região interna e condução em regime transitório no revestimento refratário.

A região interna do reator tem no modelo suas superfícies subdivididas, sendo desenvolvidos métodos de cálculo de fatores de forma entre superfícies em formato de anel cilíndrico e discos anulares bloqueadas por cilindro central com degrau.

O cálculo da condução térmica no refratário emprega o método das resistências térmicas para regime transitório.

Os resultados do modelo são comparados a dados experimentais obtidos de ensaio do reator de 23 horas de duração com períodos de aquecimento e resfriamento.

É apresentada revisão bibliográfica sobre plasma térmico e tratamento de resíduos.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A destinação de resíduos vem sendo considerada, nas últimas décadas, uma das grandes questões da administração, tanto urbana quanto industrial. Grandes conglomerados urbanos geram milhares de toneladas de resíduos diariamente, tornando a simples deposição de resíduos inviável. Os aterros sanitários superlotados e de má administração técnica acabam por contaminar lençóis freáticos e rios, desfavorecendo o uso dos recursos hídricos locais.

Novas gerações cada vez mais informadas quanto à necessidade de soluções de baixo impacto ambiental, levam ao incentivo de pesquisas relacionadas à destinação final dos resíduos. Hoje em dia, entretanto, são poucas as tecnologias disponíveis e implementadas com este objetivo atendido. A principal destas tecnologias, talvez, seja a reciclagem, que reintroduz matérias primas mais nobres no ciclo produtivo, normalmente com pouca geração de subprodutos. Ao mesmo tempo, a coleta seletiva auxilia na redução dos custos para reciclagem, motivando a população ao envolvimento com a problemática. A maior parte do lixo, porém, escapa mesmo a uma minuciosa reciclagem e concentra materiais tóxicos que poderiam ser danosos à população.

Países com uma política de tratamento de resíduos eficiente optam pela incineração dos resíduos remanescentes e, em alguns casos, há o reaproveitamento da energia térmica contida no resíduo. O volume do resíduo e sua massa são reduzidos drasticamente, contribuindo para a redução das áreas de aterro necessárias.

Há uma grande polémica quanto à implantação de incineradores de lixo, uma vez que eles apresentam emissões gasosas nocivas se mal implementados; porém, técnicas mais modernas, aliadas a limites de emissões mais restritivos impostos por órgãos ambientais, propiciaram a redução drástica do impacto ambiental dos incineradores. Resta como um dos principais argumentos contra incineração a geração de cinzas volantes, que contém concentrações perigosas de metais pesados e substâncias organo-cloradas (como dioxinas e furanos) obrigando sua deposição em aterros especiais.

Para contornar este problema, várias técnicas de inertização das cinzas vêm sendo desenvolvidas. Algumas delas partem para a lixiviação dos metais pesados e posterior destruição térmica dos compostos organo-clorados (Vogel, 1995). Uma solução em desenvolvimento no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, IPT, sugere a fusão das cinzas a altas temperaturas com o uso de tocha de plasma, fixando os metais pesados em matriz férrea para posterior reaproveitamento.

O processo necessita de equipamentos especiais como tochas de plasma, reatores, sondas e eletrodos, que suportem condições críticas de altas temperaturas e contato com reagentes químicos agressivos. Estes equipamentos são desenvolvidos a partir de protótipos e modelagens.

Este trabalho apresenta a modelagem adotada na concepção de reator a plasma em escala piloto para tratamento de cinzas de incineração no IPT, considerando os efeitos de radiação na distribuição de energia entre as superfícies internas. Os resultados são comparados a dados experimentais visando a validação do modelo.

Objetivos

O objetivo principal do trabalho é desenvolver um modelo aproximado para transferência de calor por condução e radiação em regime transitório que permita estimar e visualizar a distribuição de temperaturas na região de revestimento refratário a partir da potência fornecida pelo plasma. Dados experimentais provenientes de termopares instalados no reator servirão de base para validação do modelo desenvolvido.

Considerando que o tema de reatores a plasma é pouco divulgada entre engenheiros mecânicos, como contribuição adicional resumimos o “estado da arte” do problema do tratamento de cinzas, a fim de relacionar as vantagens e desvantagens de seu tratamento via plasma térmico .

O capítulo 0 apresenta levantamento bibliográfico para os temas relacionados a incineração de resíduos e particularmente às diversas aplicações de plasma térmico, uma delas assunto desta dissertação.

O capítulo 3 trata da fundamentação teórica para o estudo da transferência de calor no reator.

A modelagem térmica do reator é o assunto do capítulo 4.

Os resultados teóricos obtidos na modelagem do reator são apresentados no capítulo 5 e comparados a resultados experimentais.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os temas que relacionam a origem das cinzas de incineração e toda a problemática envolvida desde sua geração até o processo de tratamento via plasma térmico.

2.1 Destinação de Resíduos Sólidos

Em média, algo em torno de 1 kg de lixo são gerados por habitante por dia em áreas urbanas, sendo que regiões mais desenvolvidas tendem a apresentar produções ainda maiores de resíduos, concentrando-se principalmente em regiões de grande densidade populacional. No caso da cidade de São Paulo, por exemplo, cerca de 95% do lixo produzido segue para aterros sanitários. Estes aterros, por sua vez, encontram-se saturados e estima-se que nos próximos anos do século 21 deva ser iniciada transferência de lixo para outros municípios, caso nenhuma alternativa seja implantada.

Por outro lado, os recursos naturais também estão com suas reservas em declínio. Metais não ferrosos têm apresentado crescimento de consumo devido ao surgimento de novas aplicações e, para alguns casos, a produção primária poderá ser insuficiente para atender ao mercado em algumas décadas (Horbogen, 1992). Por sua vez, o carbono contido em petróleo, carvão e gás é utilizado principalmente como fonte energética. Apenas uma pequena parcela, em torno de 9%, é empregada na fabricação de polímeros, o que poderá

resultar no futuro em falta de matéria prima para estes materiais, além do recrudescimento do efeito estufa .

O acúmulo de grandes volumes de resíduos associado à redução das reservas naturais torna prememente a reciclagem destes. Para muitos materiais onde o custo da produção primária é elevado, a reciclagem já ocorre em larga escala. Outros materiais passarão a ser reaproveitados devido a pressões econômicas ou por motivações ecológicas. Entretanto, o volume total de material reciclável contido no lixo urbano é limitado a algo em torno de 30%, permanecendo uma grande quantidade para deposição em aterros.

A compostagem é uma alternativa para as partes orgânicas do lixo, que compreendem mais de 40% do lixo doméstico; porém, a quantidade de adubo que seria gerada pelo processo é excessiva para a agricultura, devendo o excesso ser descartado em aterros. A sua aplicação também é limitada, pois metais pesados e outros contaminantes poderiam ser introduzidos no ciclo alimentar.

Países mais estruturados na destinação de resíduos sólidos utilizam a incineração como alternativa para reduzir o volume de resíduos com inertização dos mesmos. Os maiores inconvenientes da incineração são os altos custos envolvidos (podendo atingir dez vezes o custo da deposição simples), a geração de cinzas volantes que devem ter destinação especial e o incremento do efeito estufa pela geração de CO₂. A incineração vem sendo adotada visando paralelamente o aproveitamento energético dos resíduos e substituindo a combustão de toneladas de combustíveis fósseis. Descrição mais detalhada do processo de incineração será apresentada no item 2.3.

O fluxograma da figura 2.1 representa uma alternativa típica de destinação de resíduos com as principais etapas de reciclagem e processamentos. Em um estágio inicial de desenvolvimento, o lixo coletado é destinado aos aterros sanitários sem nenhuma

recuperação. Com a evolução dos procedimentos de destinação são implementados gradativamente sistemas de coleta seletiva, centrais de seleção de recicláveis, compactação, recuperação energética dos gases de aterro, compostagem, tratamento de resíduos e incineração, formando uma rede complexa de destinação com o objetivo de obter a máxima recuperação de materiais, produtos e energia, reduzindo ao máximo os volumes destinados aos aterros sanitários (Horbogen, 1992).

É importante constatar que, mesmo em situações de coleta ideais, os aterros sanitários são sempre destino de grande parcela dos resíduos coletados.

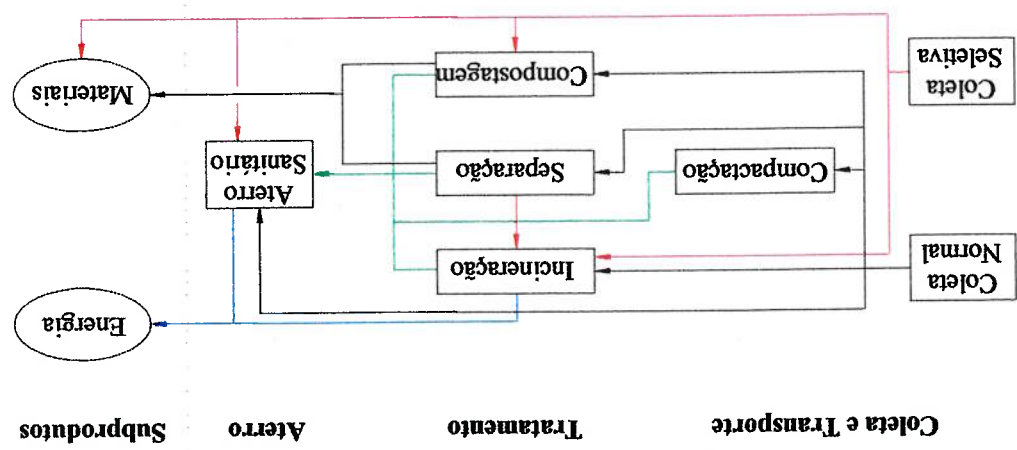


Figura 2.1: Destinação de Resíduos (Gandolla,1996)

A incineração surge como principal forma de redução do volume dos resíduos destinados aos aterros sanitários, prolongando a vida útil destes. Algumas alternativas de redução de volume e/ou desinfecção prescindindo da incineração serão discutidos a seguir.

2.2 Alternativas à Incineração

Diversos processos foram desenvolvidos como alternativa à incineração. Muitos deles empregam tecnologias antigas com diversas plantas industriais montadas; outros derivam de tecnologias emergentes, com conceitos mais modernos de tratamento de resíduos (Dempsey, 1993; E.P.A., 1991; Gandolla, 1996; Wogroly, 1997; PMSCS, 1995).

2.2.1 Pirólise

Há diversas formas construídas de plantas de pirólise. Elas caracterizam-se pelo aquecimento do resíduo a temperaturas entre 400 e 600°C na ausência de oxigênio, ou com volume bem abaixo do estequiométrico. Os produtos são gases combustíveis e "carvão" de pirólise. Muitos órgãos ambientais exigem a combustão dos gases após a pirólise. A principal vantagem do processo é a redução do volume do resíduo com fixação do carbono, evitando a formação de volumes maiores de CO₂. As plantas de pirólise apresentam, porém, alguma dificuldade na manutenção de condições estáveis nas emissões: o processo costuma ser bastante sensível ao poder calorífico do lixo alimentado, dissuadindo muitos investimentos (E.P.A., 1991).

2.2.2 Autoclaves

O tratamento de lixo em autoclaves consiste em manter o resíduo por período pré-determinado em recipiente estanque em contato com vapor a pressão e temperatura controlados. A temperatura é da ordem de 120°C e a residência é da ordem de 10 minutos. Os autoclaves não comportam volumes grandes de resíduos, sendo mais utilizados para lixo hospitalar. Após o processo, o volume de lixo é reduzido, porém a massa final do lixo a ser destinado a aterro é a original. Em autoclaves, podem ser produzidos odores fortes, com eventuais emissões tóxicas (E.P.A., 1991).

As principais vantagens do processo são a redução de emissão de NOx, alta temperatura de operação e recuperação energética. O processo, porém, tem operação relativamente complexa e necessita de pressão interna positiva, possibilitando a fuga de CO e outros gases contidos nas câmaras internas. Há plantas experimentais implantadas na

na geração de energia elétrica. Parte da eletricidade é utilizada pelos periféricos da planta ordem de 1800°C. Os gases resultantes são resfriados e utilizados por motores alternativos saída da câmara de pré-aquecimento, onde é utilizado oxigênio para gerar temperaturas da combustíveis. Estes são parcialmente utilizados na fusão da escória proveniente do lixo na energética. Os resíduos passam por resfriamento onde há liberação de gases combustão parcial dos resíduos com oxigênio e na síntese de gases para recuperação O processo termoselect vem sendo desenvolvido na Europa e baseia-se na

2.2.4 Termoselect

gases potencialmente perigosos, normalmente não tratados no processo. o tempo de residência limitado, não garante a descontaminação. Há liberação de odores e efetuada pelo vapor gerado e não pelas microondas (Wogroly, 1997). A baixa temperatura e A desinfecção pelo processo de microondas é bastante limitada, já que ela é alterar a massa final a ser destinada ao aterro sanitário.

temperaturas da ordem de 90 °C. O volume final do resíduo é reduzido, sem, contudo, para câmara irradiada por microondas que aquecem a água contida no lixo, atingindo aspergido com água para melhorar a eficiência do processo. Em seguida, é transportado Em equipamentos de microondas, o lixo a ser tratado é inicialmente triturado e

2.2.3 Microondas

Europa que visam a consolidação do processo como alternativa à incineração (Gandolla, 1996).

2.2.5 Plasma Térmico

Algumas plantas de plasma térmico para tratamento de lixo, principalmente lixo hospitalar, vêm sendo instaladas e encontram-se em fase de teste (Chapman, 1995). Processos via plasma serão descritos no item 2.4.

2.2.6 Fornos de Cimento

Alguns órgãos ambientais permitem que resíduos sejam incinerados dentro de fornos de cimento. O cimento é calcinado em fornos rotativos longos com temperaturas acima de 1200 °C. Os gases de exaustão passam por sequência de ciclones para a separação de materiais particulados.

As principais vantagens da incineração em fornos de cimento são o grande aproveitamento energético do resíduo incinerado e a ausência de custos de implantação de um incinerador de resíduos específico. As altas temperaturas favorecem também a completa destruição do resíduo.

Por outro lado, fornos de cimento não dispõem de sistema de tratamento de gases voltado à coleta de gases ácidos, metais pesados ou organo-clorados emitidos na combustão dos resíduos. O grande fluxo de gases na exaustão e de sólidos na saída do forno impedem a medição de quaisquer contaminantes, qualificando o processo como uma diluição do resíduo inicial com potencial impacto ambiental.

2.3 Incineração

A incineração é uma prática consolidada na destruição de diversos resíduos, na qual as parcelas orgânicas e combustíveis deste são oxidadas a altas temperaturas. As principais razões que levam à incineração de lixo urbano são a grande redução do volume (da ordem de 90%) e da massa de lixo original. O custo de implantação e operação de incineradores, porém, é elevado se comparado à deposição simples, sendo assimilado principalmente em regiões de grande densidade populacional ou no tratamento de resíduos de maior periculosidade, como lixo hospitalar ou resíduos industriais.

Desde a descoberta dos efeitos carcinogênicos de substâncias organo-cloradas geradas em processos térmicos na década de 70, grupos ambientalistas vêm exercendo pressões políticas contra a utilização de incineradores. Hoje, como resultado de investimentos em tecnologia e normas de emissões mais restritivas, incineradores modernos podem emitir menos dioxinas e furanos que as contidas no lixo original. Como consequência, os custos de implantação dos sistemas de tratamento de efluentes para um incinerador suplantam em duas vezes o custo do próprio incinerador.

A seguir serão descritos os sistemas de incineração mais comumente adotados, visando apresentar a origem das cinzas volantes. Em todos os sistemas que disponham de algum tratamento dos gases efluentes, há coleta das cinzas de incineração contendo contaminantes potencialmente perigosos e com deposição regulamentada (Vogg, 1985).

2.3.1 Sistemas de Incineração

As plantas de incineração modernas têm suas concepções bastante variadas, tanto no tratamento de efluentes gasosos e líquidos quanto no incinerador propriamente dito. A

grande maioria das plantas de incineração, contudo, pode ser representada pelo esquema da figura 2.2, salvo pequenas especificidades.

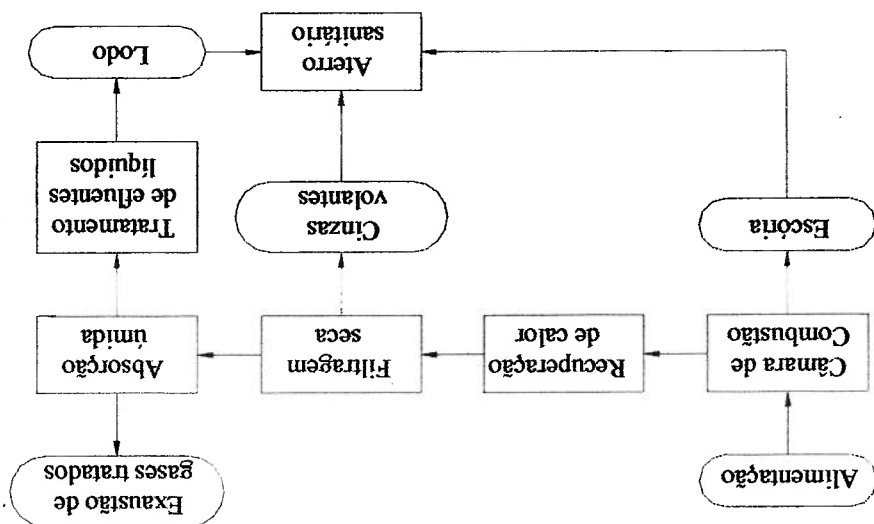


Figura 2.2: Esquema de Incineração de lixo

Conforme o esquema, o lixo é alimentado dentro de uma câmara onde ocorre a combustão a temperaturas acima de 800 °C. Da combustão de uma tonelada de lixo com poder calorífico inferior da ordem de 8,5 MJ/kg, resultam aproximadamente 300 kg de escória retirados na saída da câmara de combustão e cerca de 6000 Nm³ de gases de combustão. Os gases seguem para tratamento e carregam em cada Nm³ entre 2 e 10g de cinzas volantes, cerca de 1 g de HCl, 500 mg de SO₂, e 300 mg de NOx (Vogel, 1985).

Diversas plantas de incineração são dotadas de sistemas para recuperação de calor dos gases de combustão. Os mais usuais são a geração de vapor e/ou água quente, a geração elétrica com o uso de turbinas a vapor ou a utilização de ciclos de absorção no

resfriamento de água. Muitas vezes o ar de combustão é pré aquecido para melhorar a eficiência da incineração.

As primeiras etapas de tratamento dos gases ocorrem sem a injeção de água, ou com injeção de volume insuficiente para saturação deles e compõe-se, por exemplo, de ciclones, quencher secos, filtros eletrostáticos, filtros de mangas, entre outros. A principal função destes é separar os gases os materiais particulados e parte dos metais pesados condensados. Cerca de 30 kg de cinzas de incineração para cada tonelada de lixo incinerado são separados na fase seca do tratamento dos gases. Após a passagem por um filtro eletrostático, os gases carregam em torno de 100 mg de particulados em cada metro cúbico as condições normais de pressão e temperatura.

Finalmente, os gases são lavados antes de sua emissão para a atmosfera. Os equipamentos típicos são lavadores tipo venturi ou de coluna de enchimento. Normalmente são utilizados dois lavadores: o primeiro ácido e o segundo básico, sendo que no segundo é adicionado CaO ou soda cáustica na neutralização dos gases ácidos como HCl e SO₂ absorvidos dos gases de exaustão.

Os lavadores geram efluentes líquidos que devem ser tratados antes do descarte. O lodo separado dos efluentes líquidos, assim como as cinzas de incineração e a escória, seguem para aterro sanitário. As cinzas de incineração têm classificação especial para deposição (conforme as legislações locais), uma vez que apresentam concentrações elevadas de produtos tóxicos como metais pesados e dioxinas e furanos. Normalmente, as cinzas devem ser encaminhadas para aterros especiais onde permanecem protegidas de intempéries.

2.3.2 Modelos de Incineradores

Diversos modelos de incineradores são utilizados na incineração de resíduos. Serão apresentadas a seguir breves descrições dos principais modelos empregados no processamento de grandes volumes de resíduos (Dempsey, 1993).

Incinerador de grelhas

Incineradores de grelhas são utilizados há mais de 80 anos na combustão de lixo doméstico. Nestes, o lixo é depositado sobre grelhas móveis inclinadas que movimentam o lixo dentro da câmara de combustão. Ar é insuflado por entre as grelhas propiciando boa mistura entre o ar e o lixo combustível. Os gases são aspirados para o sistema de tratamento de efluentes.

Os incineradores de grelhas operam tipicamente entre 900 e 1200°C e adequam-se a resíduos com poder calorífico inferior entre 5 e 10 MJ/kg. Podem ser alimentados com cargas parciais de biomassa ou lodo.

Incinerador de leito fluidizado

Incineradores de leito fluidizado são encontrados mais comumente no Japão e utilizam volumes maiores de ar promovendo a movimentação do resíduo durante a combustão, que ocorre a temperaturas entre 750 e 950 °C. As temperaturas de combustão mais baixas reduzem a formação de NOx, porém os maiores volumes de gases de combustão dificultam o tratamento destes. O sistema é indicado para lixo triturado e comporta lixo com maior teor de umidade (Dempsey, 1993).

Forno rotativo

Incineradores de forno rotativo têm menor capacidade de incineração do que incineradores de grelhas ou de leito fluidizado, sendo comumente utilizados na incineração de resíduos industriais. O resíduo é alimentado dentro de forno cilíndrico revestido por refratário. O leve declive e a rotação do forno propiciam a movimentação do material dentro deste. Estes fornos podem ser alimentados também com resíduos líquidos ou pastosos. A temperatura de combustão atinge até 1500 °C, sendo indicado para a destruição de materiais de alta toxicidade. Os gases provenientes do forno rotativo residem em câmara de pós-combustão acoplada ao mesmo antes do seu tratamento.

2.3.3 Emissões em Incineradores

As emissões de incineradores podem ser divididas em três grupos principais:

- Gases tóxicos

- Particulados e metais pesados

- Substâncias Organo-cloradas

As emissões admissíveis destes componentes dos gases de exaustão são regulamentadas por órgãos ambientais competentes. Na norma alemã 17.BimSchV (1990), e nas normas da CETESB (1997) podem ser encontrados, por exemplo, os valores tolerados respectivamente na Alemanha e em São Paulo, considerados dos mais restritivos. Serão apresentadas a seguir alguns pontos de maior relevância referentes às principais emissões providas de incineradores.

Gases tóxicos

Os principais gases tóxicos emitidos por incineradores são HCl, CO, SO₂, NO_x e HF. As emissões de monóxido de carbono são definidas pela qualidade da combustão. As normas exigem a residência dos gases de combustão por tempo mínimo a temperaturas elevadas com excesso de oxigênio. Como resultado, padrões de emissão da ordem de 100 mg CO/Nm³ são facilmente atendidos.

Projetos consistentes de sistema de lavagem de gases garantem emissões bastante abaixo das regulamentações para gases ácidos como HCl, HF e SO₂. As emissões de NO_x costumam apresentar valores baixos se comparados a outros processos térmicos e são incrementadas pelo aumento de temperatura de combustão. Quando a redução dos níveis de NO_x nos gases de combustão é necessária, esta é obtida principalmente com o uso de catalisadores. Outros processos, como a decomposição por plasma térmico, seguem em desenvolvimento (Dempsey, 1993)..

Particulados e metais pesados

A separação de particulados dos gases de exaustão de incineradores é bastante simples e obtêm-se hoje valores da ordem de 10 mg/Nm³ com filtros de mangas ou com lavadores. As emissões de metais pesados, porém, são mais preocupantes e merecem maior atenção, principalmente os metais Cd e Hg, por apresentarem temperaturas de volatilização baixas e por ocorrerem com frequência em lixo urbano.

Grande parte do cádmio contido no resíduo incinerado evapora dentro do incinerador, sendo transportado nos gases de combustão. Na presença de HCl, há formação de cloreto de cádmio. Medições indicam que 30% do cádmio contido no lixo permanece na

escória após incineração (Vogg, 1985) e 99% do cádmio restante encontra-se condensado em particulados, sendo detectado principalmente nas cinzas de incineração.

A presença de mercúrio em lixo urbano é da ordem de 5ppm e provém principalmente de baterias, que deveriam ser sempre que possível separadas e recicladas antes da incineração.

Medições indicam que a temperaturas da ordem de 200°C, 80% do mercúrio contido nos gases encontra-se na forma gasosa, e os 20 % restantes encontram-se agregados a particulados (Vogg, 1985). Da parcela volatilizada do mercúrio, mais de 95% podem ser facilmente condensados. O mercúrio contido nos gases encontra-se principalmente na forma Hg^{++} , preferencialmente ligado a átomos de cloro presentes dos gases de combustão em incineradores. A 150 °C, temperatura comum após saída de caldeiras, grande parcela do $HgCl_2$ contido nos gases encontra-se em estado sólido, podendo ser filtrado junto aos particulados.

A pequena quantidade de mercúrio na forma metálica contida nos gases, necessita de temperaturas mais baixas e de maior tempo de residência em lavadores para ser absorvido. A presença de mercúrio metálico nos efluentes líquidos deve também ser evitada, por esse apresentar maior dificuldade na sua separação.

Dioxinas e furanos

Grande atenção tem sido dada pela comunidade científica às dioxinas e furanos. As dioxinas são membros de família de compostos denominada dibenzo-p-dioxinas que caracteriza-se pela estrutura molecular na forma de três anéis: 2 anéis benzênicos interligados por um par de átomos de oxigênio (fig. 2.3). Usa-se denominar de "dioxinas"

os compostos em que aos anéis benzênicos encontram-se ligados átomos de cloro. Existem, assim, 75 possíveis congêneres de dioxinas cloradas.

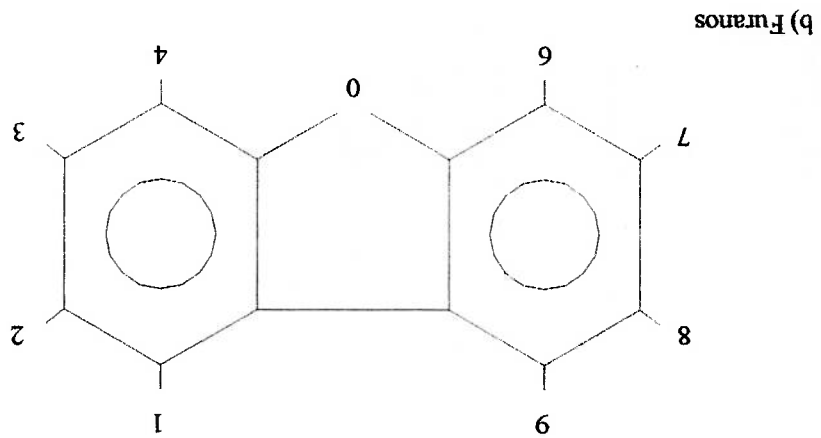
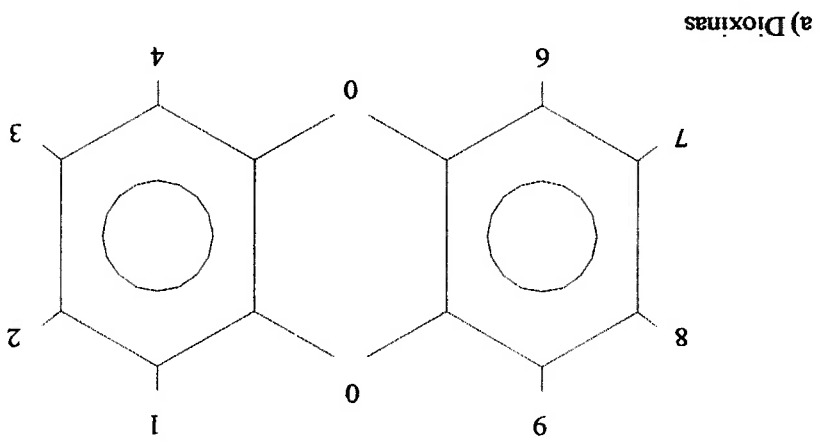


Figura 2.3: Fórmulas estruturais de organo-clorados

Furanos apresentam forma similar às dioxinas, porém com os dois anéis benzênicos interligados por apenas um átomo de oxigênio, característica da família dos dibenzofuranos. Novamente, a denominação usual de "furanos" refere-se aos dibenzofuranos clorados. As dioxinas e furanos mais perigosas estão entre os policlorados com quatro ou mais átomos de cloro. O 2,3,7,8-tetracloro dibenzo-p-dioxina (2,3,7,8-TCDD) é considerado hoje o mais potente carcinogênico já avaliado (Cetesb, 1997).

Dioxinas e furanos não são gerados intencionalmente, mas apenas como subprodutos na fabricação de produtos químicos tais como alguns pesticidas ou na recombinação em gases de combustão contendo certos produtos orgânicos e clorados. Em incineradores, as maiores taxas de formação de dioxinas e furanos encontram-se na faixa de temperatura entre 250 e 350°C. Estas condições podem ser encontradas na saída de caldeiras ou em filtros, onde espera-se a formação das dioxinas nas cinzas volantes. A destruição das dioxinas e furanos a níveis não detectáveis ocorre a temperaturas acima de 600 °C (Vogel, 1985).

2.4 Plasma Térmico

A denominação de "plasma" é atribuída aos gases compostos de grande parcela de ions, elétrons e átomos livres. A ionização dos gases pode ser obtida pelo aquecimento dos gases à pressão ambiente, sendo então denominado "plasma térmico", ou com o uso de pressões próximas da vácuo absoluto, o plasma de baixa pressão.

2.4.1 Introdução

A utilização de plasma térmico em processos industriais é uma alternativa consolidada, com plantas instaladas nas áreas de metalurgia, reciclagem, tratamento de resíduos e produção de novos materiais entre outros.

As primeiras aplicações práticas do plasma térmico datam do final do século XIX, com o desenvolvimento de fornos elétricos para a fusão de metais. No século XX, tochas de plasma foram utilizadas na fixação de nitrogênio em grande escala para as indústrias de fertilizantes. No final da década de 20, acetileno foi produzido comercialmente com o uso de plasma térmico.

A tecnologia de plasma térmico teve uma forte evolução nos últimos trinta anos, com o surgimento de diversas novas aplicações. Tecnologia de tochas de alta potência foi desenvolvida para geração de gases a alta temperatura, empregados em ensaios de materiais para a indústria aeroespacial. Gases limpos, com alta entalpia e alta pressão de estagnação são utilizados para simular a condição de reentrada de veículos espaciais na atmosfera terrestre.

O desenvolvimento de novos processos industriais via plasma decorreu do surgimento de tochas de plasma com alta confiabilidade e baixo custo operacional. Hoje dispomos comercialmente de tochas de plasma tanto de pequeno porte (plasma de corte, solda, plasma-spray) com alguns kW de potência, quanto tochas de grande porte, acima de 30 MW (Mac Rae, 1989).

2.4.2 Características do plasma térmico

O plasma térmico é gerado principalmente em descargas elétricas a pressões atmosféricas. Pode alternativamente ser gerado na ionização por alta frequência, porém esta técnica é menos difundida em processos industriais.

Tochas de plasma térmico surgem como alternativa para equipamentos convencionais de combustão, elementos de resistência elétrica, ou processos de indução direta. Algumas das principais características que podem levar à opção pelo plasma em determinado processo são:

Altas temperaturas

O plasma pode atingir temperaturas da ordem de 20.000°C, permitindo o desenvolvimento de processos a temperaturas bem mais elevadas que sistemas convencionais.

Altos fluxos energéticos

Devido às altas temperaturas, às altas velocidades do jato de plasma e às altas condutividades térmicas dos gases de plasma, obtêm-se fluxos energéticos muito intensos para o produto. Para tochas de arco transferido, há ainda geração de calor por efeito Joule na região do anodo.

Pode-se prever, assim, uma redução dimensional dos equipamentos em relação a outras formas de aquecimento, uma vez que as superfícies necessárias para a troca de calor são bastante reduzidas para reatores a plasma.

Gradientes de temperatura elevados permitem resfriamento rápido de partículas e gases em processo.

Altos gradientes de temperatura

Como resultado do confinamento do plasma em um reator, algumas características importantes são obtidas:

Atmosfera controlada

O plasma pode ser gerado empregando-se como gás de processos uma variedade muito grande de produtos gasosos. Pode-se obter atmosferas inertes no reator com o uso de argônio ou hélio, atmosferas oxidantes com o uso de oxigênio puro ou em proporções pré definidas, ou atmosferas redutoras aplicando-se os mais diversos combustíveis. Ao contrário do processo de combustão, a geração energética no processo a plasma é praticamente desvinculada do volume de gás de processo, o que fornece uma grande maleabilidade na concepção e na operação de reatores a plasma.

Controle sobre o volume de gases efluentes

O volume de gases efluentes para o reator a plasma pode ser limitado a valores mínimos, reduzindo drasticamente eventuais custos para tratamento destes, ou viabilizando a separação de compostos específicos, quando as pressões parciais destes o permitirem.

Menor consumo energético

A redução do volume de gases efluentes e a redução dos equipamentos devido à maior concentração energética tendem a tornar processos a plasma mais eficientes no que se refere ao consumo energético.

Energia elétrica

Em países com grande parcela de geração hidrelétrica, há menor geração de dióxido de carbono quando em utilização o plasma térmico, contribuindo no controle do efeito estufa.

Estado de plasma

A presença de elétrons, íons, radicais e átomos livres, característicos do gás ionizado a alta temperatura, pode ser de grande valia nos mais diversos processos termoquímicos. A mistura de compostos em estado de plasma pode gerar recombinações moleculares, que podem ser otimizadas por resfriamento controlado.

Estabilidade

Tochas de plasma são estáveis e permitem controle de todos os seus parâmetros, estendendo a estabilidade também para o processo para o qual a tocha é aplicada.

2.4.3 Tochas de plasma

Tochas de plasma a arco podem ser classificadas segundo a característica do arco volático: isto é, de arco transferido ou de arco não transferido, conforme apresentado na figura 2.4. Eventualmente, podem ser concebidos tochas mistas.

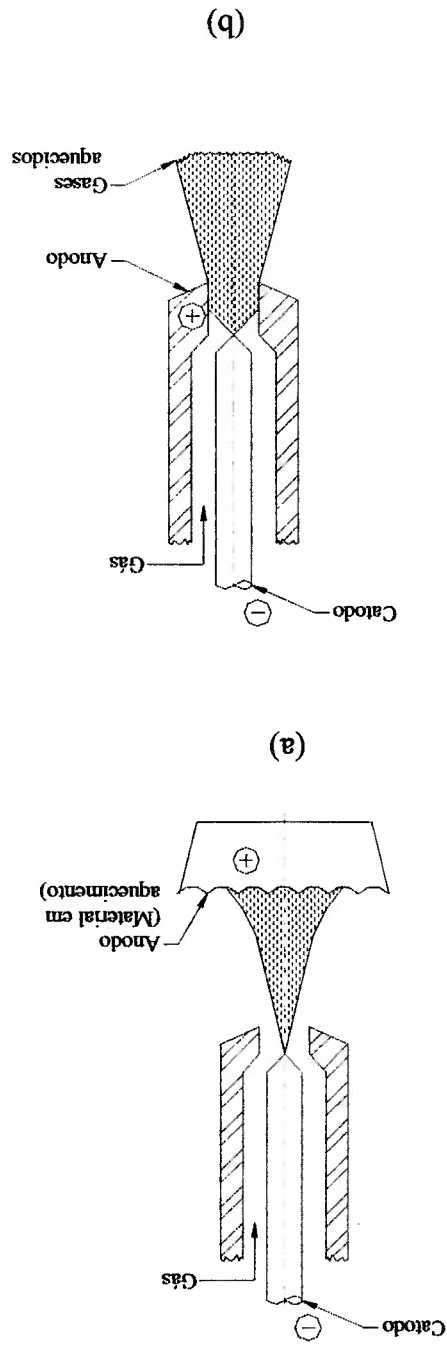


Figura 2.4: Tochas de plasma a) de arco transferido b) de arco não transferido

Na tocha de arco não transferido, o anodo encontra-se na própria tocha. O arco permanece principalmente confinado dentro da tocha e a energia útil é transportada pelos

gases de plasma. A figura 2.5 apresenta a foto de uma tocha de arco transferido concebida no IPT.

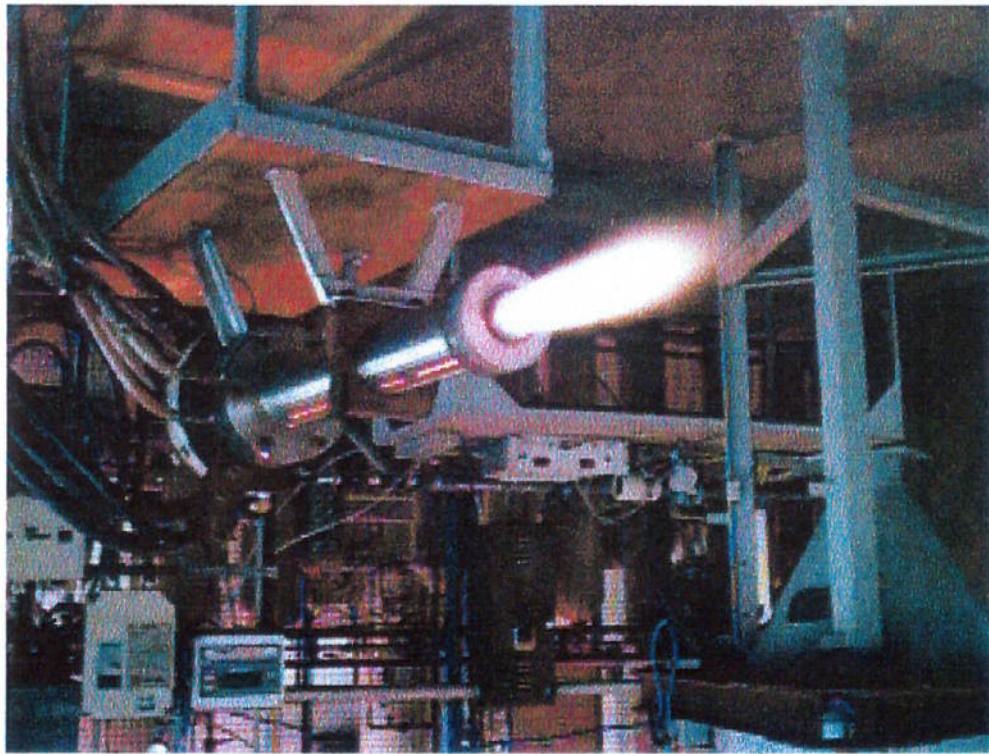


Figura 2.5: Tocha de plasma de arco não transferido em operação no IPT.

Já a tocha de arco transferido utiliza como anodo o próprio material em processamento. A energia liberada pelo plasma é absorvida pelo banho por radiação e convecção e ainda por efeito Joule no banho. A tendência é que seja obtida uma melhor eficiência energética nos processos onde a transferência direta do arco é viável. A figura 2.6 apresenta a região do arco de plasma obtido por uma tocha de arco transferido.

Tochas de arco transferido podem operar com correntes muito elevadas e apresentam baixas vazões de gás. Tochas de arco não transferido são associadas a tensões mais elevadas e grandes volumes gasosos. As tochas de arco não transferido são aplicadas quando for necessária maior entalpia dos gases no processo. Algumas características operacionais das tochas de plasma em reatores são apresentadas para comparação na tabela 2.1 (Mac Rae,1989).

Figura 2.6: Arco de plasma obtido por tocha de arco transferido.

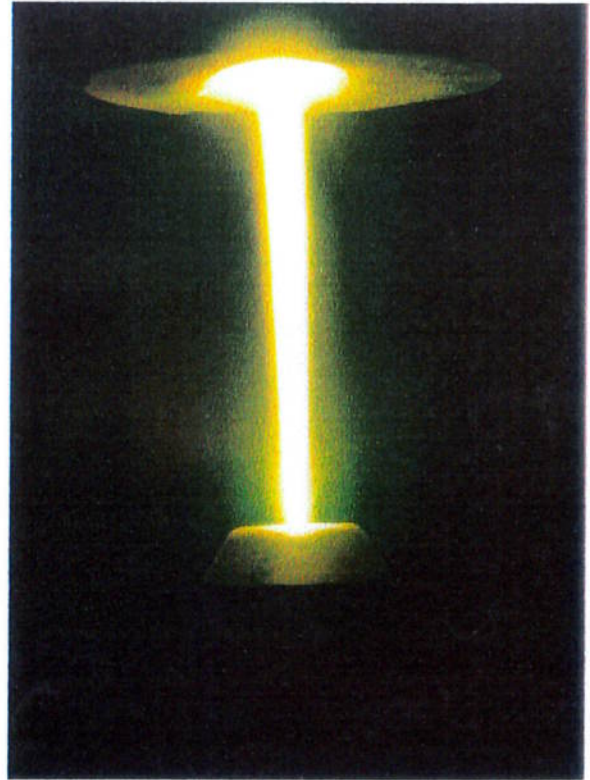


Tabela 2.1: Características operacionais de arco não transferido e arco transferido.

Arco não transferido	Arco Transferido	
Consumo de gás	Alto	Baixo
Tipo de gás	Reativo	Inerte (reativo)
Eficiência da tocha	80%	alto (95%)
Nível de potência	<30 MW	<40 MW
Corrente	<2.000 A	<100.000 A
Voltagem	<6.000 V	<1.000 V
Recuperação de energia	Desajável	Desnecessária

2.4.4 Reatores a plasma térmico

Reatores a plasma podem ser concebidos nas formas mais diversas, visando atender às características específicas do processo em questão. A adoção de um tipo de reator parte de considerações termodinâmicas, da cinética de reações e da transferência de calor, massa e momento para o produto.

Enfatizando-se o tempo de residência no plasma, os reatores podem ser subdivididos em dois grupos de maior importância (Mac Rae, 1989):

- processamento dinâmico dentro do plasma

- processamento em banho líquido ou em carga sólida.

No primeiro caso, o material é alimentado na região de alta temperatura do plasma, onde permanece por alguns milissegundos, residência suficiente para concretizar as transformações físicas e/ou químicas requeridas. Tipicamente, são utilizadas tochas de plasma de arco não transferido e os reagentes são gases, líquidos aspergidos ou materiais particulados.

O reator a plasma pode ser concebido para que os produtos gerados na reação do plasma sofram resfriamentos controlados, fixando características almejadas. Pode-se, assim, com resfriamento rápido, fixar proporções de equilíbrio químico vantajoso, gerar partículas ultra-finas ou de geometria esférica com a solidificação em vôo. Por outro lado, o resfriamento pode ocorrer em substrato sólido, formando filme de recobrimento superficial, como no caso de plasma-spray. Ou ainda, pode ser criada reação aquecida/isolada determinando o gradiente de temperatura ideal ao processo.

O curto tempo de residência no processamento dinâmico impede que reações entre as fases gasosa e sólida ocorram em proporções suficientes para muitas aplicações, uma vez que a difusão de massa entre as fases é relativamente morosa. Assim, para processos industriais importantes, como a redução de óxidos metálicos, a reação dispersa em meio gasoso não apresenta bons resultados.

Processos que necessitam de tempos de residência elevados, seja pela cinética das reações envolvidas, seja pela necessidade de maior transferência energética, têm os reatores de banho líquido ou de carga sólida como soluções mais adequadas. O material permanece por vários minutos em contato com o plasma ou em regiões de alta temperatura antes de ser retirado do processo. Situações típicas são o uso de tochas de plasma em processos de redução de minérios (como o alto-forno) ou na fusão de metais ou resíduos em banho líquido. O aproveitamento energético é maior para estes casos, uma vez que podem ser limitados os volumes de gases para arco transferido, ou a energia dos gases efluentes pode ser reaproveitada em pré aquecimento.

Estes reatores são normalmente revestidos com refratário, proporcionando isolamento térmico e maiores volumes de material a alta temperatura.

2.4.5 Aplicações Industriais

As principais aplicações industriais do plasma térmico podem ser classificadas segundo as áreas: metalurgia, tratamento de resíduos e processamento de materiais particulados e gasosos. Há também aplicações comercialmente consolidadas, como plasma de corte ou plasma-spray para revestimentos superficiais (Mac Rae, 1975).

Metallurgia

O plasma térmico vem sendo aplicado com maior frequência em processos metalúrgicos, normalmente impulsionado pela necessidade de processos mais eficientes e produtos finais com propriedades mais nobres.

Na produção de ferro ligas, por exemplo, quando comparado ao processo convencional, o plasma apresenta melhor controle operacional, redução do consumo de eletrodos, menor restrição à composição de minérios alimentados, maior abrangência na seleção de redutores a base de carbono, alimentação contínua e baixos níveis de ruído. Reatores a plasma podem atingir temperaturas médias e de pico bem maiores que reatores convencionais.

Em alto-fornos, tochas de plasma de arco não transferido são utilizadas substituindo a combustão do coque em regiões onde há excedentes energéticos sazonais. No lingotamento contínuo de aços, a temperatura de entrada no cilindros é de vital importância para garantir a qualidade do produto final. O plasma é utilizado na região do tundish antes da alimentação nos cilindros, favorecendo a regulação fina da temperatura de processo.

Plasma é utilizado, ainda, na produção de cromo metálico, titânio e outros processos metalúrgicos, onde as características de maior relevância são principalmente atmosfera controlada, altas temperaturas e controle fino de processos.

Tratamento de resíduos

O plasma térmico tem encontrado um vasto campo de aplicações em reciclagem e tratamento de resíduos. Sua adequação decorre da capacidade de operação a altas temperaturas, viabilizando reações químicas e difusões favoráveis, do uso de energia elétrica com baixa geração de gases efluentes e da possibilidade de alimentação de resíduos nas mais diferentes formas. Nestas condições é possível processar desde gases e materiais particulados a barras inteiras lacradas.

Seguem alguns processos a plasma voltados à reciclagem e tratamento de resíduos:

Reciclagem de alumínio

A reciclagem de alumínio pelo processo convencional utiliza queimadores a óleo como fonte de energia, gerando grande volume de gases e baixa eficiência energética. Uma vez que o alumínio apresenta alto potencial de oxidação, é necessário o uso de sal para isolar o banho dos gases oxidantes. Este sal é periodicamente descartado, contendo quantidades importantes de alumínio solubilizado.

Como a recuperação deste alumínio é onerosa, assim como o é a deposição tecnicamente aprovada do resíduo, muitas vezes o sal é lavado em rios de regiões ermas recuperando parte do alumínio, porém com grande impacto ambiental.

A recuperação de alumínio via plasma evita o uso do sal, uma vez que pode ser usado gás inerte na atmosfera interna do reator. O consumo energético é consideravelmente

reduzido devido às trocas térmicas mais eficientes e aos baixos volumes de gases efluentes. O rendimento metálico do processo a plasma é também bem mais elevado, principalmente na recuperação de escórias e cavacos, quando a relação entre superfície exposta à oxidação e volume de alumínio é maior (Szente, 1993; Schröter, 1997).

Finos metalúrgicos e escórias

Apenas uma parcela limitada de resíduos provenientes de processos metalúrgicos e usinagem podem ser reaproveitados em fornos tipo cúpola aquecidos a coque. A alta velocidade dos gases impede a fixação de partículas menores e a realimentação de escória levaria à desqualificação do produto final.

Entretanto, esses finos podem ser processados em reatores a plasma, onde a alimentação de materiais particulados é bastante simples e há separação das parcelas metálica e vítrea da escória, podendo-se recuperar grande parte dos metais contidos.

Tratamento de cinzas de incineração

A cinzas volantes formadas nos processos de incineração de resíduos contêm dióxidas e furanos formadas durante o resfriamento, além de diversos metais pesados, principalmente mercúrio e cádmio.

No tratamento via plasma, as cinzas são alimentadas na região de alta temperatura do reator, onde são fundidas e incorporadas ao banho líquido bifásico. A temperatura do reator é suficiente para a destruição total de dióxidas e furanos. Os metais pesados contidos são parcialmente volatilizados e parcialmente absorvidos pela fase metálica do banho. O pequeno volume de gases de exaustão apresenta os poluentes em pressões parciais relativamente altas, simplificando sobremaneira o tratamento e/ou recuperação de

materiais. Sólidos gerados no tratamento de efluentes líquidos e gasosos podem seguir para reciclagem ou reprocessamento no reator.

Os materiais fundidos no reator são vazados formando lingotes metálicos e vítreos. O primeiro segue para reciclagem e o vítreo, já inertizado, pode ser utilizado como enchimento de pavimentação (Beudin,1995;Chapman,1995). A figura 2.7 apresenta uma amostra de cinzas vitrificadas após tratamento por plasma térmico.

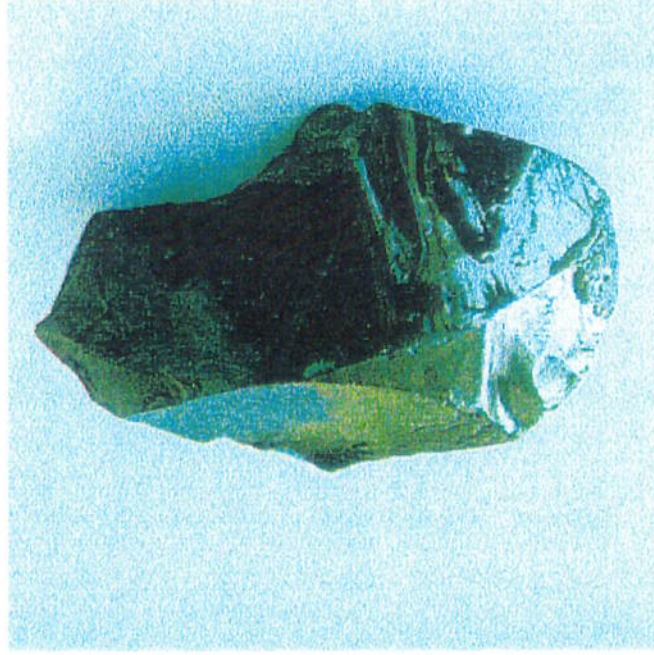


Figura 2.7: Cinzas vitrificadas após tratamento por plasma térmico.

Tratamento de lodo galvânico via plasma

O lodo galvânico é gerado em galvanoplastias, quando os efluentes líquidos dos processos de deposição são tratados antes de serem descartados. Ele contém metais residuais da deposição e tem destinações tecnicamente duvidosas.

Em alguns países, os tambores contendo lodo galvânico são depositados em minas subterrâneas. Muitas vezes o lodo é incinerado em fornos de cimento, onde as emissões de gasosas e o fluxo de massa são volumosos, mascarando qualquer medição de emissões de metais pesados ou outros contaminantes dissolvidos. No estado de São Paulo, a incineração de lodo galvânico em fornos de cimento é proibida e o material é muitas vezes encaminhado para estados onde as leis ambientais são menos restritivas.



Figura 2.8: Vazamento de lodo galvânico após tratamento por plasma térmico.

Uma solução seria a utilização de reator a plasma. A planta de tratamento de lodo galvânico via plasma é bastante similar à de cinzas de incineração, porém a unidade

elevada e o maior volume de gases efluentes geram a necessidade de equipamentos periféricos de maior porte (Schrotter,2000). A figura 2.8 apresenta o momento do vazamento em lingoteiras de lodo galvânico já processado.

Materiais particulados

Vários processos empregando plasma térmico têm sido desenvolvidos na produção e processamento de materiais particulados. Materiais com granulometrias pré-definidas são alimentados nas regiões de alta temperatura em tocha de arco não transferido, obtendo-se alterações físicas e/ou químicas desejáveis. Assim são produzidos pigmentos de óxido de titânio, pós para sinterização ou spray, magnetita esferoidal para toner de copiadoras, zircônia a partir de zirconita e de pós cerâmicos finos como carbeto de silício, nitretos de silício e alumínio entre outros (Mac Rae,1989).

Capítulo 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As trocas de calor entre corpos podem ser divididas em três mecanismos básicos: a condução, a convecção e a radiação térmica. Os três fenômenos serão apresentados no texto a seguir, com enfoque nos conceitos empregados no modelo de reator a plasma estudado.

3.1 Definição do Problema

Pretende-se calcular a distribuição de temperatura em reator a plasma para tratamento de cinzas, com esquema simplificado apresentado na figura 3.1. A geometria cilíndrica do reator permite a abordagem bidimensional em coordenadas cilíndricas. Será adotado regime transitório e a única fonte de calor será a tocha de plasma dentro do reator. A região do plasma não será modelada, sendo considerada apenas emissão de radiação térmica pelo arco de plasma com meio não participante e superfícies cinzentas. O reator é revestido com refratário onde ocorrerá transferência de calor por condução apenas.

A carga do reator está imersa no ar ambiente, de forma que sua superfície externa sofre resfriamento por convecção natural e radiação.

O gás empregado no plasma é argônio, com vazões variando entre 5 e 20 NI/min. Conforme será descrito no capítulo 4, levantamentos experimentais indicam que na região

interna do reator, a transferência de energia ocorre principalmente por radiação. Nesta região estaremos considerando apenas os efeitos de radiação.

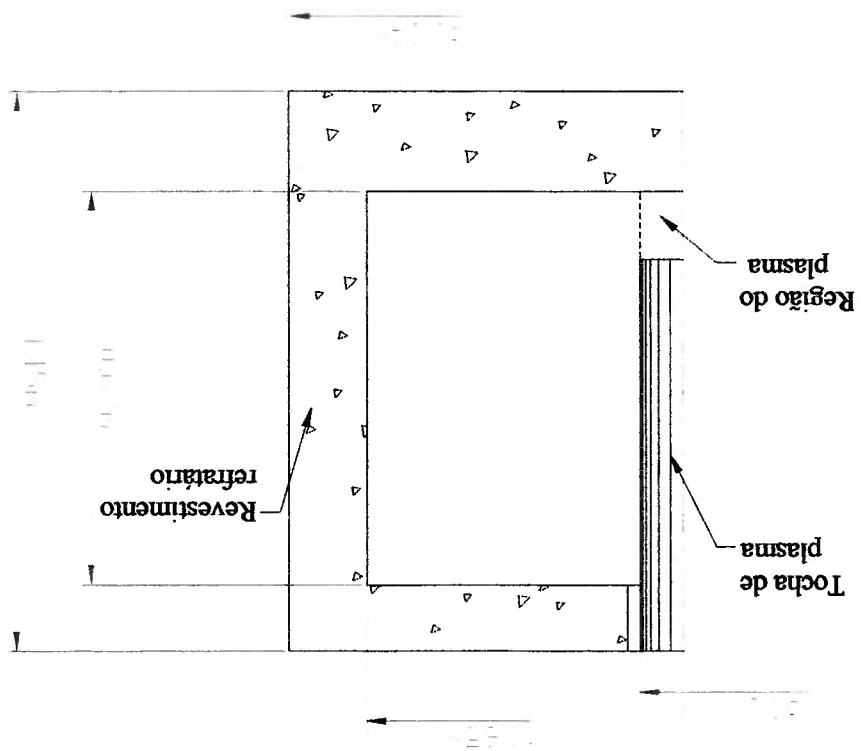


Figura 3.1: Esquema do reator a plasma.

No refratário as trocas de calor ocorrem por condução e seu efeito será tratado.

3.2 Condução

Nas paredes do reator, isto é, revestimento refratário e carga, ocorre transferência de calor por condução. A transferência de calor por condução pode ser descrita pelas equações de conservação de energia. Para problemas bidimensionais, em regime transitório, com geração, em geometrias cilíndricas, tem-se então:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial x}{\partial T} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial r}{\partial T} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

onde T é a temperatura, k a condutividade térmica do meio, ρ a densidade, c o calor específico x a coordenada axial e r a radial e q a geração energética.

Para regime transitório com propriedades variáveis, o método da analogia elétrica é mais adequado (Holman, 1983). As propriedades térmicas variáveis são aproximadas pela discretização do sólido. Na formulação explícita, a nova temperatura T^{p+1} para o ponto nodal " T " é calculada em função das temperaturas no instante anterior T^p no ponto nodal " T " e nos nós adjacentes " T_j ", isto é:

$$T^{p+1} = \left(q_i + \sum_j R_{Tj}^f \frac{C_i}{\Delta t} \right) \frac{\Delta t}{C_i} + \left(1 - \frac{\sum_j R_{Tj}^f C_i}{\Delta t} \right) T^p \quad (3.2)$$

onde q_i representa a geração de calor no elemento " T ", Δt o incremento de tempo, R_{Tj} a resistência térmica entre os elementos " T " e " T_j " definida como:

$$R_{Tj} = \frac{kA}{\Delta x} \quad (3.3)$$

para condução axial onde A é a área de contato entre os nós e

$$R_{ij} = \frac{\ln(r_j/r_i)}{2\pi k \Delta x} \quad (3.4)$$

para condução radial e a capacidade térmica C_j é calculada para o volume

elementar ΔV_j :

$$C_j = c_j \rho_j \Delta V_j \quad (3.5)$$

O valor da condutividade térmica é tomado na ponto médio entre os pontos nodais

“ i ” e “ j ”. O método é estável para o incremento de tempo limitado a:

$$\Delta t \leq \left[\frac{C_j}{\sum_i 1/R_{ij}} \right]_{\min} \quad (3.6)$$

3.3 Radiação Térmica

Na região interna do reator, conforme descrito no capítulo 4, as trocas de energia se

fazem principalmente por radiação térmica, cujos fundamentos serão descritos a seguir.

Todos os corpos com temperatura acima do zero absoluto emitem energia na forma

de ondas eletromagnéticas. A energia emitida com comprimento de onda entre 10^{-4} e 10^{-7} m

recebe o nome genérico de “radiação térmica”. A radiação térmica esta relacionada à

emissão de fótons pela transição de elétrons da matéria excitada termicamente.

A quantidade de energia emitida por comprimento de onda para uma dada temperatura do emissor é função deste comprimento de onda. A integração da energia emitida por um radiador ideal para todos os comprimentos de onda, resulta na equação de

Stefan-Boltzmann:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (3.7)$$

onde E é o poder emissivo do corpo, definido como a energia emitida pelo corpo por unidades de área e de tempo; T a temperatura absoluta e σ a constante de Stefan-

Boltzmann, que vale no sistema internacional:

$$\sigma = 5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

O corpo que emite radiação segundo esta equação é chamado corpo negro, assim denominado por não refletir a radiação incidente. O índice b da equação (3.7) refere-se a esta denominação. As características do corpo negro são:

- Absorve toda radiação incidente, independentemente de comprimento de onda.
- Para determinada temperatura e comprimento de onda, não há superfície que emita com maior intensidade.
- Emite de forma completamente difusa, mas a intensidade de sua emissão é função do comprimento de onda.

A troca de calor por radiação não requer a presença de meio de condução, ocorrendo também quando em vácuo absoluto. Em meios translúcidos ou parcialmente translúcidos, a emissão de radiação térmica ocorre em todo o volume do meio, mas na grande maioria dos sólidos e líquidos, a energia emitida por moléculas internas é fortemente absorvida pelas moléculas adjacentes. Neste caso, podemos considerar as emissões como fenômenos superficiais.

3.3.1 Propriedades Superficiais

As emissões de radiação são fortemente dependentes da superfície envolvida.

Superfícies reais emitem radiação térmica com menor intensidade que a de um corpo negro para qualquer comprimento de onda. A emissividade, ϵ , de um corpo real é definida como

a relação entre as intensidades de emissão do corpo e de um corpo negro à mesma

temperatura. A emissividade real depende do comprimento de onda,

sendo então chamada emissividade monocromática (ϵ_λ). Ela também varia em função da

direção da emissão em relação à normal da superfície, denominado-se então emissividade

direcional.

Para a superfície idealizada como “cinzenta”, admite-se que a intensidade de sua

emissão é proporcional à de um corpo negro. Assume-se, assim, emissividade

monocromática constante, independente do comprimento de onda. A superfície também é

considerada difusa tanto na emissão quanto na absorção de radiação térmica. A superfície

cinzenta é então caracterizada pela sua emissividade ϵ constante.

A identidade de Kirchhoff garante que a emissividade ϵ é igual a absorvidade α

para corpos negros e cinzentos. Assim, sendo a superfície opaca, a refletividade ρ será

complementar à emissividade ϵ . Ou seja:

$$\rho = 1 - \epsilon$$

(3.8)

3.3.2 Fatores de Forma

O fator de forma F_{ij} é definido como a fração da radiação que deixa a superfície i que é interceptada pela superfície j . Pode ser obtido por integração da fórmula decorrente de sua definição, por métodos gráficos ou utilizando as relações de fatores de forma aplicadas a geometrias específicas, com formulações disponíveis na literatura (Holman, 1983; Incropera, 1996; Siegel, 1981; Bornside, 1990; Minning, 1979). Seguem as correlações que serão utilizadas para a determinação dos fatores de forma das superfícies internas do reator a plasma disponíveis na literatura. No capítulo 4, descreveremos a formulação desenvolvida para a obtenção dos fatores de forma não encontrados na literatura especializada e necessários para a modelagem do reator.

Relações entre fatores de forma

As principais relações entre fatores de forma resultam diretamente de sua definição. A reciprocidade expressa a relação entre os fatores de forma de duas superfícies i e j como:

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (3.9)$$

onde A_i e A_j são as áreas das superfícies i e j respectivamente. Para um invólucro fechado por N superfícies, temos, obviamente:

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (3.10)$$

Dadas duas superfícies i e j , a subdivisão da primeira em N segmentos resulta em:

$$F_{ji} = \sum_k^n F_{j,k} \quad (3.11)$$

ou, com o uso da reciprocidade (eq. 3.9), esta última toma a forma:

$$A_i F_{ij} = \sum_k^n A_k F_{k,j} \quad (3.12)$$

Na discretização das superfícies internas do reator a plasma, algumas correlações para geometrias cilíndricas serão necessárias. Seguem correlações disponíveis na literatura para as condições de cilindros concêntricos:

Fatores de forma entre cilindros concêntricos finitos alinhados

Siegel e Howell (1981) fornecem as equações para determinação de fator de forma entre dois cilindros concêntricos de mesmo comprimento L e mesmo alinhamento, conforme apresentado na figura 3.2.

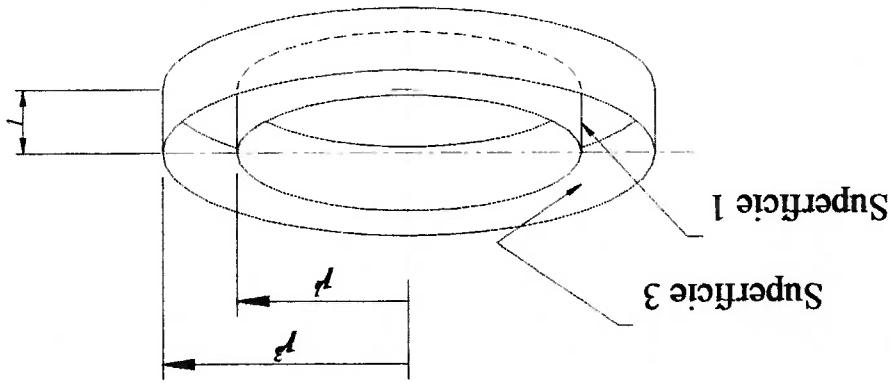


Figura 3.2: Configuração de cilindros concêntricos alinhados

Do cilindro externo para o cilindro interno, o fator de forma é determinado por:

$$F_{3-1} = \frac{1}{1} - \frac{\pi R}{1} \left\{ \cos^{-1} \frac{A}{B} - \frac{2L}{1} \left[\sqrt{(A+2)^2 - (2R)^2} \cos^{-1} \frac{R}{B} + B \sin^{-1} \frac{R}{1} - \frac{\pi A}{2} \right] \right\} \quad (3.13)$$

e do cilindro externo para o cilindro externo:

$$F_{3-3} = 1 - \frac{1}{1} + \frac{\pi R}{2} \tan^{-1} \frac{L}{2\sqrt{R^2-1}} - \frac{2\pi R}{L} \left[\frac{L}{\sqrt{4R^2+L^2}} \sin^{-1} \frac{L}{4(R^2-1) + \frac{L^2}{R^2}(R^2-2)} \right. \\ \left. - \sin^{-1} R^2 - 2 + \frac{\pi}{2} \left(\frac{L}{\sqrt{4R^2+L^2}} - 1 \right) \right] \quad (3.14)$$

onde são empregados os adimensionais:

$$R = \frac{r_1}{r_3}$$

$$L = \frac{l}{r_1}$$

$$A = L^2 + R^2 - 1$$

$$B = L^2 - R^2 + 1$$

Fator de forma entre face externa de cilindro e disco anular na base

Partindo-se do fator de forma para cilindros finitos alinhados (eq. 3.13),

considerado o volume interno fechado por simetria vale:

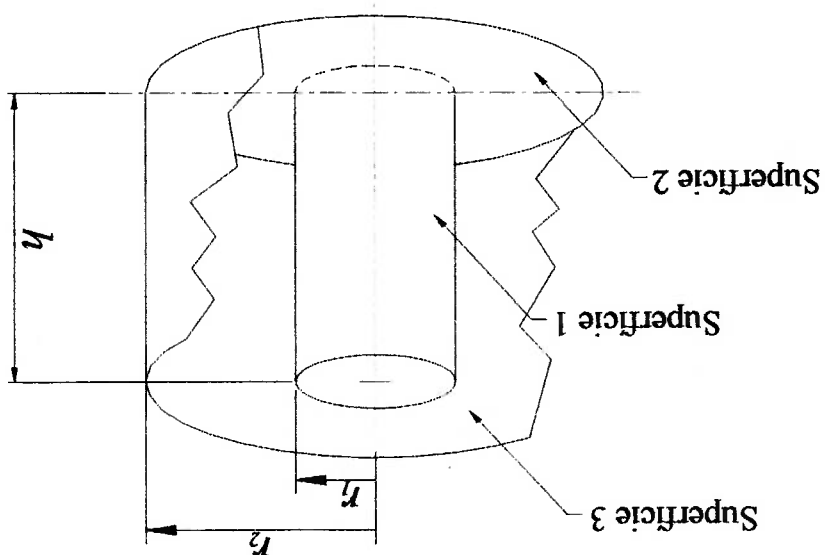
$$F_{1-2} = (1 - F_{1-3}) / 2 \quad (3.15)$$

Partindo-se do fator de forma para cilindros alinhados (eq. 3.13) e (eq. 3.14), pode-se empregar as relações de fatores de forma e simetria para obter as fatores de forma para algumas condições de desalinhamento. Este procedimento, porém requer cálculo iterativo que pode tornar-se complexo para discretizações mais severas. Rea (1975) oferece uma relação simples para esta geometria apresentada na figura 3.4.

Fator de forma entre cilindros concêntricos finitos desalinhados

A equação direta para determinação do fator de forma para cilindro e disco anular pode ser obtida opcionalmente em Borside (1990).

Figura 3.3: Configuração de cilindros e disco anular na base



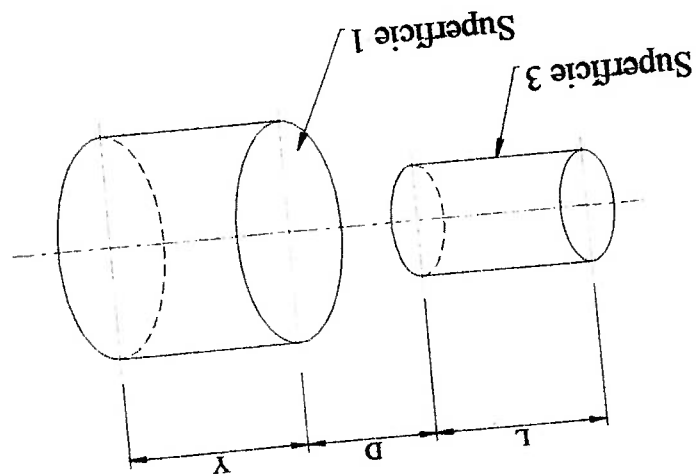


Figura 3.4: Configuração para cilindros concêntricos desalinhados.

O fator de forma da superfície 1 para a superfície 3 pode ser obtido por:

$$LF_{1-3} = (L+D) F^{(L+D)} + (Y+D) F^{(Y+D)} - D F^{(D)} - (L+D+Y) F^{(L+D+Y)} \quad (3.16)$$

onde $F^{(A)}$ é o fator de forma de cilindro de comprimento A para disco anular na base,

obtido da equação (eq. 3.15).

Fator de forma entre discos anulares coaxiais com diâmetros distintos bloqueados

por cilindro central

O fator de forma entre dois discos anulares coaxiais de mesmo diâmetro interno e diferentes diâmetros externos bloqueados, por cilindro formado pelos seus diâmetros internos (figura 3.5) foi parcialmente equacionado por Mimming (1979), que fornece o fator de forma da área infinitesimal de um dos anéis para o outro anel e sugere a integração numérica. Borside (1990) apresenta a fórmula integrada conforme segue abaixo:

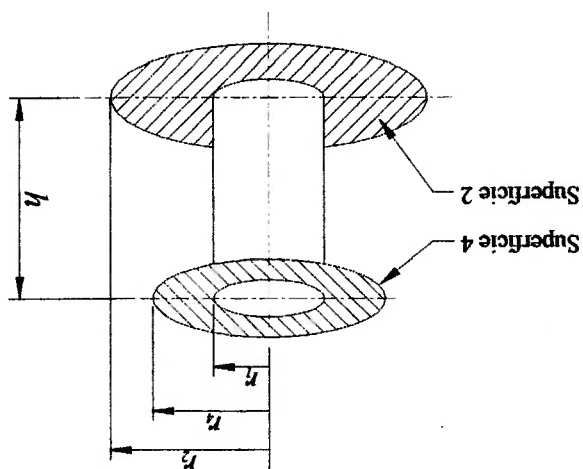


Figura 3.5: Configuração para discos coaxiais anulares bloqueados por cilindro

$$A_2 F_{2-4} = \frac{r_2^4 - r_1^4}{2} \cos^{-1} \frac{r_1}{r_2} + \frac{r_2}{2} \cos^{-1} \frac{r_1}{r_2}$$

$$\left[\frac{(r_2^4 + r_2^2 + h^2 + 2r_2 r_1)(r_2^2 r_2 - r_1^2 + \sqrt{r_2^2 - r_1^2} \sqrt{r_2^4 - r_1^4})}{(r_2^4 + r_2^2 + h^2 - 2r_2 r_1)(r_2^2 r_2 + r_1^2 - \sqrt{r_2^2 - r_1^2} \sqrt{r_2^4 - r_1^4})} \tan^{-1} \right]$$

$$- \sqrt{(r_2^4 + r_2^2 + h^2)^2 - 4r_2^2 r_1^2} \tan^{-1} \left[\frac{r_2^4 + r_2^2 + h^2 + 2r_2 r_1}{r_2^4 + r_2^2 + h^2 - 2r_2 r_1} \right]$$

$$+ \frac{2}{1} \sqrt{(r_2^4 + r_2^2 + h^2)^2 - 4r_2^2 r_1^2} \cos^{-1} \left[\frac{r_1(h^2 - r_2^2 + r_1^2)}{r_2(h^2 + r_2^2 + r_1^2)} \right]$$

$$+ \frac{2}{1} \sqrt{(r_2^4 + r_2^2 + h^2)^2 - 4r_2^2 r_1^2} \cos^{-1} \left[\frac{r_1(h^2 - r_2^4 + r_1^2)}{r_2(h^2 + r_2^2 + r_1^2)} \right]$$

$$+ 2r_1 h \left[\tan^{-1} \left(\frac{h}{\sqrt{r_2^2 - r_1^2} + \sqrt{r_2^4 - r_1^4}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{h}{\sqrt{r_2^2 - r_1^2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{h}{\sqrt{r_2^4 - r_1^4}} \right) \right] \quad (3.17)$$

onde:

$$A_2 = \pi(r_2^2 - r_1^2)$$

3.3.3 Transferência de Calor entre Superfícies Cinzentas Formando Invólucro

Conhecidos os fatores de forma e as propriedades das diversas superfícies envolvidas na troca de calor por radiação térmica, resta definir um algoritmo para determinar os fluxos de calor ou temperaturas nas mesmas.

Ao analisar a troca de calor por radiação entre superfícies internas e contíguas formando um invólucro, partiremos dos seguintes pressupostos:

- Cada superfície envolvida é isotérmica.
- Todas superfícies são difusas e opacas.
- Todas superfícies têm comportamento de corpo cinzento ($\epsilon_\lambda = \epsilon = \alpha$).
- A participação do fluido nas trocas por radiação térmica é desprezível (meio não participante).

- A irradiação e a radiosidade são uniformes nas superfícies, sendo a irradiação, G , definida como a radiação total incidente sobre uma superfície por unidade de tempo e área e a radiosidade, J , como a radiação total que deixa uma superfície por unidade de tempo e área.

A solução para o problema de invólucro com N superfícies, onde são conhecidos os fluxos de calor de algumas superfícies e as temperaturas das outras superfícies é descrita a seguir (Incropera, 1996).

O esquema da figura 3.6 apresenta o balanço energético para uma superfície. A emissão total que atinge a superfície i , G_{A_i} , é parcialmente refletida, ρG_{A_i} , e parcialmente

absorvida, α_{GA} . A diferença entre a energia emitida, $E_i A$, e a energia absorvida fornecerá o fluxo de calor líquido conduzido pela superfície, q_i .

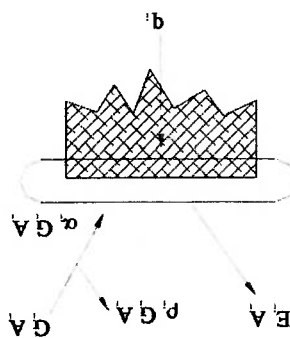


Figura 3.6: Balanço energético em superfície sujeita a radiação térmica

Assim, por sua definição, a radiossidade da superfície i , J_i será a soma do poder emissivo da superfície, E_i , e da energia refletida, ou seja:

$$J_i \equiv E_i + \rho_i G_i \quad (3.18)$$

Utilizando-se as equações de Stefan-Boltzman (eq. 3.7) e da refletividade para corpo cinzento e opaco (3.8) o fluxo líquido de calor na superfície pode ser obtido em função da radiossidade como:

$$q_i = \frac{\sigma T_i^4 - J_i}{1 - \varepsilon_i} / \varepsilon_i A_i \quad (3.19)$$

Considerando-se duas superfícies i e j , a parcela da radiossidade de i que atinge j é:

$$J_i A_i F_{ji}$$

e a parcela da radiossidade de j que atinge i será

$$J_j A_j F_{ji} = J_j A_i F_{ij}$$

$$[A][J]=[C]$$

Observa-se que no sistema de N equações formado:

da equação (3.19).
 Determinadas as radiosidades são calculados os fluxos de calor ou temperatura incógnitos das demais, a radiosidade de cada uma delas pode ser obtida pelas equações (3.22) e (3.23).
 por radiação térmica em um invólucro, as temperaturas de algumas delas e o fluxo de calor
 Desta maneira, conhecidos os fatores de forma das superfícies que trocam calor

$$J_i = \frac{q_i}{A_i} + \sum_{j=1}^N J_j F_{ji} \quad (3.23)$$

expressão:

Já para as superfícies com fluxo de calor conhecido, será utilizada a seguinte

$$J_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=1}^N J_j F_{ji} \quad (3.22)$$

conhecida, é conveniente exprimir a radiosidade como:

No conjunto de N superfícies, para as superfícies i onde a temperatura é

$$q_i = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{A_i F_{ji}} (A_i F_{ji}) \quad (3.21)$$

ou para N elementos,

$$q_{ij} = (J_i - J_j) / (A_i F_{ji}) \quad (3.20)$$

decorrendo a igualdade da reciprocidade. A troca líquida entre as superfícies será:

os $N \times N$ componentes da matriz A dependem apenas da geometria do conjunto e da emissividade das superfícies. Para os casos onde a temperatura da superfície é conhecida, os elementos desta matriz são dados por:

$$a_{ij} = -\frac{\varepsilon_i}{(1-\varepsilon_i)F_{ij}} \quad \text{para } i \neq j \quad (3.24)$$

$$a_{ij} = \frac{\varepsilon_i}{1-(1-\varepsilon_i)F_{ij}} \quad \text{para } i = j \quad (3.25)$$

ou, sendo o fluxo de calor conhecido:

$$a_{ij} = -F_{ij} \quad \text{para } i \neq j \quad (3.26)$$

$$a_{ij} = 1 - F_{ij} \quad \text{para } i = j \quad (3.27)$$

Os elementos da matriz C serão obtidos por:

$$c_i = \sigma T_i^4 \quad (3.28)$$

para temperatura conhecida e por

$$c_i = q_i / A_i \quad (3.29)$$

para fluxo de calor conhecido.

A radiosidade de cada superfície é então determinada por inversão da matriz A ou

por método iterativo.

Serão apresentadas a seguir correlações empíricas para a convecção natural.

3.4 Correlações empíricas para Convecção Natural

A superfície externa do reator exposta às condições ambientais, sofre resfriamento por convecção natural e radiação. A determininação de campos de velocidade e temperatura para o ar ambiente requer a solução das equações de Navier-Stokes, da continuidade e da energia acopladas.

Este conjunto de equações de conservação formam um sistema não linear de equações diferenciais acopladas, que tem soluções analíticas para regiões e condições de contorno muito específicas. Problemas reais tendem a apresentar geometrias bastante complexas, impossibilitando a resolução analítica. A disponibilidade de sistemas computacionais de alta capacidade de processamento permite hoje a resolução numérica dessas equações, tornando possível a solução de problemas complexos. Outras soluções podem ser obtidas de correlações empíricas.

As correlações empíricas são de grande utilidade na resolução de problemas de engenharia, já que são de simples aplicação, tornando desnecessárias soluções numéricas. Elas apresentam bons resultados quando são repetidas as condições experimentais de sua concepção.

Há na literatura diversas correlações para convecção natural. Normalmente são aplicadas para superfícies isotérmicas ou outros perfis de temperatura conhecidos ou ainda para fluxos de calor conhecidos. Seguem nos itens abaixo algumas correlações empíricas que serão utilizadas na modelagem do reator. Foram escolhidas dentre tantas outras por atenderem satisfatoriamente às condições da convecção externa do reator a plasma, tendo apresentado resultados coerentes em diversas aplicações experimentais.

3.4.1 Placa e Cilindro Verticais

Uma correlação empírica para determinação do coeficiente de convecção externa elaborada por Churchill e Chu (Incropera, 1996) para a placa vertical isotérmica e que pode ser aplicada para qualquer número de Rayleigh médio (Ra_L) é dada por:

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6} \left[1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{1/4}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{1/4}} \right\}^2 \quad (3.30)$$

com \overline{Nu}_L o número de Nusselt médio relativo ao comprimento da placa L e Pr o número de Prandtl do fluido.

Na expressão (3.30), as propriedades do fluido são tomadas à temperatura de filme T_f média entre temperatura da parede T_s e temperatura do fluido à distância T_∞ , ou seja:

$$T_f = (T_s + T_\infty)/2 \quad (3.31)$$

Observou-se que a correlação (3.30) pode também ser aplicada para problemas de fluxo de calor constante. Para tanto, deve-se tomar os valores das propriedades do fluido à temperatura na altura média da placa.

$$\Delta T_{L/2} = T_s(L/2) - T_\infty \quad (3.32)$$

Para cilindros verticais, os resultados acima continuam sendo válidos desde que a espessura da camada limite seja suficientemente pequena em relação ao diâmetro do cilindro D . Esta condição será satisfeita quando:

$$\frac{D}{L} \geq \frac{Gr_L^{1/4}}{35} \quad (3.33)$$

Onde Gr_L é o número de Grashof médio calculado com a altura L .

Alternativamente, a convecção natural pode ser calculada localmente, como sugerem Sparrow e Gregg (apresentada em Kakag, 1995) a partir de uma solução exata para camada limite laminar com fluxo de calor constante em parede vertical. Neste caso:

$$Nu_x = \frac{Gr_x^{1/5}}{1} = \frac{5^{1/5} \Theta(0)}{1} \quad (3.34)$$

com a constante $\Theta(0) = -1,3574$ para $Pr = 1$ e Gr_x o número de Grashof local.

A solução é satisfatória para Pr entre 0,1 e 100 e as propriedades do fluido devem ser tomadas com base na temperatura na saída da placa, ou seja:

$$\overline{(T_s - T_\infty)} = \frac{6}{5}(T_s - T_\infty)_L \quad (3.35)$$

3.4.2 Placa Horizontal

Em placas horizontais, o empuxo atua normalmente à superfície, alterando a

eficiência da troca de calor em relação às placas verticais. Para placas em que a troca de

calor ocorre na superfície inferior, a tendência do fluido ascender impulsiona-o contra a

placa. O fluido segue paralelamente à superfície e a troca térmica é dificultada.

Já placas com a superfície superior aquecida voltada ao fluido, geram correntes

ascendentes de fluido aquecido. Estas correntes causam queda de pressão junto à placa

aspirando parcelas frias do fluido em movimento descendente. Este mecanismo ocasiona

um considerável aumento no coeficiente de troca de calor por convecção.

As correlações de McAdams apresentadas em Incropera (1996) são indicadas para

o número Nusselt médio (Nu_L) dado por:

$$\overline{Nu_L} = 0,54 Ra_L^{1/4} \quad (10^4 \leq Ra_L \leq 10^7) \quad (3.36)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.15Ra_L^{1/3} \quad (10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}) \quad (3.37)$$

para face superior aquecida e

$$\overline{Nu}_L = 0.27Ra_L^{1/4} \quad (10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10}) \quad (3.38)$$

para face inferior a aquecida. Podem ser utilizadas para diferentes formatos de placas,

empregando-se para tanto o comprimento característico L definido como:

$$L \equiv \frac{A}{P} \quad (3.39)$$

onde A e P são respectivamente área e perímetro da placa.

Capítulo 4

MODELAGEM DO REATOR

A modelagem numérica de um reator a plasma apresenta grandes dificuldades, se considerados todos os detalhes construtivos do equipamento real. Na maioria dos casos, as propriedades dos resíduos a serem tratados podem não ser constantes, o reator costuma ter geometria complexa, o que impossibilita o enfoque bidimensional aqui adotado, e não opera em regime permanente. Assim sendo, a simulação de alguns transitórios pode tornar-se importante na avaliação do desempenho do equipamento.

Apesar das limitações descritas, um bom modelo simplificado costuma ser de grande valia na especificação de refratários e na determinação dos parâmetros de operação do processo, já que pode oferecer boa aproximação das variáveis do processo em condições pré-especificadas. Podemos, assim, validar o modelo confrontando-o com medições experimentais em situações próximas às hipotéticas da modelagem e estudar qual a consequência de interações específicas no reator real e visualizá-las no modelo.

O modelo de reator proposto neste trabalho é bidimensional em coordenadas cilíndricas e considera que o reator opera em regime transitório. Tendo em vista que a convecção representa para o reator, segundo a literatura (Parisi e Gauvin, 1989), uma parcela menor no processo a plasma de arco transferido, o presente modelo considera apenas as trocas de calor por radiação e condução no refratário.

O reator utilizado como base deste estudo é um equipamento experimental em escala piloto instalado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo,

apresentando revestimento refratário denso e tocha de arco transferido, apresentado na figura 4.1. Dados experimentais provenientes de um ensaio deste reator que será descrito a seguir foram empregados na validação do modelo proposto.



Figura 4.1: Foto do reator a plasma modelado instalado no IPT.

4.1 Descrição do Reator Modelado

A figura 4.2a apresenta esquematicamente o reator a plasma estudado, que tem forma cilíndrica e revestimento refratário misto. A tocha a plasma de arco transferido é revestida com cerâmica. A figura 4.2b mostra as diferentes regiões modeladas e o sistema de coordenadas empregado. A região compreendida entre a superfície externa indicada por

A B CD e a interna, E F GI, representa o revestimento refratário, enquanto que a região delimitada por AJLKE refere-se à tocha de plasma revestida. O arco de plasma é representado na região HJLL, sendo que JL é a região do catodo e IH é a região do anodo, comumente denominada pé do arco. A região IG delimita a superfície do banho metálico dentro do reator.

A tocha de plasma é revestida por uma espessa camada cerâmica e apresenta um eficiente isolamento térmico para com este. Como adicionalmente o diâmetro da tocha é bastante pequeno se comparado ao diâmetro da cerâmica, os efeitos térmicos da tocha foram desconsiderados no modelo, admitindo-se apenas a influência do revestimento.

A carga do reator, superfície delimitada por A, B, C e D na figura 4.2b, é constituída por chapa metálica de 6,5 milímetros de espessura e troca calor por convecção natural e radiação com o ambiente externo.

Através de termopares instalados no revestimento refratário do reator, conforme indicado na figura 4.2, as temperaturas locais foram medidas durante ensaio de aquecimento no reator com uma carga de 76 kg de ferro, que é fundido e solidificado durante o experimento.

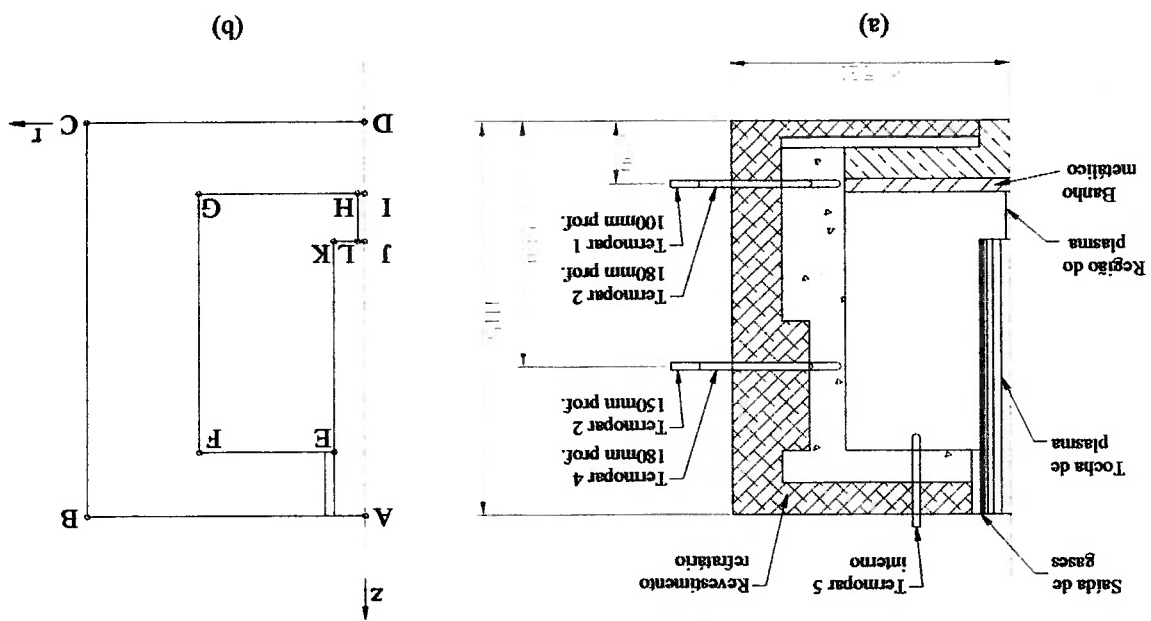


Figura 4.2: Esquema do: (a) reator a plasma (b) regiões modeladas

As temperaturas medidas e a potência fornecida durante os períodos de aquecimento e resfriamento do reator foram obtidas por sistema de aquisição de dados, com placa Viewdac instalado em computador Pentium 233 MHz. A potência fornecida pelo plasma medida na saída do reificador de plasma foi linearizada e utilizada como entrada no modelo do reator. A figura 4.3 apresenta as curvas de potência medida e linearizada pela média nos respectivos patamares de potência.

O gás de estabilização do plasma é argônio, com vazão oscilando entre 5 e 20 NI/min. Os gases do reator são exauridos por fresta no refratário junto à tocha de plasma no ponto E da figura A.

para algumas condições específicas. Supõe-se, em geral, que o escoamento seja laminar
A modelagem numérica de arcos de plasma é encontrada na literatura (Hsu,1983)

vinculadas à temperatura. Ocorre também forte emissão de calor por radiação térmica.
por grandes gradientes de temperatura e, conseqüentemente, das propriedades do fluido
A região do arco de plasma, indicada na figura 4.2a, caracteriza-se primeiramente

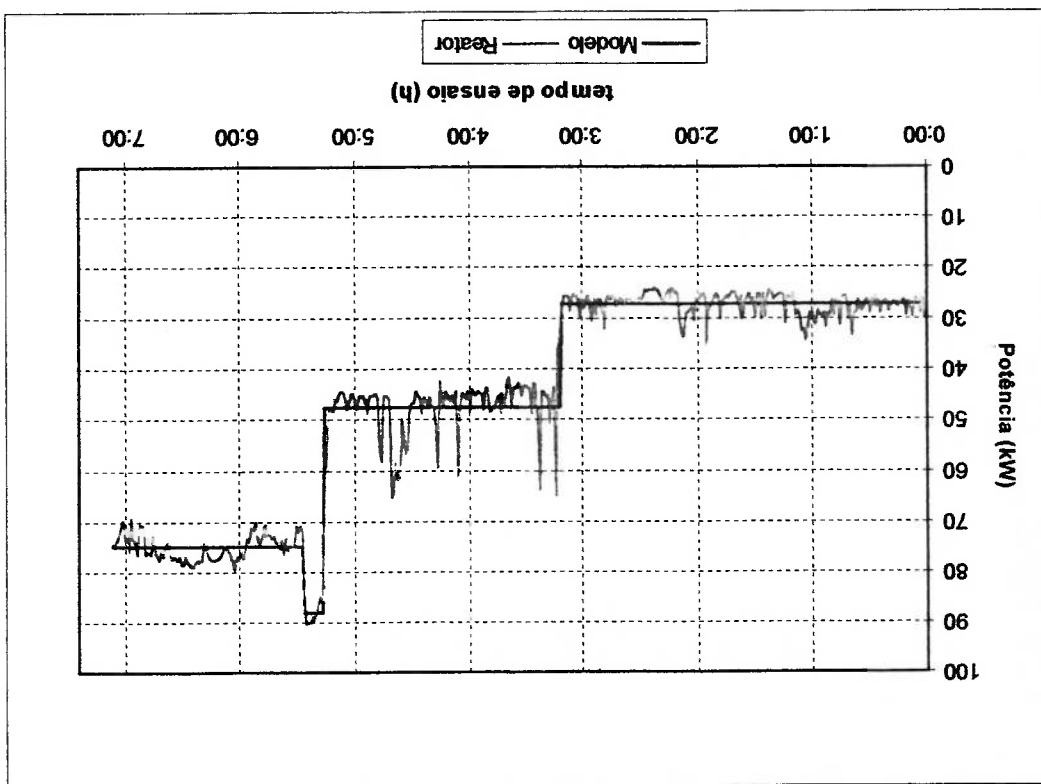
4.2 Modelo na Região do Plasma

na figura 4.2b.

A seguir descreveremos o modelo proposto para cada uma das regiões delimitadas

reator e curva adotada no modelo.

Figura 4.3: Gráfico comparativo da curva de potência fornecida durante ensaio do



devido à alta viscosidade do fluido, à baixa densidade e a vazões pequenas do gás de estabilização, para o caso de arco transferido. Empuxo, dissipações viscosas e reabsorção de radiação térmica são desprezados.

Além das equações de conservação do escoamento no plasma, é necessária a resolução concomitante de equações para campo magnético e potencial elétrico. Na solução numérica destas equações, a malha utilizada para modelagem da tocha com resultados consistentes deve ser bastante fina, exigindo um razoável comprometimento do processador.

Entretanto, trabalhos experimentais (Gauvin 1988, Parisi 1991) indicam que somadas, a energia transferida por radiação e por efeito Joule no anodo, representam mais de 90% da energia total transferida pelo plasma. A baixa vazão de gás de plasma reforça essa condição, uma vez que a sua entalpia total para temperaturas da ordem de 10.000 °C esperadas em regiões próximas ao arco é pequena em relação à potência total fornecida. Gauvin e Parisi (1989) sugerem que entre 40% e 50% da energia do plasma é absorvida no anodo por efeito Joule e radiação sendo a energia restante emitida para o meio. Esse valor, obviamente, é bastante variável em função do gás empregado, comprimento do arco, vazão do gás, condições do anodo, entre outros, mas demonstrou ser bastante razoável em diversas medições (Bender, 1990).

Assim sendo, e considerando que a região do plasma é normalmente pequena em relação ao reator, optamos por impor condições de contorno nesta região ao invés de modelá-la numericamente.

O modelo ora proposto substitui a tocha de plasma por superfície cilíndrica negra representada por LH na figura 4.2b e considera trocas de calor apenas por radiação térmica para o anodo, região IH na figura. Admite-se que a radiação é emitida por superfície

cilíndrica negra de diâmetro de 4 mm entre o pé do arco e o catodo (trecho I-J da figura A). Os resultados são apresentados no capítulo 5. Discutiremos a seguir a troca de calor entre superfícies internas do reator no modelo.

4.3 Modelo na Região Interna do Reator

Na região interna do reator, delimitada na figura 4.2 por EFGHIJK, a principal forma de transmissão de energia entre as superfícies é a radiação térmica. Grande parte da energia fornecida pela tocha de plasma é transferida ao reator por radiação, pela superfície HL, como já discutido no item 4.3. As trocas térmicas entre as diversas superfícies internas do reator ocorrem principalmente por radiação quando operando a altas temperaturas, tendendo a homogeneizar as temperaturas superficiais internas. O modelo desconsidera as demais formas de transferência de calor entre as superfícies internas do reator.

A figura 4.4 mostra a discretização das superfícies do reator empregada nos cálculos da energia transferida por radiação.

As várias hipóteses assumidas no modelo de radiação na região interna serão discutidas a seguir.

Superfícies cinzentas isotérmicas

Os refratários tendem a apresentar comportamento cinzento, a emissão direcional costuma ser bastante difusa, exceto para ângulos muito próximos à superfície. Para alguns refratários, a emissividade espectral pode ser bastante variável em função de comprimento de onda. Porém, este efeito tende a ser minimizado se as superfícies forem constituídas de mesmo material.

Tendo em vista estas considerações, cada elemento discretizado da superfície interna do reator foi considerado cinzento e isotérmico. A condição de temperatura constante em cada elemento, necessariamente para que a formulação apresentada no item 3.3.3 seja válida, pode ser aproximada pela redução das dimensões dos elementos da malha. A simulação de operação do reator a temperaturas mais elevadas tende a aumentar as trocas por radiação, reduzindo gradientes de temperatura nas superfícies internas e, como decorrência, menores são as diferenças de temperatura dentro das áreas elementares.

Reflexão difusa

No modelo adotado, as superfícies refletem parte da radiação incidente que é distribuída difusamente para as demais superfícies. Esta hipótese é bastante razoável, excetuando-se os casos de banho líquido, quando algum comportamento especular é esperado.

Méio não participante

A atmosfera interna do reator é formada pelo gás de plasma, por gases gerados pelo resíduo tratado e por eventuais infiltrações no reator. Quando o gás de plasma empregado é argônio, nitrogênio, hidrogênio, hélio ou ar seco entre outros, a influência deste na troca por radiação às temperaturas do reator pode ser desprezada. Se considerado que o reator opera com pressão positiva, a infiltração de ar externo pode ser desprezível, evitando-se a entrada de umidade.

A maior possibilidade de desvio da hipótese de méio não participante, provém do resíduo a ser tratado. Dependendo da forma de alimentação, podem ser gerados materiais particulados que, quando em suspensão na atmosfera do reator, absorvem grande parte das

emissões radioativas, concentrando a energia liberada pelo plasma nas regiões próximas ao mesmo. Efeito similar ocorrerá se o resíduo alimentado contiver umidade, ou se ocorrerem reações internas no resíduo gerando gases como CO₂, CO, SO_x, H₂O, entre outros.

Durante o ensaio do reator empregado para validação do modelo, não houve alimentação de cinzas e o reator operou com pressão positiva de argônio, evitando infiltração de ar. Essas condições tornam as hipóteses assumidas plausíveis para a concepção do modelo.

4.3.1 Discretização da Superfície Interna

A figura 4.4 apresenta a discretização das superfícies internas do reator adotada no modelo. A região correspondente àquela indicada na figura 4.2b pelos pontos E, F, G, H, L e K, formando um invólucro fechado. A fresta entre tocha e refratário no ponto E da figura 4.2 foi desconsiderada no modelo por apresentar dimensões reduzidas.

O modelo adota para os elementos 1 a 46 a formulação de troca de calor por radiação entre superfícies cinzentas em invólucro fechado apresentada no item 3.5.3. As superfícies cilíndricas de número 14 a 17, da figura 4.4, é imposto fluxo de calor constante com características de corpo negro. As demais é imposta temperatura constante obtida do modelo de condução apresentado em item posterior.

As dimensões da malha, assim como as emissividades e as condições impostas às superfícies nos cálculos de troca de calor por radiação são apresentados na tabela 4.1.

Figura 4.4: Discretização das superfícies internas no modelo do reator.

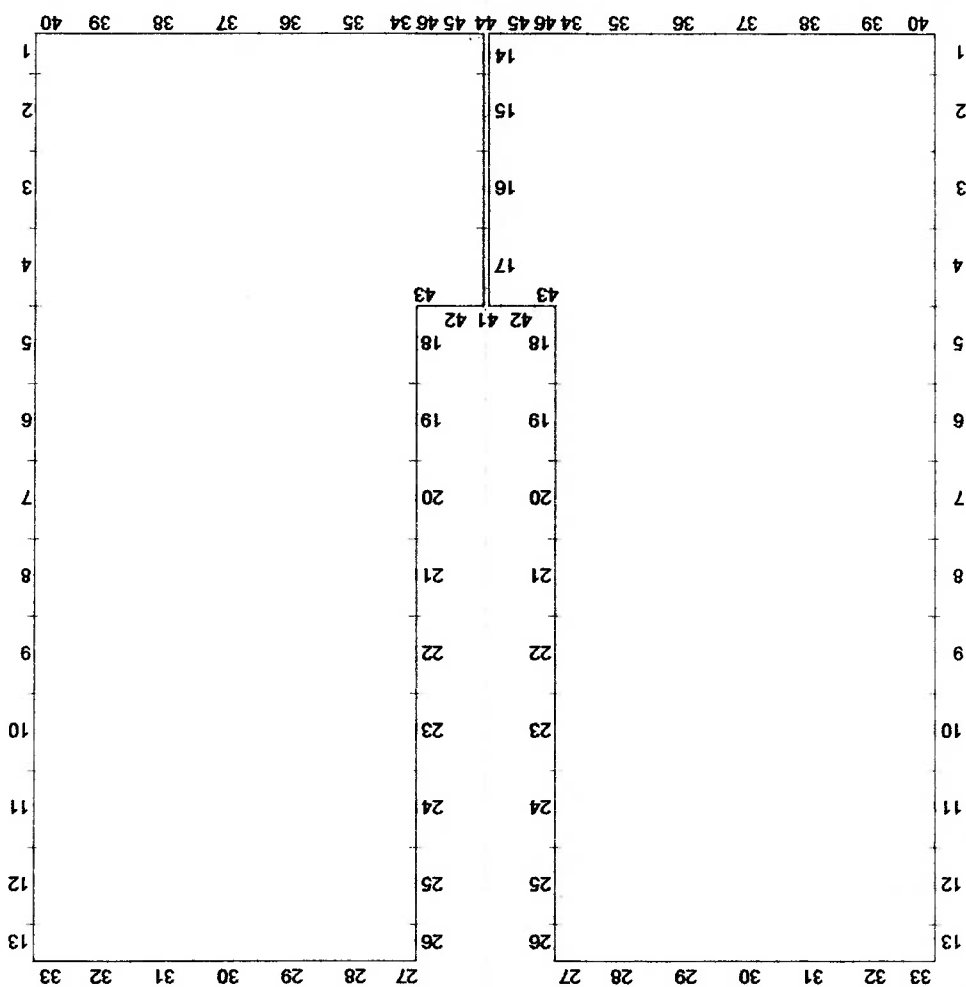


Tabela 4.1: Características das superfícies internas do modelo.

Sup.	Raio Interno (mm)	Raio Externo (mm)	Altura (mm)	Emissividade	Condição imposta
1	27,9	55,8	0,8	T cte.	0,8
2	55,8	0,8	T cte.	0,8	0,8
3	55,8	0,8	T cte.	0,8	0,8
4	55,8	0,8	T cte.	0,8	0,8
5	55,8	0,8	T cte.	0,8	0,8
6	55,8	0,8	T cte.	0,8	0,8
7	55,8	0,8	T cte.	0,8	0,8
8	55,8	0,8	T cte.	0,8	0,8
9	55,8	0,8	T cte.	0,8	0,8
10	55,8	0,8	T cte.	0,8	0,8
11	55,8	0,8	T cte.	0,8	0,6
12	55,8	0,8	T cte.	0,8	0,6
13	27,9	0,8	T cte.	0,8	0,6
14	27,9	1	Q cte.	1	0,6
15	55,8	1	Q cte.	1	0,6
16	55,8	1	Q cte.	1	0,6
17	55,8	1	Q cte.	1	0,6
18	55,8	0,8	T cte.	0,8	0,8
19	55,8	0,8	T cte.	0,8	0,8
20	55,8	0,8	T cte.	0,8	0,8
21	55,8	0,8	T cte.	0,8	0,6
22	55,8	0,8	T cte.	0,8	0,6
23	55,8	0,8	T cte.	0,8	0,6
24	50	73	0,8	T cte.	0,8
25	55,8	0,8	T cte.	0,8	0,8
26	27,9	0,8	T cte.	0,8	0,8
27	50	73	0,8	T cte.	0,8
28	73	119	0,8	T cte.	0,8
29	119	165	0,8	T cte.	0,8
30	165	211	0,8	T cte.	0,8
31	211	257	0,8	T cte.	0,8
32	257	303	0,8	T cte.	0,8
33	303	326	0,8	T cte.	0,8
34	50	73	0,6	T cte.	0,6
35	73	119	0,6	T cte.	0,6
36	119	165	0,6	T cte.	0,6
37	165	211	0,6	T cte.	0,6
38	211	257	0,6	T cte.	0,6
39	257	303	0,6	T cte.	0,6
40	303	326	0,6	T cte.	0,6
41	0,5	11	0,8	T cte.	0,8
42	11	35	0,8	T cte.	0,8
43	35	50	0,8	T cte.	0,8
44	0,5	11	0,6	T cte.	0,6
45	11	35	0,6	T cte.	0,6
46	35	50	0,6	T cte.	0,6

4.3.2 Fatores de Forma entre as Superfícies Internas do Modelo

Descrevemos a seguir os procedimentos empregados na determinação dos fatores de forma entre as superfícies internas do reator a plasma, formando um invólucro fechado, representado na figura 4.5.

Observamos que alguns fatores de forma, como por exemplo entre as superfícies 26 e 27 ou 20 e 7, podem ser obtidos diretamente das equações para anéis e discos concêntricos apresentadas no item 3.5, ou indiretamente com o uso da reciprocidade (eq.

3.9). Grande parte dos fatores de forma são obtidos após alguma manipulação das equações empregando-se álgebra de fator de forma, como será apresentado em seguida.

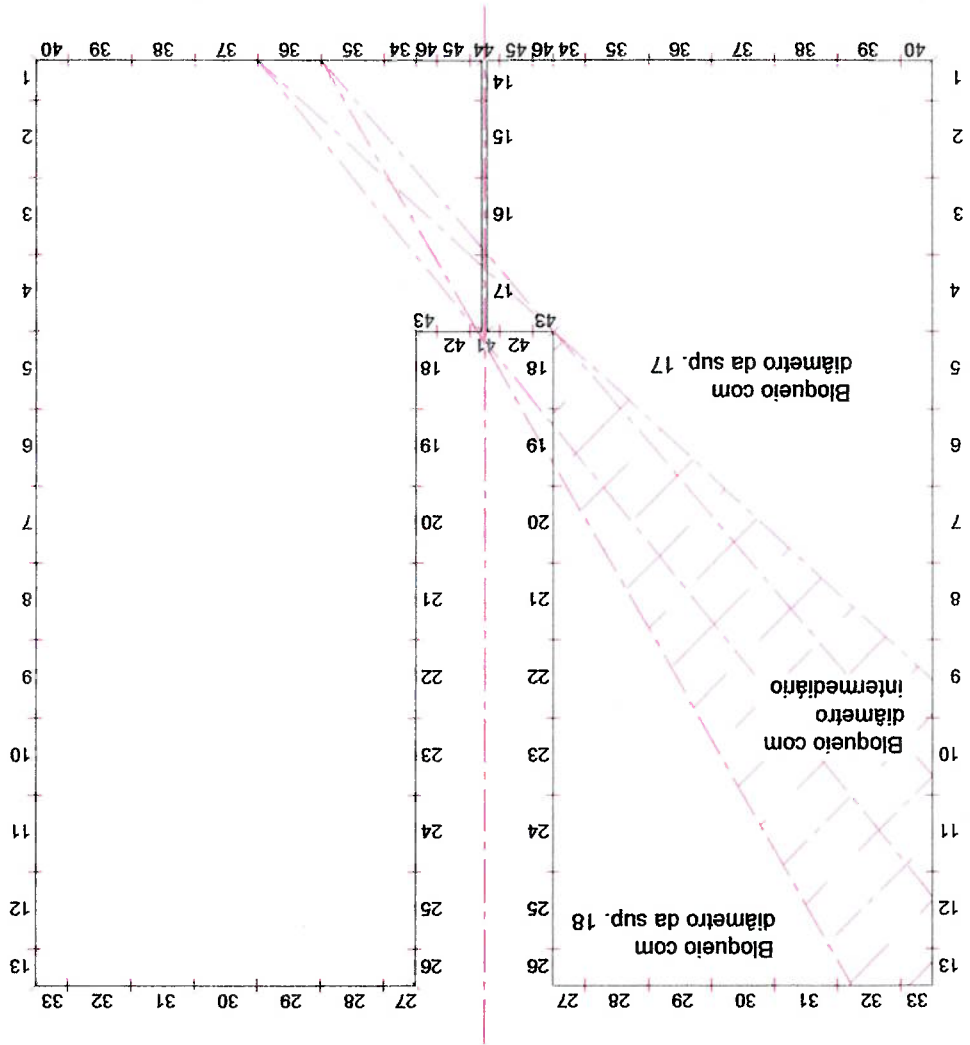


Figura 4.5: Discretização das superfícies internas no modelo do reator indicando sombreamento parcial de uma superfície.

Muitos fatores de forma, porém, não poderão ser determinados diretamente devido à influência do degrau definido pelos vértices entre as superfícies 43 e 18, e 17 e 34 na figura 4.5. Para a superfície 36, como exemplificado na figura, são definidas três regiões de influência. Os fatores de forma entre as superfícies 36 e 1 a 8, e entre 36 e as superfícies do

banho são calculados pelas fórmulas do item 3.5.2 entre discos e anéis concêntricos bloqueados por cilindro após alguma manipulação. Para essas áreas, o bloqueio é exercido por cilindro de raio igual ao das superfícies 14 a 17. Da mesma forma são calculados os fatores de forma entre a superfície 36 e as superfícies 27 a 30, porém considerando que o raio do cilindro de bloqueio é o das superfícies 18 a 26. Para superfícies da região intermediária onde há influência do degrau, no caso superfícies de 9 a 13 e 32 e 33, é necessária a obtenção dos fatores de forma por integração numérica, que será detalhada em item posterior.

A seguir apresentaremos as soluções algébricas para os fatores de forma entre superfícies não influenciadas pelo degrau.

Determinação algébrica de fatores de forma

Considere-se o invólucro fechado apresentado na figura 4.6, representando um anel externo (3a a 3c) concêntrico a um anel interno (1a a 1c) de mesmos comprimentos e alinhados, fechados em suas extremidades por dois discos anulares (2a a 2c e 4a a 4c). Os índices a, b e c representam a divisão das superfícies totais em 3 partes quaisquer. Os anéis 3a, 3b e 3c têm extremidades alinhadas com 1a, 1b e 1c. Esta nomenclatura será empregada na determinação dos fatores de forma entre superfícies discretizadas de anéis e discos anulares bloqueados por cilindro central que passaremos a demonstrar. Os índices 1, 2, 3 ou 4 representarão as áreas totais das superfícies envolvidas. Assim o índice 1 nas equações a serem apresentadas poderá representar a soma das superfícies 1a e 1b ou 1a, 1b e 1c, conforme necessário em cada circunstância.

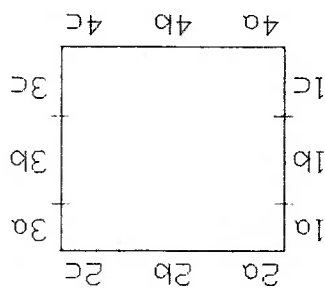


Figura 4.6: Invólucro fechado para determinação das equações de fatores de forma entre superfícies discretizadas.

entre superfícies discretizadas.

a) *Fatores de forma entre disco anular e anel interno concêntricos e não contíguos*

Considere-se na configuração apresentada na figura 4.6 as superfícies 1a, 1b, 2a e

2b. Da equação 3.11, temos que o fator de forma entre os elementos 1 e 2 é dado por:

$$F_{1-2} = F_{1-2a} + F_{1-2b}$$

Aplicando-se a reciprocidade (3.9) temos:

$$A_1 F_{1-2} = A_1 F_{1-2a} + A_{2b} (F_{2b-1a} + F_{2b-1b})$$

e aplicando novamente a reciprocidade para último termo equação acima, obtêm-se após

rearranjo:

$$A_{2b} F_{2b-1b} = A_1 (F_{1-2} - F_{1-2a}) - A_{1a} (F_{1a-2} - F_{1a-2a}) \quad (4.1)$$

onde os fatores de forma à direita da equação são obtidos da equação 3.15. Esta equação foi aplicada entre discos anulares e anéis internos do modelo não influenciados pelo degrau, por exemplo entre as superfícies 25 e 30 ou 15 e 36 na figura 4.5.

b) *Fator de forma entre discos anulares concêntricos de raios quaisquer bloqueados por cilindro central*

Para os discos anulares 2a, 2b, 4a e 4b da figura 4.6, a formulação empregada no desenvolvimento de 4.1 também é válida, resultando em:

$$A_{4b} F_{4b-2b} = A_2 (F_{2-4} - F_{2-4a}) - A_{2a} (F_{2a-4} - F_{2a-4a}) \quad (4.2)$$

sendo os fatores de forma a direita da igualdade obtidos da equação 3.11. A equação 4.2 será empregada na determinação dos fatores de forma entre discos anulares superiores inferiores não influenciadas pelo degrau, como superfícies 32 e 39 ou 45 e 43 da figura 4.5.

c) *Fator de forma entre disco anular e anel externo concêntricos e não contíguos de raios quaisquer bloqueados por cilindro central*

Considerando-se o invólucro fechado definido por todas as superfícies da figura 4.6, teremos da equação 3.10:

$$F_{2c-3} = 1 - F_{2c-4} - F_{2c-1}$$

e da equação 3.11 temos:

$$F_{4-2} = F_{4-2a2b} + F_{4-2c}$$

$$F_{1-2} = F_{1-2a2b} + F_{1-2c}$$

e das três equações obtemos com a equação 3.9:

$$A_{2c} F_{2c-3} = 1 - A_4 (F_{4-2} - F_{4-2a2b}) - A_1 (F_{1-2} - F_{1-2a2b}) \quad (4.3)$$

onde os fatores de forma à direita da igualdade são obtidos pelas equações 3.15 e 3.17. Para discos anulares e anéis externos não contíguos vale o mesmo desenvolvimento da equação 4.1, gerando para as superfícies 2b, 2c, 3a e 3b:

$$A_{2b} F_{2b-3b} = A_2 (F_{2-3} - F_{2-3a}) - A_{2c} (F_{2c-3} - F_{2c-3a}) \quad (4.4)$$

onde os fatores de forma à direita da igualdade são obtidos da equação 4.3. Desta forma são obtidos os fatores de forma entre todos os discos anulares e anéis externos da figura 4.5.

d) Fator de forma entre anéis externos não contíguos bloqueados por cilindro central

Para as superfícies 1, 2, 3a, 3b e 4 da figura 4.6, onde a superfície 1 será considerada da mesma altura de 3a+3b e 4 formando invólucro fechado, teremos da equação 3.10 para a superfície 3a:

$$F_{3a-1} + F_{3a-2} + F_{3a-3a} + F_{3a-3b} + F_{3a-4} = 1$$

e da equação 3.11 para a superfície 2 com o uso da equação 3.9:

$$A_2 F_{2-3} = A_2 F_{2-3b} + A_{3a} F_{3a-2}$$

resultando em:

$$A_{3a} F_{3a-3b} = 1 - A_1 F_{1-3a} - A_2 (F_{2-3} - F_{2-3b}) - A_{3a} (F_{3a-4} - F_{3a-3a}) \quad (4.5)$$

onde F_{1-3a} é obtido da equação 3.16, F_{2-3} , F_{2-3b} , F_{3a-4} e F_{3a-3a} são obtidos da equação 3.14

com a aplicação das equações 3.9 e 3.10.

Considerando-se agora todos elementos da figura 4.6, teremos da equação 3.11:

$$F_{3a-3c} = F_{3a-3b3c} - F_{3a-3b} \quad (4.6)$$

onde os fatores de forma à direita da igualdade são obtidos da equação 4.5. Resultam, assim, (fig. 4.5) os fatores de forma entre os anéis externos não influenciados pelo degrau.

Passaremos a apresentar o método empregado na integração numérica.

Todos os fatores de forma obtidos pelas equações apresentadas anteriormente resultam de soluções exatas. A presença do degrau contíguo às áreas 43 e 18, e 17 e 41 da figura 4.5, porém, leva-nos a uma resolução numérica para determinação dos fatores de forma onde há influência do mesmo.

Para tanto, será necessária a definição de algumas dimensões características do problema.

Dimensões características

Na figura 4.7, são apresentadas as circunferências 1 e 2 de raios r_1 e r_2 respectivamente e o cilindro de raio r_m e comprimento H_2 , todos concêntricos. A circunferência 2 encontra-se alinhada com a face superior do cilindro e a circunferência 1 encontra-se à altura H_1 abaixo da base do cilindro.

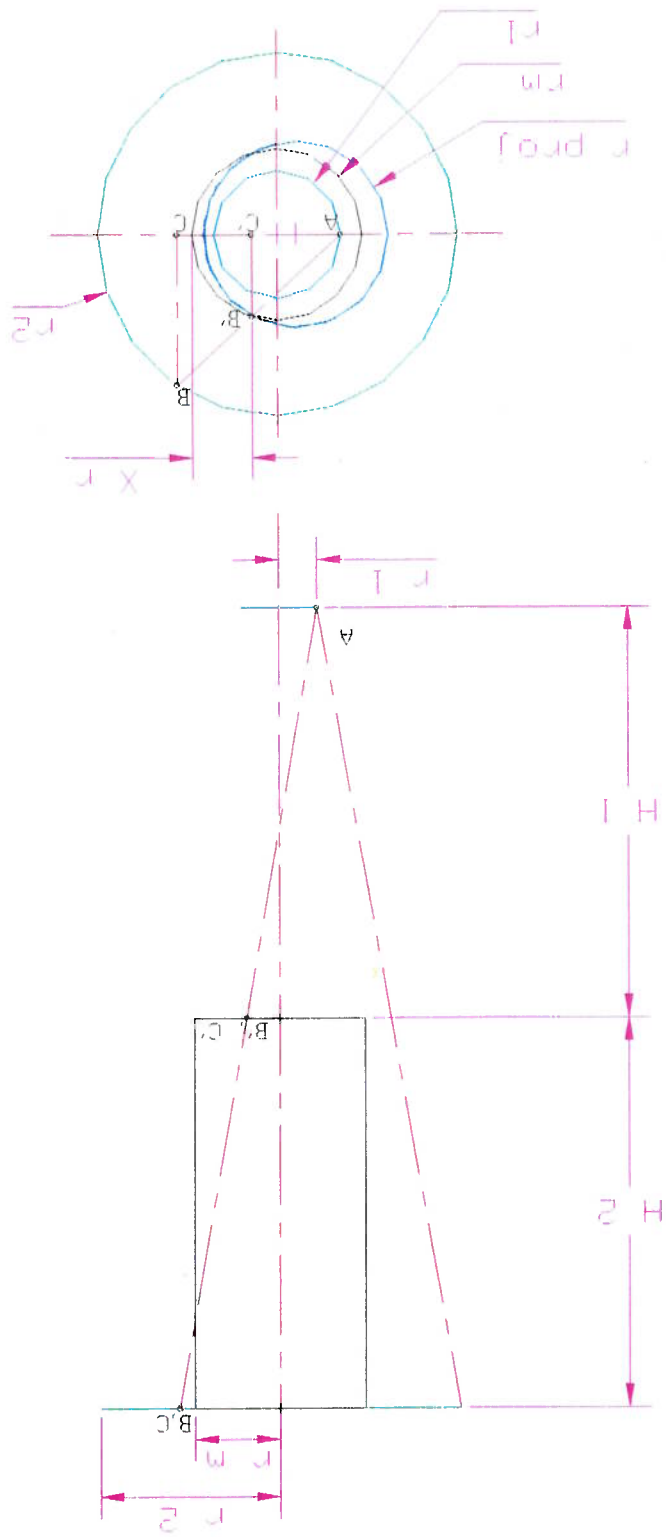


Figura 4.7: Esquema com duas circunferências bloqueadas por cilindro concêntricos.

Na configuração arbitrária apresentada, o ponto B e seu simétrico relação ao eixo AC são os únicos pontos da circunferência alinhados com o ponto A e a circunferência da base do cilindro. Eles definem-se pela interseção da circunferência da base do cilindro e a projeção da circunferência 2 no plano da base do cilindro em relação ao ponto A. O raio da circunferência projetada é obtido por semelhança de triângulos como:

$$r_{proj} = r_2 / A \tag{4.7}$$

onde

$$A = (H2+H1) / H1$$

A medida Xr indicada na figura 4.7, é definida pela igualdade dos catetos dos triângulos retângulos de hipotenusas r_{proj} e r_m , indicados na figura 4.8b:

$$r_m^2 - (r_m - Xr)^2 = r_{proj}^2 - (r_1 / B + r_m - Xr)^2$$

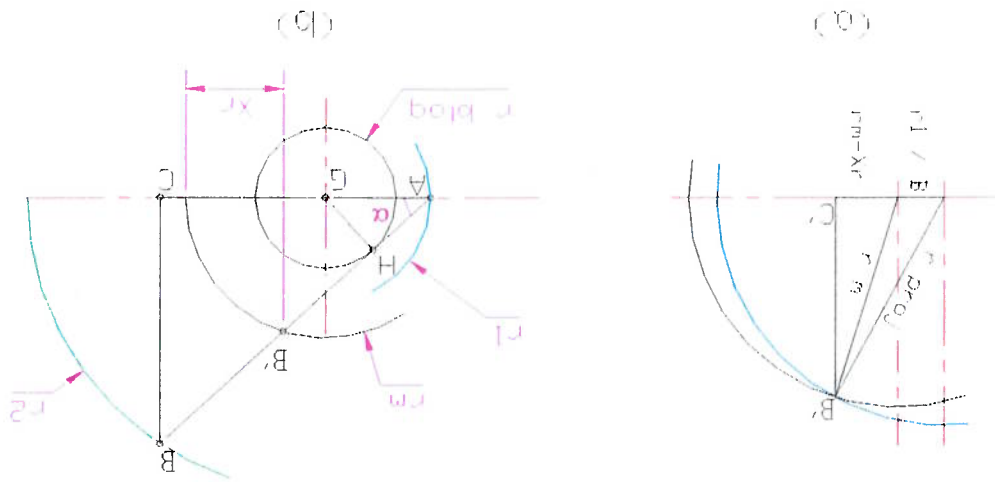
onde

$$B = (H2+H1) / H2$$

Isolando Xr obtemos

$$Xr = B \frac{r_m^2 - r_{proj}^2}{2r_1} + \frac{2B}{r_1} + r_m \tag{4.8}$$

Figura 4.8: Esquema para determinação de Xr (a) e r^{blog} (b).



Uma última dimensão será necessária para integração numérica proposta.

Considere-se na figura 4.8b as circunferências concêntricas de raios r_1 , r_m e r^{blog} , onde o segmento AH é tangente à última. Por semelhança dos triângulos definidos por A, B e C e A, G e H, obtém-se com o uso do teorema de Pitágoras que:

$$r^{blog} = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 - (r_m - Xr)^2 + (r_2 - r_m + Xr)^2}} \sqrt{r_2^2 - (r_m - Xr)^2} \quad (4.9)$$

Voltando à figura 4.7, observamos que r^{blog} representa o raio do cilindro que, posicionado concentricamente sob o cilindro de raio r_m , tem a reta AH tangente. Desta forma, nas regiões de influência do degrau, como representadas na figura 4.4, os mesmos fatores de forma já apresentados podem ser integrados para as superfícies, empregando-se um raio equivalente de valor r^{blog} menor que o raio r_m e maior que r_{pl} .

Podemos definir a partir dos dimensionais apresentadas algumas situações:

a) circunferência com $r_1 > r_m$

Para circunferências em que r_1 é maior do que r_m , nunca haverá bloqueio completo

entre os superfícies. Neste caso teremos:

$$- \text{Se } Xr < 0,$$

significa que r_{bloq} e r_m não se cruzam no plano da base do cilindro, sendo que só haverá

influência da região abaixo do cilindro.

$$- \text{Se } Xr > r_m - r_m^2 / r_1,$$

só há influência do cilindro de raio r_m , não do degrau. O valor à direita da desigualdade é

obtido a partir da figura 4.8b igualando-se r_{bloq} e r_m quando r_1 é maior que r_m .

$$- \text{Se } 0 < Xr < r_m - r_m^2 / r_1,$$

o sombreamento é parcial e exercido por cilindro de raio r_{bloq} definido na equação 4.9.

b) Circunferência com $r_1 < r_m$

Circunferências com raio menor que r_m poderão ser completamente bloqueadas

em alguns casos. Os limites serão:

$$- \text{Se } Xr > 0,$$

novamente não há influência do degrau. Apenas da região abaixo do mesmo.

conclui-se que o sombreamento é completo entre as duas circunstâncias.

$$- \text{Se } Xr > 2r_m,$$

A região intermediária é subdividida em duas situações:

$$- \text{Se } 0 < Xr < r_m + r_i,$$

então o ângulo α da figura 4.8b é menor que 90° e define-se r^{bloq} como base de cálculo dos

fatores de forma da equação 4.9.

$$- \text{Se } r_m + r_i < Xr < 2r_m,$$

o ângulo α da figura 4.8b é maior que 90° e o raio r^{bloq} perde significado. O fator de forma

será então calculado baseado em $r^{bloq} = r_i$ e multiplicado por variável inversamente

proporcional a α :

$$K = \frac{\pi - \alpha}{\pi/2}$$

(4.10)

Será demonstrado no capítulo 5 que tal aproximação introduz erro desprezível no

modelo.

Apresentaremos a seguir a metodologia empregada na integração numérica da

superfícies representadas na figura 4.4.

A integração numérica dos fatores de forma foi realizada entre trechos de discos anulares e anéis externos, discos anulares e anéis internos, anéis internos e anéis externos e entre discos anulares. Com o uso das dimensões características apresentadas no item anterior, os procedimentos para determinação dos diversos fatores de forma são bastante similares.

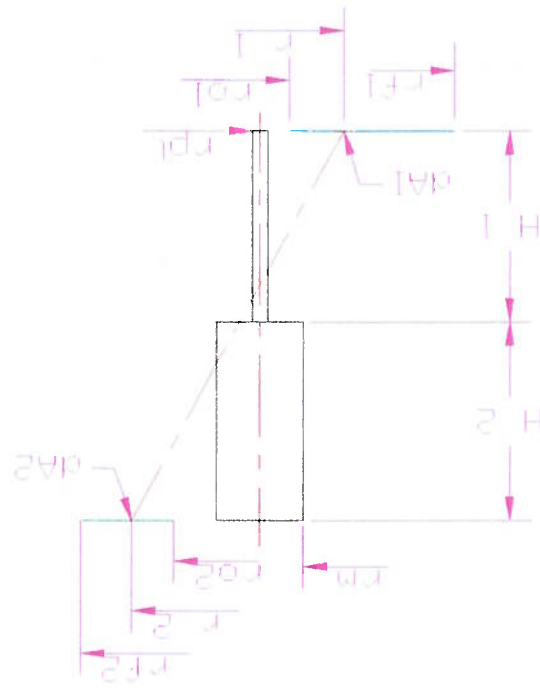


Figura 4.9: Esquema para integração numérica de fator de forma entre discos anulares bloqueados por cilindro central parcialmente sombreados por degrau.

A figura 4.9 apresenta esquema para integração entre dois discos anulares. Sendo A_1 a área do disco anular 1 delimitada entre os raios r_{o1} e r_{i1} e A_2 a área do disco anular 2 delimitada entre os raios r_{o2} e r_{i2} , temos da equação 3.12 que:

$$A_1 F_{1-dA2} = \sum_{A1}^{A2} F_{dA1-dA2} dA1 \tag{4.11}$$

e pela equação 3.11

$$F_{1-2} = \sum_{A2}^{A1} F_{1-dA2} \tag{4.12}$$

O fator de forma $F_{dA1-dA2}$ é obtido da equação 4.2, empregando-se o valor de r_{proj}

local apresentado na equação 4.9 com as limitações impostas no item anterior para Xr e

r_{proj} .

As equações 4.11 e 4.12 são empregadas também nas outras configurações,

alterando-se apenas as variáveis, limites e a equação do fator de forma discretizado. Desta

forma, para o fator de forma entre disco anular e anel externo, área A_2 passa a ser definida

por uma altura dh_2 variando entre os limites ho_2 e hf_2 . A equação 4.4 fornece o fator de

forma a ser empregado para $F_{dA1-dA2}$.

Para fatores de forma entre anéis externos, os raios r_1 e r_2 são iguais ao valor do

raio externo, variando as alturas h_1 e h_2 entre os limites requeridos. $F_{dA1-dA2}$ é governado

pela equação 4.6.

Na determinação dos fatores de forma entre anel interno na superfície abaixo do

degrau e anel externo ou disco anular superior, foi empregada uma solução simplificada.

Como o raio do plasma r_{pi} adotado no modelo é bastante pequeno em relação aos raios r_m e

r_2 , a discretização foi implementada apenas na superfície do cilindro menor.

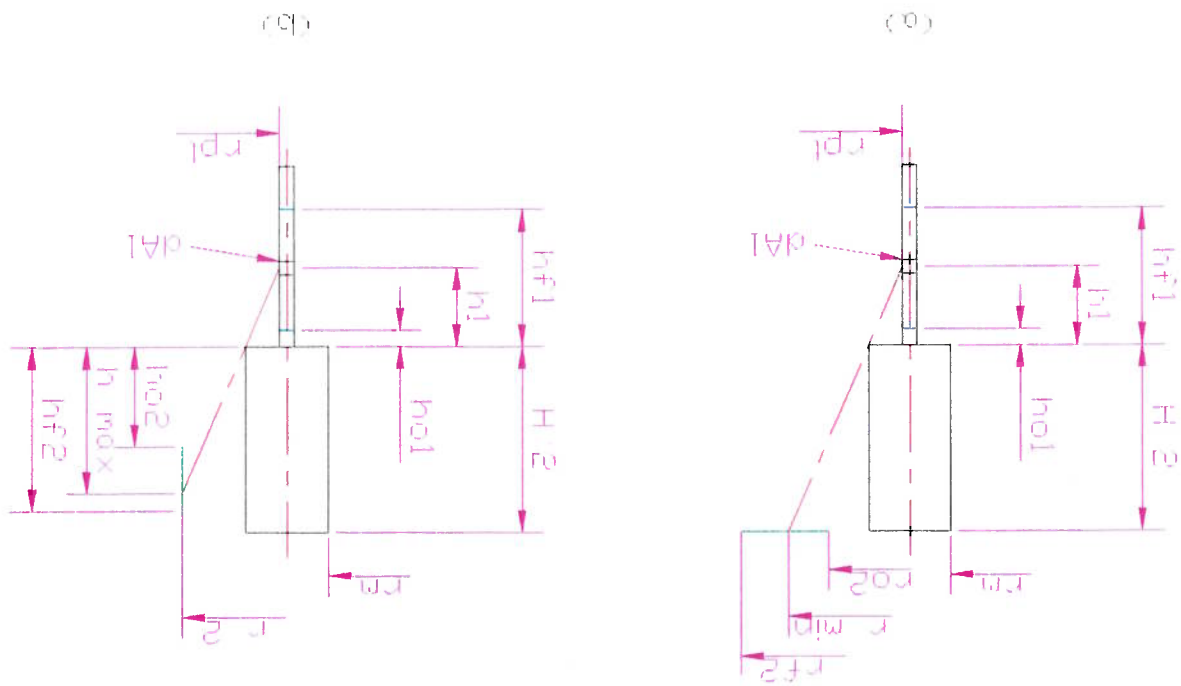


Figura 4.10: Esquema para integração numérica de forma entre anel interno e anel externo (a) entre anel interno e disco anular (b) bloqueados por cilindro central parcialmente sombreados por degraú.

A figura 4.10 apresenta o elemento de área $dA1$ e sua projeção na parede externa limitada pelo degraú. O fator de forma pode ser obtido da equação 3.12 como:

$$A_{F^{dA1-2}} = \sum_{A1} F^{dA1-2} dA1 \quad (4.13)$$

onde F^{dA1-2} refere-se à equação 3.16 entre anel interno e anel externo, considerando-se apenas a região abaixo da projeção h_{max} apresentada na figura 4.10. A projeção é obtida por:

$$h_{\max} = \frac{r_2 - r_m}{r_m - r_{pl}} h_1 \quad (4.14)$$

O mesmo procedimento vale para determinação do fator de forma entre anel

interno e disco superior, desta vez com r_2 variável e h_2 fixa. O limite definido pela projeção

do degrau será:

$$r_{\max} = \frac{H}{h_1} (r_m - r_{pl}) + r_m \quad (4.15)$$

sendo o fator de forma F_{dAI-2} calculado pela equação 4.1 considerada a superfície entre r_{\min}

e r_f .

Os fatores de forma calculados pela formulação aqui deduzida são apresentados no

capítulo 5.

4.4 Condução no Refratário

A troca de calor por condução em regime transitório é de modelagem bastante

simples, como apresentado no item 3.2. Salienta-se, porém, que os resultados teóricos

podem apresentar desvios das medições reais devido às características do revestimento

refratário.

Tijolos refratários são constituídos por minérios de diferentes granulometrias e

composições, em geral prensados, formando um bloco de dimensões definidas. As

propriedades de tijolos refratários, assim como de concretos, argamassas e massas plásticas,

dependem fortemente da origem, homogeneidade e processamento do material. Para uma

mesma qualidade de refratário, podem ocorrer variações consideráveis entre as

propriedades de dois tijolos similares, até mesmo se ambos pertencem ao mesmo lote de

fabricação.

Revestimentos refratários sempre apresentam alguma porosidade, seja ela provida da fabricação original do revestimento, seja pela formação de trincas ou frestas.

Trincas são formadas devido a tensões decorrentes de gradientes de temperatura no

refratário e tornam-se mais pronunciadas em revestimentos com maior uso.

Refratários costumam apresentar comportamento elástico apenas sob tensões

reduzidas. Quando solicitados em operação, materiais de menor resistência mecânica

tendem a ser comprimidos plasticamente, formando frestas entre as diversas camadas de

revestimento refratário. Podem resultar resistências de contato que levam a um melhor

isolamento e temperaturas de carga mais baixas no protótipo do que as estimadas por um

modelo numérico, quando as condições de temperatura interna são mantidas. Estes desvios

tomam maior importância quando o equipamento opera a temperaturas mais baixas.

Rigorosamente, o revestimento apresenta um fluxo convectivo de calor, que

poderia ser considerado no modelo. Seus efeitos são patentes quando o revestimento opera

com pressões internas muito diferentes da pressão atmosférica. Como as fissuras do

revestimento não costumam ser pré-definidas, os melhores resultados são obtidos

modelando-se a convecção resultante de trincas e porosidade do refratário a partir de dados

experimentais. Da mesma forma, resistências de contato podem ser medidas em campo para

completar o modelo.

4.4.1 Descrição do modelo de condução

O modelo de condução no refratário adota o método das resistências térmicas apresentado no item 3.2 com capacidades térmicas e densidades constantes e condutividades térmicas variáveis.

A transmissão de calor em um refratário ideal a alta temperatura ocorre principalmente por condução no contato de seus grãos constituintes e por radiação em seus poros internos. As condutividades térmicas dos refratários obtidas pelos fabricantes em ensaios experimentais, foram interpoladas por funções exponenciais dentro do modelo de condução no refratário, conforme apresentado na equação 4.16.

$$k_{ref} = a e^{bt} \quad (4.16)$$

Os coeficientes a e b da equação 4.16, assim como as demais propriedades dos diversos refratários constituintes do reator e do banho são apresentados na tabela 4.2, obtidas de fabricantes de materiais (Magnesita, 1996) e de Stepanek (1994).

Tabela 4.2: Propriedades dos materiais

Material	a (W/m°C)	b (1/°C)	Cp (kJ/kg°C)	Densidade (t/m³)
Refratário 1	3,5	-0,00056	1,1	3,0
Refratário 2	0,235	0,0008	1	0,9
Refratário 3	2,198	-0,00017	1	2,5
Refratário 4	4,1	-0,00066	1,1	3,1
Caraça	46	0	0,47	7,8
Banho	46	0	0,47	7,8

Emissividade da chapa:	0,8
Temp. de fusão do banho:	1350°C
Calor latente de fusão:	96 kJ/kg

Na região do banho metálico, efeitos de fusão e solidificação foram incorporados ao modelo. As propriedades e temperaturas de fusão do metal encontram-se também na

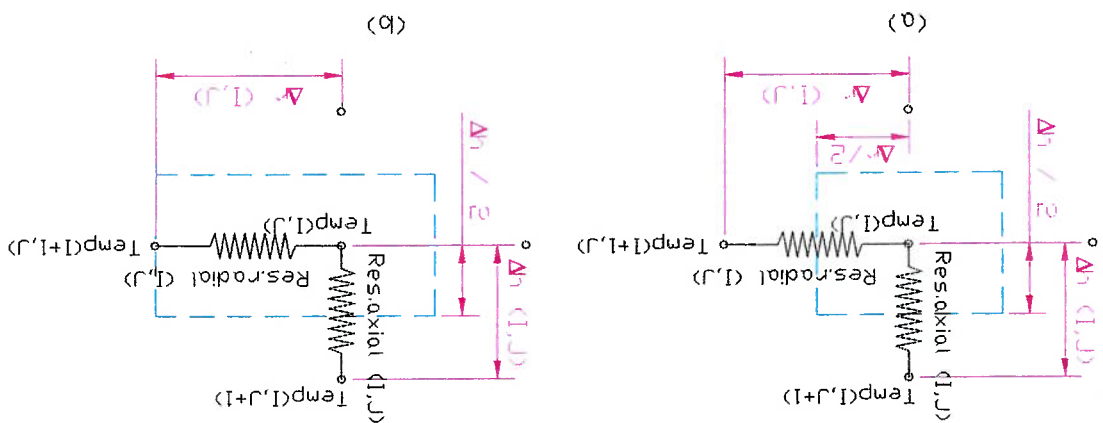
tabela 4.2. Os efeitos de troca de calor por convecção no banho durante o estado líquido foram desprezados.

A volatilização do metal no pé do arco, presente no reator real, também foi desprezada. Seus efeitos são admitidos pequenos em face à energia total do plasma, devendo a liquefação ou solidificação ocorrer nas regiões próximas ao arco, no banho, ou no refratário, com alguma similaridade com o processo de troca por radiação no que concerne às trocas térmicas.

A figura 4.12 apresenta a malha dos nós empregada no modelo de condução. Os pontos nodais para cálculo das temperaturas foram escolhidos preferencialmente nas superfícies de transição entre refratários, nas superfícies internas e externas. As dimensões dos espaçamentos das malhas encontram-se na tabela 4.4. Os limites dos materiais refratários dentro do revestimento estão indicados na figura 4.13. As resistências térmicas foram calculadas baseadas nas condutividades térmicas à temperatura média dos pontos nodais envolvidos. A resistência térmica devida à espessura da chapa externa foi desprezada quando na direção do ambiente externo.

A figura 4.11 apresenta um volume de controle típico contendo o ponto nodal de cálculo de temperatura centrado. Em alguns casos, as fronteiras do volume de controle foram deslocadas até o ponto nodal para melhor aproximar as configurações reais. E o caso da região do banho, onde os pontos internos têm suas fronteiras estendidas até o refratário, simplificando os cálculos de fusão do banho. Os pontos cujos volumes de controle tiveram suas fronteiras deslocadas são apresentados na tabela 4.3.

Figura 4.11: Volumes de controle dos pontos nodais: a) volume típico e b) com fronteira deslocada no sentido radial positivo



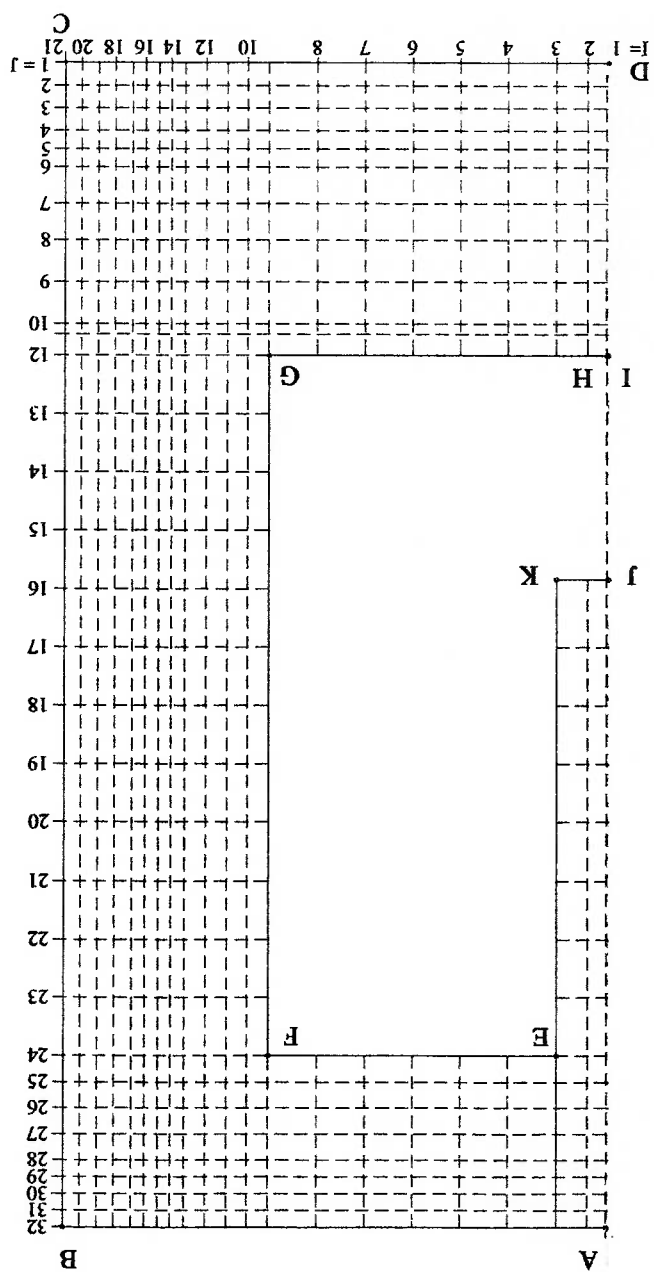
As superfícies discretizadas para modelo de radiação apresentadas na figura 4.4, são delimitadas pelos pontos médios entre os nós da superfície interna do reator. Assim, os fluxos energéticos definidos no modelo de radiação para as superfícies discretizadas são incorporados a cada ponto nodal interno do modelo de condução como termo de energia gerada na equação 3.2. Os pontos nodais com volume expandido na superfície interna incorporam mais de uma superfície do modelo de radiação, como é o caso do ponto (8,12) no banho que recebe os fluxos absorvidos nas superfícies 39 e 40, e do ponto (4, 24) das superfícies 27 e 28.

Tabela 4.3: Volumes de controle com fronteiras deslocadas

Sentido de deslocamento	Volumes	
	1	J
Radial positivo	8	11 e 12
Axial negativo	1 a 8	11
Radial negativo	4	24 a 32
Axial positivo	9 a 21	23

plasma

Figura 4.12: Malha dos nós para modelo de condução no refratário do reator a



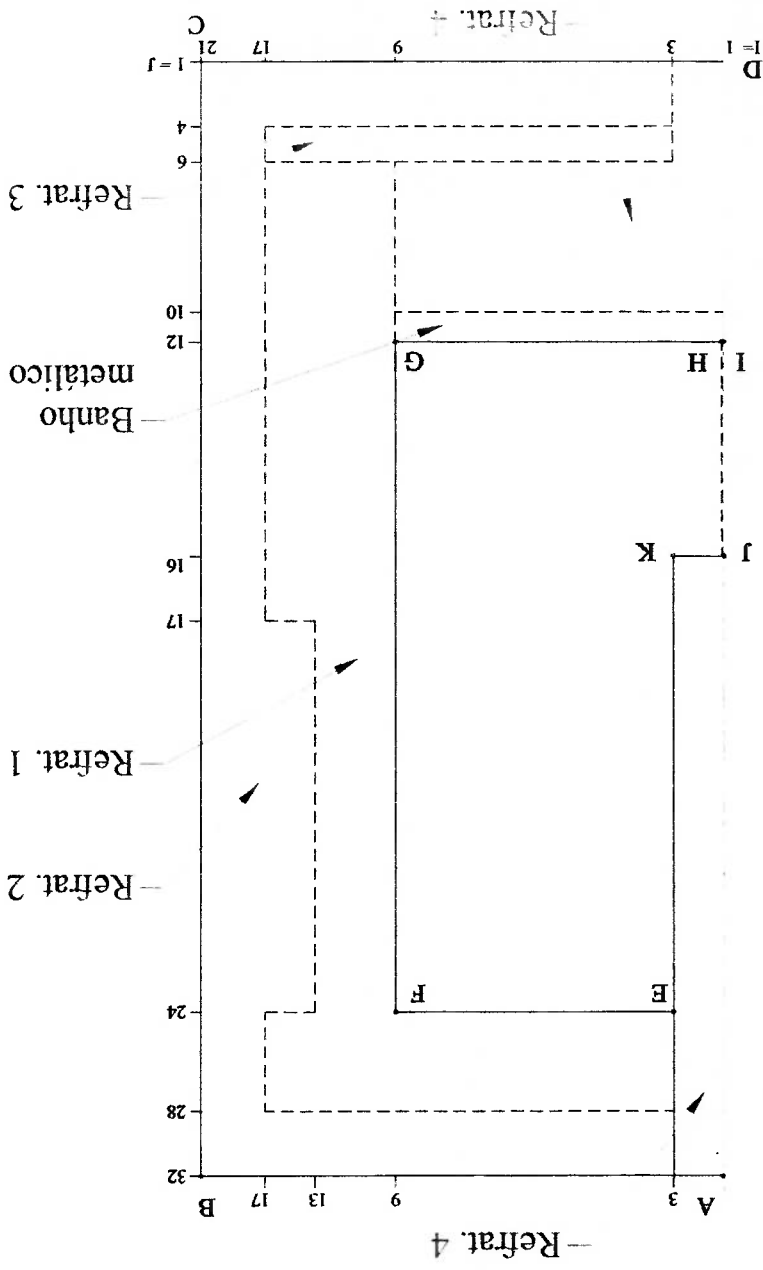


Figura 4.13: Limites dos materiais refratários e do banho metálico

CD, troca calor por radiação e por convecção natural com o ambiente externo. Na troca de calor por radiação, a carga é considerada como corpo cinzento com emissividade 0,8, fornecendo boa aproximação da configuração real.

Já para a convecção, são adotados os números de Nusselt médios obtidos das equações 3.30, 3.36 e 3.38 apresentadas no item 3.4 aplicados localmente a cada elemento superficial na carga com temperatura ambiente de 30°C. O problema real, porém, apresenta divergências com as hipóteses estabelecidas na obtenção experimental de tais correlações pelos autores. Em primeiro lugar, em nenhuma das paredes externas do reator a

4.5 Troca de Calor na Carga

Da formulação apresentada resultam a distribuição de temperaturas e o fluxo de calor por condução no refratário.

J	$\Delta h (J)$	$\Delta r (J)$	$\Delta r (J)$
1 a 3	21,7	1	18
4 e 5	17,5	2	30
6 e 7	35	3 a 8	46
8 e 9	40	9 a 12	20
10	10	13 a 16	12,5
11	20	17 a 20	16,3
12 a 23	55,8	$r(1) = 2mm$	
24 a 27	25		
28 a 31	16,3		

Tabela 4.4: Dimensões da malha

temperatura ou o fluxo de calor é constante; nem tampouco seguem alguma correlação exponencial para a temperatura indicada em Kakag (1995). Além disso, os modelos de convecção adotados são médios para toda a região das placas e não locais como poderia ser mais adequado.

O ar aquecido no fundo do reator, trecho CD da figura 4.2, influencia na formação da camada limite da lateral do reator, trecho BC, e, subsequentemente, a convecção na região da tampa, trecho AB, também seria alterada.

Uma solução melhor seria a adoção de uma malha externa ao reator para o estudo da convecção externa e determinação numérica dos coeficientes locais de troca de calor. Entretanto, quando o reator opera com temperaturas elevadas na carcaça, a radiação térmica pode ser considerada a forma predominante de troca térmica com o meio, reduzindo o efeito sobre o modelo de eventuais imprecisões na determinação da parcela de convecção. O isolamento conferido pelo refratário evita que estas imprecisões tenham forte influência na temperatura da parede interna do reator. A convecção externa influencia principalmente a temperatura das chapas externas do reator e de regiões do refratário próximas as mesmas. Dado o pequeno efeito, optamos pela opção descrita.

Os resultados das equações para cálculo de convecção fornecem as temperaturas externas da carcaça para o modelo de condução.

4.6 Sequência de Resolução

O procedimento desenvolvido para o modelo do reator em regime transitório, segue o fluxograma apresentado na figura 4.14. São fornecidas, primeiramente, as constantes do problema como dimensões, propriedades dos materiais, curva de aquecimento do reator e fatores de forma, os últimos previamente calculados e apresentados no capítulo 5.

Em seguida, são fornecidas os perfis iniciais de temperatura. No caso modelado, partiu-se da temperatura ambiente em todo o refratário.

A partir do perfil de temperatura atual são calculadas todas as resistências térmicas entre os nós. Calcula-se em seguida o passo máximo da interação no tempo para cada nó e verifica-se se há necessidade de alteração no valor do passo adotada no programa. Segue-se calculando os fluxos de calor por radiação na superfícies internas partindo-se do fluxo total de energia do plasma definido pela curva de aquecimento.

Caso a temperatura de fusão do metal seja atingida nos pontos nodais dentro do banho, o algoritmo procede em seus cálculos de fusão ou solidificação. Os novos perfis de temperatura são obtidos e os arquivos com os dados resultantes são gerados.

Se atingido tempo de ensaio pré-definido, o programa é interrompido, caso contrário, retorna ao cálculo das resistências térmicas. Com a simples alteração do ponto de retorno da interação, podem ser incorporados ao procedimento capacidade térmica e emissividade variáveis com temperatura.

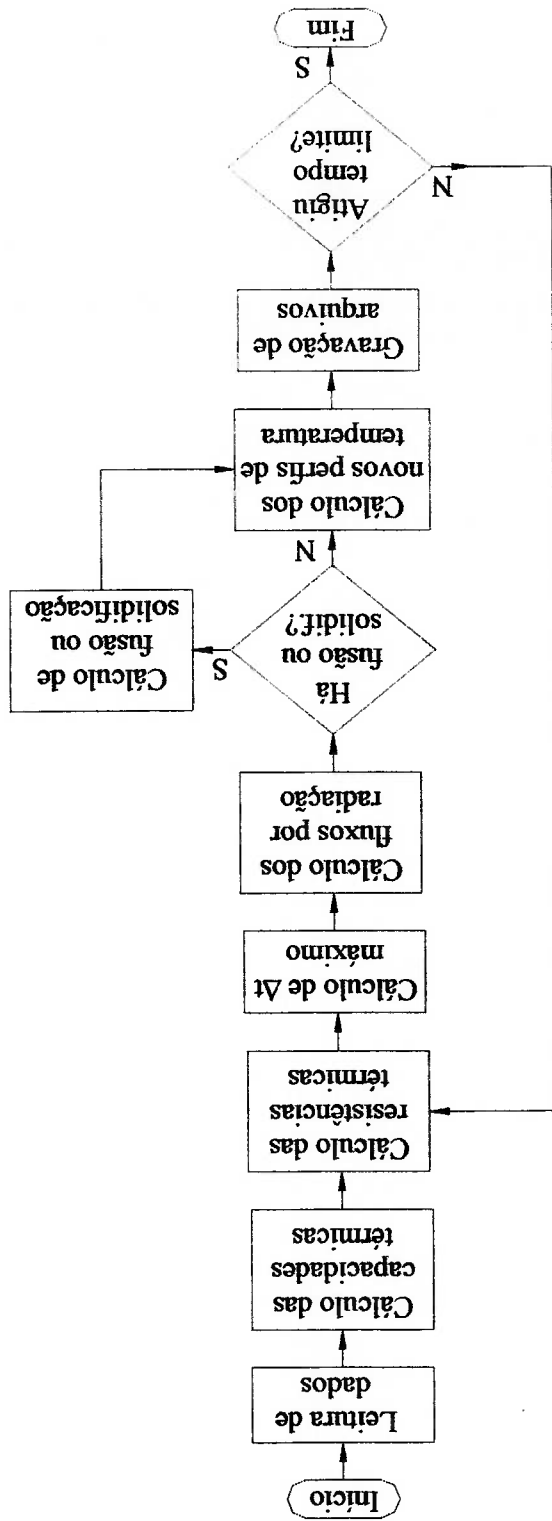


Figura 4.14: Fluxograma simplificado do procedimento de resolução do modelo

Capítulo 5

RESULTADOS

Os resultados da simulação numérica descrita no capítulo anterior são apresentados a seguir. Primeiramente, enfoca-se os fatores de forma no item 5.1. O item 5.2 é destinado aos resultados da simulação das trocas de calor propriamente dita, onde valores experimentais e calculados são comparados.

O modelo é testado nas condições de radiação e os resultados são comparados a dados experimentais.

5.1 Fatores de forma

Os fatores de forma entre as superfícies internas do reator calculadas conforme descrição do item 4.4.2 podem ser resultados exatos de integrações analíticas, resultados aproximados por integração numérica de formulação exata, ou provenientes de aproximação na integração numérica, dependendo da configuração geométrica das superfícies envolvidas em relação ao degrau descrito na figura 4. 4.

Os fatores de forma exatos representam a maior parcela dos cálculos (92% dos fatores de forma) na resolução do invólucro fechado do modelo. A tabela 5.1 apresenta a matriz de fatores de forma, incluindo apenas os valores exatos. As regiões da tabela com fundo colorido mostram os fatores de forma obtidos por integração numérica. Números

impressos em cores iguais revelam que os fatores de forma de forma tem a mesma formulação, sendo que aqueles em preto provêm da reciprocidade (eq. 3.9).

Da equação 3.11, é esperado que a soma dos fatores de forma de cada linha da matriz tenha valor unitário. A defasagem da somatória pode ser empregada como parâmetro na verificação do erro decorrente de aproximações.

As duas colunas à direita na continuação da tabela 5.1 indicam a somatória dos valores provenientes das linhas e o desvio do valor esperado. Observamos que para as superfícies 18 a 26 e 41 a 43, a solução é obtida sem a necessidade de integração numérica, o que é facilmente visualizado na figura 4.5 do capítulo anterior. Algumas superfícies, como superfície 34, sofrem maior influência do degraú no cálculo dos fatores de forma, como indicado na tabela. Nesta, 24% da energia emitida para superfícies para as quais o fator de forma com a superfície 34 depende de integração numérica.

A tabela 5.2 inclui os fatores de forma para os quais o desvio provindo da integração numérica depende apenas da dimensão da superfície discretizada empregada na integração. Estes fatores são indicados nas tabelas pelas regiões com fundo avermelhado. Observa-se que os desvios referentes a esta formulação variam de 0 a 0.04%, podendo ser desconsiderados.

A tabela 5.3 apresenta a matriz completa, calculada conforme apresentado no item 4.4.2. As regiões com fundo azul representam os fatores de forma cujos cálculos supõem o diâmetro do plasma pequeno. Observa-se que o desvio relativo a esta aproximação também é pequeno, fornecendo valores consistentes ao modelo.

Os maiores desvios são provenientes das aproximações adotadas para os fatores de forma sombreados em amarelo na figura 5.4. Para a superfície 46 atinge-se o valor máximo

de 0.45% no desvio. Mesmo esse valor, porém, é bastante pequeno, com influência muito limitada sobre o modelo.

A tabela 5.4 apresenta a matriz de fatores de forma final adotada no modelo. Nesta, os desvios apresentados na tabela anterior foram incorporados aos fatores de forma com cálculo aproximado, evitando-se assim que haja falsa geração energética no modelo.

De posse desta matriz, os cálculos de troca de calor entre as superfícies internas do modelo foram implementados e os resultados apresentados a seguir.

Tabela 5.2: Matriz dos fatores de forma incluindo valores exatos integrados numericamente sem aproximação.

1	0.042	0.077	0.069	0.037	0.049	0.034	0.03	0.022	0.018	0.014	0.012	0.01	0.004	8E-05	2E-04	1E-04	1E-04	0.008	0.006	0.004	0.003	0.002	0.001	9E-04	7E-04	3E-04
2	0.039	0.082	0.075	0.064	0.054	0.045	0.032	0.026	0.021	0.017	0.014	0.011	0.005	8E-05	2E-04	2E-04	2E-04	0.011	0.007	0.005	0.003	0.002	0.002	0.001	8E-04	3E-04
3	0.033	0.075	0.082	0.075	0.064	0.049	0.039	0.032	0.026	0.021	0.017	0.014	0.006	7E-05	2E-04	2E-04	2E-04	0.014	0.011	0.007	0.005	0.003	0.002	0.002	0.001	4E-04
4	0.028	0.064	0.075	0.082	0.074	0.058	0.047	0.039	0.032	0.026	0.021	0.017	0.007	6E-05	1E-04	2E-04	2E-04	0.018	0.014	0.011	0.007	0.005	0.003	0.002	0.002	6E-04
5	0.024	0.054	0.064	0.075	0.074	0.066	0.056	0.047	0.039	0.032	0.026	0.021	0.009	4E-05	1E-04	1E-04	2E-04	0.019	0.018	0.014	0.011	0.007	0.005	0.003	0.002	9E-04
6	0.02	0.045	0.049	0.056	0.074	0.066	0.074	0.066	0.047	0.039	0.032	0.026	0.011	3E-05	8E-05	1E-04	2E-04	0.018	0.019	0.018	0.014	0.011	0.007	0.005	0.003	0.001
7	0.015	0.032	0.039	0.047	0.056	0.066	0.074	0.066	0.066	0.047	0.039	0.032	0.014	2E-05	6E-05	8E-05	2E-04	0.014	0.018	0.019	0.018	0.014	0.011	0.007	0.005	0.002
8	0.011	0.026	0.032	0.039	0.047	0.056	0.066	0.074	0.066	0.066	0.047	0.039	0.017	1E-05	4E-05	6E-05	2E-04	0.011	0.014	0.018	0.019	0.018	0.014	0.011	0.007	0.003
9	0.009	0.021	0.026	0.032	0.039	0.047	0.056	0.066	0.074	0.066	0.066	0.047	0.02	8E-06	2E-05	4E-05	2E-04	0.007	0.011	0.014	0.018	0.019	0.018	0.014	0.011	0.004
10	0.007	0.017	0.021	0.026	0.032	0.039	0.047	0.056	0.066	0.074	0.066	0.066	0.029	6E-06	1E-05	3E-05	2E-04	0.005	0.007	0.011	0.014	0.018	0.019	0.018	0.014	0.006
11	0.006	0.014	0.017	0.021	0.026	0.032	0.039	0.047	0.056	0.066	0.074	0.066	0.035	5E-06	1E-05	4E-05	2E-04	0.003	0.005	0.007	0.011	0.014	0.018	0.019	0.018	0.008
12	0.005	0.011	0.014	0.017	0.021	0.026	0.032	0.039	0.047	0.056	0.066	0.074	0.035	4E-06	1E-05	4E-05	2E-04	0.002	0.003	0.005	0.007	0.011	0.014	0.018	0.019	0.009
13	0.004	0.01	0.012	0.014	0.018	0.022	0.027	0.033	0.041	0.049	0.059	0.069	0.038	4E-06	9E-06	4E-05	2E-04	0.002	0.003	0.004	0.006	0.008	0.012	0.015	0.018	0.01
14	0.004	0.105	0.092	0.073	0.055	0.04	0.028	0.022	0.02	0.014	0.01	0.008	0.005	0.002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0.063	0.108	0.102	0.087	0.068	0.051	0.037	0.026	0.019	0.013	0.01	0.007	0.003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0.046	0.102	0.108	0.102	0.087	0.068	0.051	0.037	0.026	0.019	0.013	0.01	0.007	0.003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0.037	0.087	0.102	0.102	0.087	0.068	0.051	0.037	0.026	0.019	0.013	0.01	0.007	0.003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0.029	0.069	0.093	0.115	0.123	0.115	0.093	0.069	0.048	0.033	0.022	0.015	0.006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0.018	0.048	0.068	0.093	0.115	0.123	0.115	0.093	0.069	0.048	0.033	0.022	0.008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0.012	0.033	0.048	0.068	0.093	0.115	0.123	0.115	0.093	0.069	0.048	0.033	0.012	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0.009	0.022	0.033	0.048	0.068	0.093	0.115	0.123	0.115	0.093	0.069	0.048	0.018	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0.008	0.015	0.022	0.033	0.048	0.068	0.093	0.115	0.123	0.115	0.093	0.069	0.026	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0.004	0.011	0.015	0.022	0.033	0.048	0.068	0.093	0.115	0.123	0.115	0.093	0.038	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0.003	0.007	0.011	0.015	0.022	0.033	0.048	0.068	0.093	0.115	0.123	0.115	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0.002	0.005	0.007	0.011	0.015	0.022	0.033	0.048	0.068	0.093	0.115	0.123	0.059	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0.002	0.004	0.005	0.008	0.012	0.017	0.024	0.036	0.053	0.075	0.1	0.119	0.082	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0.005	0.019	0.024	0.029	0.037	0.046	0.056	0.079	0.085	0.085	0.074	0.046	0.009	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0.01	0.023	0.028	0.034	0.042	0.053	0.065	0.079	0.093	0.101	0.093	0.058	0.008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0.01	0.023	0.028	0.034	0.042	0.053	0.065	0.081	0.094	0.112	0.111	0.075	0.011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0.009	0.022	0.028	0.032	0.039	0.048	0.06	0.075	0.084	0.116	0.131	0.104	0.016	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0.009	0.02	0.023	0.028	0.034	0.042	0.051	0.064	0.083	0.109	0.146	0.156	0.031	6E-06	1E-05	4E-05	2E-04	0.002	0.003	0.004	0.006	0.009	0.011	0.013	0.01	0.001
32	0.008	0.017	0.02	0.024	0.028	0.033	0.04	0.049	0.061	0.082	0.126	0.229	0.099	6E-06	1E-05	4E-05	2E-04	0.002	0.003	0.004	0.006	0.007	0.008	0.008	0.006	8E-04
33	0.007	0.015	0.017	0.02	0.023	0.027	0.031	0.035	0.041	0.049	0.067	0.155	0.342	7E-06	2E-05	6E-05	2E-04	0.003	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.006	0.004	5E-04
34	0.008	0.058	0.097	0.112	0.108	0.094	0.081	0.067	0.055	0.044	0.037	0.026	0.013	1E-04	6E-04	4E-04	2E-04	0.005	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	2E-05
35	0.009	0.064	0.104	0.115	0.108	0.094	0.079	0.065	0.053	0.044	0.034	0.026	0.011	1E-04	6E-04	4E-04	2E-04	0.005	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	2E-05
36	0.011	0.079	0.117	0.119	0.106	0.09	0.074	0.06	0.049	0.036	0.029	0.023	0.01	4E-05	3E-04	3E-04	2E-04	0.008	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	2E-04
37	0.016	0.106	0.134	0.121	0.1	0.081	0.066	0.054	0.042	0.032	0.026	0.022	0.009	2E-05	1E-04	2E-04	1E-04	0.009	0.006	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	3E-04
38	0.031	0.156	0.149	0.113	0.087	0.069	0.056	0.044	0.034	0.028	0.023	0.02	0.009	1E-05	7E-05	1E-04	1E-04	0.008	0.006	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	4E-04
39	0.099	0.23	0.128	0.085	0.064	0.052	0.043	0.034	0.028	0.024	0.02	0.017	0.008	6E-06	4E-05	7E-05	7E-05	0.007	0.006	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	5E-04
40	0.343	0.155	0.068	0.051	0.043	0.038	0.033	0.027	0.023	0.02	0.017	0.015	0.007	4E-05	5E-05	2E-04	0.028	0.005	0.005	0.004	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001	5E-04
41	0.054	0.101	0.075	0.028	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3E-05	2E-04	7E-04	0.006	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	0.055	0.104	0.077	0.029	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3E-05	2E-04	7E-04	0.006	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0.056	0.105	0.078	0.029	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6E-05	2E-04	9E-04	0.002	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0.007	0.053	0.081	0.106	0.105	0.095	0.081	0.067	0.055	0.045	0.037	0.03	0.013	0.027	0.001	9E-05	3E-05	0.004	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0.007	0.055	0.093	0.109	0.108	0.097	0.082	0.068	0.056	0.046	0.038	0.031	0.013	0.004	0.002	3E-04	8E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	0.008	0.056	0.095	0.11	0.108	0.097	0.082	0.068	0.056	0.046	0.037	0.031	0.013	0.001	0.002	4E-04	1E-04	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 5.2: (continuação)

27	0,001	0,005	0,007	0,009	0,01	0,011	0,012	0,012	0,005	0,001	0,004	0,008	0,016	0,037	0,14	0,272	4E-04	0,003	0,004	5E-05	4E-04	5E-04	Soma
1	0,002	0,006	0,008	0,01	0,012	0,012	0,012	0,006	0,005	0,005	0,016	0,028	0,05	0,093	0,163	0,062	3E-04	0,003	0,004	2E-04	0,002	0,002	1
2	0,002	0,007	0,01	0,012	0,014	0,014	0,007	0,008	0,008	0,025	0,042	0,064	0,088	0,091	0,027	2E-04	0,002	0,003	3E-04	0,003	0,003	1	
3	0,002	0,008	0,012	0,015	0,017	0,017	0,008	0,009	0,008	0,028	0,038	0,058	0,067	0,06	0,02	9E-05	9E-04	0,001	4E-04	0,003	0,004	1	
4	0,003	0,01	0,015	0,019	0,02	0,02	0,009	0,008	0,008	0,026	0,038	0,048	0,051	0,045	0,017	0	0	0	3E-04	0,003	0,004	1	
5	0,004	0,013	0,019	0,023	0,025	0,023	0,011	0,007	0,007	0,023	0,032	0,039	0,041	0,037	0,015	0	0	0	3E-04	0,003	0,003	1	
6	0,004	0,016	0,023	0,029	0,03	0,028	0,012	0,006	0,006	0,019	0,026	0,031	0,033	0,031	0,013	0	0	0	2E-04	0,002	0,003	1	
7	0,005	0,019	0,029	0,036	0,038	0,034	0,014	0,005	0,005	0,016	0,022	0,026	0,026	0,024	0,011	0	0	0	2E-04	0,002	0,002	1	
8	0,006	0,023	0,035	0,045	0,049	0,043	0,016	0,004	0,004	0,013	0,018	0,02	0,02	0,02	0,008	0	0	0	1E-04	0,001	0,002	1	
9	0,006	0,024	0,04	0,055	0,065	0,058	0,02	0,003	0,003	0,008	0,01	0,012	0,014	0,014	0,007	0	0	0	1E-04	0,001	0,001	1	
10	0,006	0,023	0,04	0,062	0,066	0,089	0,027	0,003	0,003	0,006	0,008	0,01	0,012	0,012	0,006	0	0	0	1E-04	0,001	0,001	1	
11	0,004	0,014	0,027	0,049	0,092	0,162	0,061	0,002	0,002	0,005	0,007	0,008	0,01	0,011	0,005	0	0	0	9E-05	9E-04	9E-04	1	
12	1E-03	0,004	0,008	0,015	0,037	0,14	0,272	0,002	0,002	0,043	0,02	0,012	0,007	0,005	0,002	0	0	0	1E-05	0,001	0,003	0,998	
13	0	0	0	0	0,004	0,006	0,003	0,063	0,094	0,059	0,038	0,026	0,019	0,008	0,002	4E-05	0,001	0,003	0,116	0,168	0,053	-0,22%	
14	0	0	0	0	0,007	0,004	0,008	0,024	0,063	0,061	0,05	0,039	0,031	0,013	0,006	1E-04	0,003	0,006	0,002	0,043	0,042	0,996	
15	0	0	0	0	0,009	0,009	0,011	0,009	0,009	0,033	0,042	0,043	0,039	0,034	0,015	5E-04	0,014	0,02	2E-04	0,006	0,01	0,96	
16	0	0	0	0	0,009	0,009	0,011	0,007	0,009	0,033	0,042	0,043	0,039	0,034	0,015	0,06	0,117	0,055	6E-05	0,002	0,003	-3,99%	
17	0	0	0	0	0,009	0,009	0,011	0,007	0,009	0,033	0,042	0,043	0,039	0,034	0,015	0,06	0,117	0,055	6E-05	0,002	0,003	0,785	
18	6E-05	1E-03	0,003	0,006	0,012	0,015	0,008	5E-04	0,004	0,007	0,019	0,028	0,032	0,033	0,016	0	0	0	0	0	0	1	
19	8E-05	0,001	0,004	0,008	0,012	0,015	0,008	1E-04	0,004	0,007	0,018	0,028	0,032	0,033	0,016	0	0	0	0	0	0	1	
20	1E-04	0,002	0,007	0,012	0,016	0,02	0,011	2E-04	0,002	0,007	0,012	0,016	0,02	0,011	0,008	0	0	0	0	0	0	1	
21	2E-04	0,004	0,011	0,018	0,023	0,026	0,013	8E-05	0,001	0,004	0,008	0,012	0,015	0,008	0,008	0	0	0	0	0	0	1	
22	5E-04	0,007	0,019	0,028	0,032	0,033	0,016	6E-05	1E-03	0,003	0,006	0,009	0,011	0,007	0,007	0	0	0	0	0	0	1	
23	0,001	0,016	0,035	0,043	0,043	0,039	0,017	4E-05	7E-04	0,002	0,004	0,007	0,009	0,005	0,005	0	0	0	0	0	0	1	
24	0,004	0,042	0,065	0,061	0,038	0,038	0,016	3E-05	5E-04	0,002	0,003	0,005	0,007	0,004	0,004	0	0	0	0	0	0	1	
25	0,029	0,129	0,092	0,057	0,037	0,026	0,01	2E-05	4E-04	0,001	0,002	0,004	0,004	0,005	0,003	0	0	0	0	0	0	1	
26	0,245	0,142	0,042	0,018	0,011	0,007	0,003	2E-05	3E-04	0,001	0,002	0,003	0,003	0,005	0,003	0	0	0	0	0	0	1	
27	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0,01	0,016	0,021	0,025	0,028	0,028	0,015	0	0	0	0	0	0	1	
28	0	0	0	0	0	0	0	0,003	0,012	0,019	0,025	0,029	0,033	0,017	0	0	0	0	0	0	0	0,999	
29	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0,013	0,02	0,026	0,031	0,035	0,018	0	0	0	0	0	0	0	-0,11%	
30	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0,013	0,02	0,028	0,031	0,035	0,018	0	0	0	0	0	0	0	0,998	
31	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0,012	0,019	0,025	0,03	0,034	0,018	0	0	0	0	2E-04	0,002	0,002	-0,32%	
32	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0,012	0,018	0,023	0,028	0,033	0,018	0	0	0	0	2E-04	0,002	0,002	0,986	
33	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0,011	0,017	0,022	0,027	0,031	0,017	0	0	0	0	2E-04	0,002	0,002	-0,19%	
34	0,002	0,01	0,016	0,023	0,029	0,035	0,02	0,002	0,014	0,019	0,025	0,029	0,033	0,017	0	0	0	0	0,003	0,023	0,026	1	
35	0,003	0,012	0,019	0,025	0,03	0,034	0,018	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0,018	0,021	0	0	0	1	
36	0,003	0,013	0,02	0,026	0,031	0,035	0,018	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0,012	0,014	0	0	0	1	
37	0,003	0,013	0,02	0,026	0,031	0,035	0,018	0	0	0	0	0	0	0	0	8E-04	0,008	0,009	0	0	0	1	
38	0,003	0,012	0,019	0,025	0,03	0,034	0,018	0	0	0	0	0	0	0	0	5E-04	0,005	0,006	0	0	0	1	
39	0,003	0,011	0,018	0,023	0,028	0,033	0,018	0	0	0	0	0	0	0	0	3E-04	0,003	0,004	0	0	0	1	
40	0,003	0,011	0,017	0,022	0,027	0,031	0,017	0	0	0	0	0	0	0	0	2E-04	0,002	0,003	0	0	0	1	
41	0	0	0	0	0	0	0	0,059	0,144	0,142	0,119	0,093	0,071	0,029	0	0	0	0,003	0,027	0,029	0	1	
42	0	0	0	0	0	0	0	0,059	0,145	0,145	0,122	0,096	0,073	0,03	0	0	0	0,003	0,027	0,029	0	1	
43	0	0	0	0	0	0	0	0,057	0,143	0,145	0,124	0,098	0,075	0,03	0	0	0	0,003	0,025	0,028	0	1	
44	0	0	0	0,037	0,04	0,021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,003	0,027	0,029	0	0	0	0,972	
45	0	0	0	0,041	0,021	0,021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,003	0,027	0,029	0	0	0	-6,82%	
46	0	0	0	0,021	0,021	0,021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,003	0,025	0,026	0	0	0	-11,22%	

Tabela 5.3: (continuação)

27	0,001	0,005	0,007	0,009	0,01	0,011	0,011	0,005	0,001	0,004	0,008	0,016	0,037	0,14	0,272	4E-04	0,003	0,004	5E-05	4E-04	0,002	0,002	1	0,00%
28	0,002	0,006	0,008	0,01	0,012	0,012	0,012	0,006	0,005	0,016	0,028	0,05	0,093	0,163	0,062	3E-04	0,003	0,004	2E-04	0,002	0,002	1	0,00%	
29	0,002	0,007	0,01	0,012	0,014	0,014	0,017	0,007	0,008	0,025	0,042	0,064	0,088	0,091	0,027	2E-04	0,002	0,003	3E-04	0,003	0,003	1	0,00%	
30	0,003	0,008	0,012	0,015	0,017	0,017	0,017	0,008	0,009	0,028	0,043	0,058	0,067	0,06	0,02	9E-05	9E-04	0,001	4E-04	0,003	0,004	1	0,00%	
31	0,004	0,013	0,019	0,023	0,025	0,023	0,011	0,009	0,008	0,023	0,032	0,039	0,041	0,037	0,015	0	0	0	3E-04	0,003	0,003	1	0,00%	
32	0,004	0,016	0,023	0,029	0,03	0,028	0,012	0,012	0,006	0,019	0,026	0,031	0,033	0,031	0,013	0	0	0	2E-04	0,002	0,002	1	0,01%	
33	0,005	0,019	0,029	0,036	0,038	0,034	0,014	0,016	0,005	0,016	0,022	0,026	0,024	0,011	0,009	0	0	0	1E-04	0,001	0,001	1	0,01%	
34	0,006	0,023	0,035	0,045	0,049	0,043	0,019	0,02	0,004	0,013	0,018	0,02	0,02	0,02	0,009	0	0	0	2E-04	0,002	0,003	1	0,01%	
35	0,006	0,024	0,04	0,055	0,065	0,058	0,02	0,02	0,003	0,008	0,01	0,012	0,014	0,017	0,008	0	0	0	1E-04	0,001	0,002	1	0,01%	
36	0,006	0,023	0,04	0,062	0,068	0,089	0,027	0,027	0,003	0,008	0,01	0,012	0,014	0,014	0,007	0	0	0	1E-04	0,001	0,001	1	0,01%	
37	0,004	0,014	0,027	0,049	0,092	0,162	0,061	0,061	0,002	0,006	0,008	0,01	0,012	0,012	0,006	0	0	0	1E-04	9E-04	0,001	1	0,00%	
38	1E-03	0,004	0,008	0,016	0,037	0,14	0,272	0,272	0,046	0,043	0,02	0,012	0,007	0,005	0,002	4E-05	0,001	0,003	0,116	0,168	0,053	1	0,00%	
39	0	0	0	0	0	0,006	0,003	0,003	0,063	0,084	0,059	0,038	0,026	0,019	0,008	1E-04	0,003	0,006	0,002	0,043	0,042	1	0,00%	
40	0	0	0	0	0	0,009	0,033	0,042	0,024	0,063	0,061	0,05	0,039	0,031	0,013	5E-04	0,014	0,02	2E-04	0,006	0,01	1	0,01%	
41	6E-05	1E-03	0,003	0,006	0,009	0,011	0,007	0	0,009	0,033	0,042	0,043	0,039	0,034	0,015	0,06	0,117	0,055	6E-05	0,002	0,002	1	0,00%	
42	8E-05	0,001	0,004	0,008	0,012	0,015	0,008	0,008	5E-04	0,007	0,019	0,028	0,032	0,033	0,016	0	0	0	0	0	0	1	0,00%	
43	1E-04	0,002	0,007	0,012	0,016	0,02	0,011	0,008	1E-04	0,004	0,007	0,018	0,023	0,026	0,013	0	0	0	0	0	0	1	0,00%	
44	2E-04	0,004	0,011	0,018	0,023	0,026	0,013	0,008	8E-05	0,002	0,004	0,008	0,012	0,015	0,008	0	0	0	0	0	0	1	0,00%	
45	5E-04	0,007	0,019	0,028	0,032	0,033	0,016	0,016	6E-05	1E-03	0,003	0,006	0,009	0,011	0,007	0	0	0	0	0	0	1	0,00%	
46	0,001	0,016	0,035	0,043	0,043	0,039	0,017	0,016	4E-05	7E-04	0,002	0,004	0,007	0,009	0,005	0	0	0	0	0	0	1	0,00%	
25	0,004	0,042	0,065	0,061	0,049	0,038	0,016	0,016	2E-05	5E-04	0,002	0,003	0,005	0,007	0,004	0	0	0	0	0	0	1	0,00%	
26	0,129	0,062	0,057	0,037	0,026	0,01	0,003	0,003	2E-05	3E-04	0,001	0,002	0,003	0,005	0,003	0	0	0	0	0	0	1	0,00%	
27	0,245	0,142	0,042	0,019	0,011	0,007	0,003	0,003	0,002	0,01	0,016	0,021	0,025	0,028	0,015	0	0	0	0	0	0	1	-0,01%	
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0,012	0,019	0,025	0,029	0,033	0,017	0	0	0	0	2E-04	8E-04	1	-0,01%	
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0,013	0,02	0,026	0,031	0,035	0,018	0	0	0	0	3E-05	0,001	0,002	1,001	0,05%
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0,013	0,02	0,026	0,031	0,035	0,018	0	0	0	0	2E-04	0,002	0,002	1,001	0,05%
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0,012	0,019	0,025	0,03	0,034	0,018	0	0	0	0	2E-04	0,002	0,001	0,999	-0,06%
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0,012	0,018	0,023	0,028	0,033	0,018	0	0	0	0	2E-04	0,002	0,002	1	-0,02%
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0,011	0,017	0,022	0,027	0,031	0,017	0	0	0	0	2E-04	0,002	0,002	1	0,00%
34	0,002	0,01	0,016	0,023	0,029	0,035	0,02	0,02	0	0	0	0	0	0	0	0,003	0,023	0,026	0	0	0	1	0,03%	
35	0,003	0,012	0,019	0,025	0,03	0,034	0,018	0,018	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0,018	0,021	0	0	0	1	0,04%	
36	0,003	0,013	0,02	0,026	0,031	0,035	0,018	0,018	0,001	0,012	0,014	0	0	0	0	0,001	0,012	0,014	0	0	0	1	0,03%	
37	0,003	0,013	0,02	0,028	0,031	0,035	0,018	0,018	8E-04	0,008	0,009	0	0	0	0	0	0,008	0,009	0	0	0	1	0,02%	
38	0,003	0,012	0,019	0,025	0,03	0,034	0,018	0,018	5E-04	0,006	0,006	0	0	0	0	0	0,006	0,006	0	0	0	1	0,01%	
39	0,003	0,011	0,018	0,023	0,026	0,033	0,018	0,018	3E-04	0,003	0,004	0	0	0	0	0	0,003	0,004	0	0	0	1	0,01%	
40	0,003	0,011	0,017	0,022	0,027	0,031	0,017	0,017	2E-04	0,002	0,003	0	0	0	0	0	0,002	0,003	0	0	0	1	0,01%	
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0,059	0,144	0,142	0,119	0,093	0,071	0,029	0	0	0	0,003	0,027	0,029	1	0,00%	
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0,059	0,145	0,145	0,122	0,096	0,073	0,03	0	0	0	0,003	0,027	0,029	1	0,00%	
43	0	0	0	0	0	0	0	0	0,057	0,143	0,145	0,124	0,098	0,075	0,03	0	0	0	0,003	0,025	0,028	1	0,00%	
44	0	0	0,003	0,028	0,037	0,04	0,021	0,021	0	0	0	0	0	0	0	0,003	0,027	0,029	0	0	0	1,002	0,25%	
45	0	0,001	0,014	0,024	0,031	0,041	0,021	0,021	0	0	0	0	0	0	0	0,003	0,027	0,029	0	0	0	1,002	0,17%	
46	2E-04	0,006	0,016	0,027	0,023	0,035	0,021	0,021	0	0	0	0	0	0	0	0,003	0,026	0,028	0	0	0	0,995	-0,45%	

Tabela 5.4: Matriz dos fatores de forma empregada no modelo.

1	0,042	0,077	0,067	0,057	0,048	0,04	0,03	0,022	0,018	0,014	0,012	0,01	0,004	8E-05	2E-04	1E-04	1E-04	0,008	0,006	0,004	0,003	0,002	0,001	9E-04	7E-04	3E-04
2	0,039	0,082	0,075	0,064	0,054	0,046	0,032	0,028	0,021	0,017	0,014	0,011	0,005	8E-05	2E-04	2E-04	1E-04	0,014	0,007	0,005	0,003	0,002	0,001	8E-04	3E-04	0,004
3	0,033	0,075	0,082	0,075	0,064	0,054	0,039	0,032	0,026	0,021	0,017	0,014	0,006	7E-05	2E-04	2E-04	2E-04	0,018	0,014	0,011	0,007	0,005	0,003	0,002	0,001	4E-04
4	0,028	0,064	0,075	0,082	0,074	0,058	0,047	0,039	0,032	0,026	0,021	0,017	0,007	6E-05	1E-04	2E-04	2E-04	0,018	0,014	0,011	0,007	0,005	0,003	0,002	0,001	6E-04
5	0,024	0,054	0,064	0,074	0,074	0,056	0,046	0,039	0,032	0,026	0,021	0,017	0,009	4E-05	1E-04	1E-04	1E-04	0,018	0,018	0,014	0,011	0,007	0,005	0,003	0,002	9E-04
6	0,02	0,045	0,049	0,056	0,056	0,047	0,039	0,032	0,026	0,021	0,017	0,011	0,009	3E-05	8E-05	1E-04	1E-04	0,018	0,018	0,014	0,011	0,007	0,005	0,003	0,001	0,001
7	0,015	0,032	0,039	0,047	0,047	0,036	0,028	0,022	0,018	0,014	0,011	0,007	0,005	2E-05	6E-05	3E-05	3E-05	0,014	0,014	0,014	0,011	0,007	0,005	0,003	0,002	0,002
8	0,011	0,026	0,032	0,039	0,047	0,036	0,028	0,022	0,018	0,014	0,011	0,007	0,005	1E-05	4E-05	1E-05	1E-05	0,014	0,014	0,014	0,011	0,007	0,005	0,003	0,001	0,001
9	0,009	0,021	0,026	0,032	0,039	0,047	0,036	0,028	0,022	0,018	0,014	0,011	0,005	8E-06	2E-05	3E-05	1E-06	0,005	0,007	0,011	0,014	0,018	0,018	0,014	0,004	0,006
10	0,007	0,017	0,021	0,026	0,032	0,039	0,047	0,036	0,028	0,022	0,018	0,011	0,005	6E-06	1E-05	2E-05	0	0,003	0,005	0,007	0,011	0,014	0,018	0,018	0,018	0,008
11	0,006	0,014	0,017	0,021	0,026	0,032	0,039	0,047	0,036	0,028	0,022	0,018	0,005	4E-06	1E-05	2E-05	0	0,002	0,003	0,005	0,007	0,011	0,014	0,018	0,018	0,008
12	0,005	0,011	0,014	0,017	0,021	0,026	0,032	0,039	0,047	0,036	0,028	0,022	0,009	4E-06	1E-05	2E-05	0	0,002	0,003	0,005	0,007	0,011	0,014	0,018	0,018	0,008
13	0,004	0,01	0,012	0,014	0,018	0,022	0,027	0,033	0,041	0,049	0,059	0,069	0,038	4E-06	9E-06	6E-06	0	0,002	0,003	0,004	0,006	0,008	0,012	0,015	0,018	0,01
14	0,054	0,105	0,092	0,073	0,055	0,04	0,028	0,02	0,014	0,01	0,008	0,006	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0,053	0,108	0,102	0,087	0,068	0,051	0,037	0,026	0,019	0,013	0,01	0,007	0,003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0,046	0,102	0,108	0,102	0,087	0,068	0,051	0,037	0,026	0,018	0,011	0,006	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0,037	0,087	0,102	0,108	0,087	0,067	0,036	0,017	0,006	7E-04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0,026	0,066	0,063	0,115	0,123	0,115	0,093	0,069	0,048	0,033	0,022	0,015	0,006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0,018	0,048	0,069	0,093	0,115	0,123	0,115	0,093	0,069	0,048	0,033	0,022	0,008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0,012	0,033	0,048	0,069	0,093	0,115	0,123	0,115	0,093	0,069	0,048	0,033	0,012	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0,008	0,022	0,033	0,048	0,069	0,093	0,115	0,123	0,115	0,093	0,069	0,048	0,018	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0,006	0,015	0,022	0,033	0,048	0,069	0,093	0,115	0,123	0,115	0,093	0,069	0,026	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0,004	0,011	0,016	0,022	0,033	0,048	0,069	0,093	0,115	0,123	0,115	0,093	0,038	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0,003	0,007	0,011	0,015	0,022	0,033	0,048	0,069	0,093	0,115	0,123	0,115	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0,002	0,005	0,007	0,011	0,015	0,022	0,033	0,048	0,069	0,093	0,115	0,123	0,059	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0,002	0,004	0,006	0,008	0,012	0,017	0,024	0,036	0,053	0,075	0,1	0,119	0,062	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0,008	0,019	0,024	0,029	0,037	0,045	0,056	0,068	0,079	0,083	0,074	0,045	0,006	0	0	0	0	1E-04	2E-04	3E-04	5E-04	9E-04	0,002	0,007	0,056	0,242
28	0,01	0,023	0,028	0,034	0,042	0,053	0,065	0,079	0,093	0,101	0,093	0,058	0,008	0	0	0	0	6E-04	9E-04	0,001	0,002	0,005	0,01	0,026	0,092	0,045
29	0,01	0,023	0,028	0,034	0,042	0,053	0,065	0,081	0,098	0,112	0,111	0,075	0,011	0	0	0	0	0,001	0,002	0,003	0,005	0,008	0,015	0,028	0,038	0,009
30	0,009	0,022	0,026	0,032	0,039	0,048	0,056	0,075	0,094	0,116	0,131	0,104	0,016	0	0	0	0	0,002	0,003	0,004	0,006	0,009	0,014	0,02	0,018	0,003
31	0,008	0,02	0,023	0,028	0,034	0,042	0,051	0,064	0,083	0,109	0,146	0,156	0,031	0	0	0	0	0,002	0,003	0,004	0,006	0,008	0,011	0,013	0,01	0,001
32	0,008	0,017	0,02	0,024	0,028	0,033	0,04	0,049	0,061	0,082	0,126	0,228	0,099	0	0	0	0	0,002	0,003	0,004	0,006	0,007	0,008	0,008	0,008	8E-04
33	0,007	0,015	0,017	0,02	0,023	0,027	0,031	0,035	0,041	0,049	0,067	0,155	0,342	0	0	0	0	0,003	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,004	5E-04
34	0,008	0,058	0,097	0,112	0,108	0,096	0,081	0,067	0,055	0,045	0,037	0,03	0,013	5E-04	0,001	4E-04	2E-04	9E-04	5E-04	3E-04	2E-04	1E-04	6E-04	3E-04	2E-04	1E-04
35	0,006	0,064	0,104	0,115	0,106	0,094	0,079	0,065	0,053	0,044	0,034	0,026	0,011	1E-04	6E-04	4E-04	2E-04	0,005	0,002	0,001	9E-04	6E-04	4E-04	3E-04	2E-04	1E-04
36	0,011	0,079	0,117	0,119	0,106	0,08	0,074	0,06	0,049	0,038	0,028	0,023	0,01	4E-05	3E-04	3E-04	2E-04	0,008	0,005	0,003	0,002	0,001	1E-03	7E-04	5E-04	2E-04
37	0,016	0,106	0,134	0,121	0,1	0,081	0,066	0,054	0,042	0,032	0,026	0,022	0,009	2E-05	1E-04	2E-04	1E-04	0,009	0,006	0,004	0,003	0,002	0,001	8E-04	3E-04	2E-04
38	0,031	0,158	0,149	0,113	0,087	0,069	0,056	0,044	0,034	0,028	0,023	0,02	0,009	1E-05	7E-05	1E-04	1E-04	0,008	0,006	0,004	0,003	0,002	0,001	0,001	4E-04	3E-04
39	0,096	0,23	0,128	0,085	0,064	0,052	0,043	0,034	0,028	0,024	0,02	0,017	0,008	6E-06	4E-05	7E-05	7E-05	0,007	0,006	0,004	0,003	0,002	0,002	0,001	5E-04	4E-04
40	0,343	0,155	0,068	0,051	0,043	0,038	0,033	0,027	0,023	0,02	0,017	0,015	0,007	4E-06	3E-05	5E-05	6E-05	0,006	0,005	0,004	0,003	0,003	0,002	0,001	5E-04	4E-04
41	0,054	0,101	0,075	0,028	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1E-05	3E-05	2E-04	0,028	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	0,055	0,104	0,077	0,029	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3E-05	2E-04	7E-04	0,006	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0,056	0,105	0,078	0,029	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6E-05	2E-04	9E-04	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0,007	0,053	0,091	0,108	0,105	0,095	0,081	0,067	0,055	0,045	0,037	0,03	0,013	0,027	0,001	9E-05	3E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0,007	0,055	0,093	0,109	0,108	0,097	0,082	0,068	0,056	0,046	0,038	0,031	0,013	0,004	0,002	3E-04	9E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	0,308	0,056	0,095	0,11	0,108	0,097	0,082	0,068	0,056	0,046	0,037	0,031	0,013	0,001	0,002	4E-04	1E-04	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 5.4: (continuação)

27	0,001	0,005	0,007	0,009	0,01	0,011	0,012	0,005	0,001	0,004	0,008	0,016	0,028	0,05	0,093	0,14	0,272	4E-04	0,003	0,004	5E-05	4E-04	0,003	0,004	5E-05	4E-04	0,003	0,004	5E-04	0,002	0,002	1	0,00%
28	0,002	0,006	0,008	0,01	0,012	0,012	0,012	0,006	0,005	0,016	0,028	0,05	0,093	0,14	0,272	0,003	0,004	5E-04	0,003	0,004	5E-05	4E-04	0,003	0,004	5E-05	4E-04	0,003	0,004	5E-04	0,002	0,002	1	0,00%
29	0,002	0,007	0,01	0,012	0,014	0,014	0,014	0,007	0,008	0,025	0,042	0,064	0,088	0,091	0,227	2E-04	0,002	0,003	3E-04	0,003	0,003	3E-04	0,003	0,003	3E-04	0,003	0,003	0,004	4E-04	0,003	0,004	1	0,00%
30	0,002	0,008	0,015	0,019	0,017	0,017	0,017	0,008	0,009	0,028	0,038	0,058	0,067	0,172	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	1	0,00%	
31	0,003	0,01	0,015	0,019	0,02	0,02	0,02	0,009	0,008	0,026	0,036	0,056	0,065	0,172	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	1	0,00%	
32	0,004	0,013	0,019	0,023	0,025	0,023	0,023	0,011	0,007	0,023	0,032	0,041	0,051	0,151	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	1	0,00%	
33	0,004	0,016	0,023	0,029	0,03	0,028	0,028	0,012	0,006	0,019	0,026	0,031	0,033	0,045	0,151	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	1	0,00%	
34	0,005	0,018	0,029	0,036	0,038	0,034	0,034	0,014	0,005	0,016	0,022	0,026	0,031	0,041	0,151	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	1	0,00%	
35	0,006	0,023	0,035	0,045	0,049	0,043	0,043	0,016	0,004	0,013	0,018	0,022	0,026	0,031	0,041	0,151	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	1	0,00%	
36	0,006	0,024	0,04	0,055	0,065	0,058	0,058	0,02	0,003	0,004	0,011	0,014	0,015	0,017	0,017	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	1	0,00%	
37	0,006	0,023	0,04	0,062	0,068	0,068	0,068	0,027	0,003	0,008	0,01	0,012	0,014	0,014	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	1	0,00%	
38	0,006	0,023	0,04	0,062	0,068	0,068	0,068	0,027	0,003	0,008	0,01	0,012	0,014	0,014	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	1	0,00%	
39	0,006	0,023	0,04	0,062	0,068	0,068	0,068	0,027	0,003	0,008	0,01	0,012	0,014	0,014	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	1	0,00%	
40	0,006	0,023	0,04	0,062	0,068	0,068	0,068	0,027	0,003	0,008	0,01	0,012	0,014	0,014	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	1	0,00%	
41	0,006	0,023	0,04	0,062	0,068	0,068	0,068	0,027	0,003	0,008	0,01	0,012	0,014	0,014	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	1	0,00%	
42	0,006	0,023	0,04	0,062	0,068	0,068	0,068	0,027	0,003	0,008	0,01	0,012	0,014	0,014	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	1	0,00%	
43	0,006	0,023	0,04	0,062	0,068	0,068	0,068	0,027	0,003	0,008	0,01	0,012	0,014	0,014	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	1	0,00%	
44	0,006	0,023	0,04	0,062	0,068	0,068	0,068	0,027	0,003	0,008	0,01	0,012	0,014	0,014	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	1	0,00%	
45	0,006	0,023	0,04	0,062	0,068	0,068	0,068	0,027	0,003	0,008	0,01	0,012	0,014	0,014	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	1	0,00%	
46	0,006	0,023	0,04	0,062	0,068	0,068	0,068	0,027	0,003	0,008	0,01	0,012	0,014	0,014	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	1	0,00%	

5.2 Modelo de Condução e Radiação

O modelo de condução e radiação em regime transitório apresentado no capítulo 4 foi implementado e os resultados numéricos obtidos são analisados neste item, comparando-os com medições experimentais.

Fluxos energéticos

A figura 5.1 apresenta as curvas obtidas da modelagem teórica para as diferentes parcelas de energia, isto é, fornecida pelo plasma, perdas, latente e sensível.

O fluxo total de energia fornecida pelo plasma é imposto ao modelo a partir da linearização da potência medida no reator experimental, conforme mostrado na figura 4.3, reduzida em 5 % visando acomodar perdas no reator real não modeladas devidas a bocais e vazamentos.

A potência indicada por "sensível", representa a parcela da energia total destinada a aumento de calor sensível dos materiais do reator e do banho. A fusão do banho é descrita pela curva de fluxo de calor latente e as perdas por convecção para o meio são também descritas nos gráficos.

A figura 5.2 apresenta os fluxos de energia integrados durante o período de ensaio experimental. Observa-se, que em todos os gráficos há conservação de energia, garantindo a ausência de falsa geração no modelo. As oscilações nos fluxos energéticos durante a fusão são devidas ao tamanho da malha adotada no banho. Uma malha mais refinada apresentaria resultados mais próximos do esperado em situação real.

As figuras 5.3 e 5.4 mostram gráficos das temperaturas medidas e calculadas para todos os 5 termopares instalados no reator a plasma, indicados na figura 4.2a. Observa-se que as curvas mostram grande similaridade, apesar das maiores flutuações registradas nas curvas referentes às medições pelos termopares. As temperaturas experimentais não partem do valor da temperatura ambiente, já que o reator encontrava-se ainda em fase de resfriamento de ensaio anterior.

As figuras 5.5 a 5.9 apresentam as curvas de temperatura medidas e calculadas para os diferentes termopares instalados no reator, conforme apresentado na figura 4.2. A figura 5.10 apresenta a temperatura no pé do arco calculada, sendo a curva do termopar número 5 interno ao reator apresentada conjuntamente apenas como referência. Observa-se em primeiro lugar, que as curvas calculadas têm comportamento semelhante às temperaturas medidas em ensaio. As curvas das figuras 5.5 e 5.6 para os termopares instalados distantes da superfície interna do reator, apresentam uma maior inércia, como seria esperado. O plasma é desligado após aproximadamente 7 horas de ensaio, e o tempo de resposta para resfriamento dos termopares das figuras 5.5 e 5.6 é maior que o dos termopares mais próximos à superfície interna do reator, correspondente às figuras 5.7 e 5.8.

A temperatura indicada no modelo pelo termopar 5 da figura 5.9 apresenta o menor tempo de resposta, já que no modelo o ponto calculado encontra-se junto à superfície interna do reator. Nota-se nesta figura que o modelo calcula temperatura mais baixa que a fornecida pela medição no início do aquecimento e posteriormente atinge

temperatura mais elevada. A diferença inicial deve-se principalmente às diferentes localizações do termopar no reator e no modelo. No reator, o termopar encontra-se imerso na atmosfera do reator, registrando flutuações internas da temperatura devidas a variações da emissão radioativa do plasma e a efeitos de convecção. Já no modelo o ponto correspondente ao termopar encontra-se na superfície interna do retratário e o cálculo apenas considera efeitos de radiação e condução. As temperaturas indicam maior inércia às flutuações de potência, como pode ser observado na fase inicial de aquecimento.

Outro fator que interfere nesta região do gráfico e também no pico de temperatura, que é mais elevado no modelo, é a adoção do valor de 5% para perdas generalizadas. Sabe-se que as perdas não são proporcionais à energia de entrada, mas função da temperatura interna, entre outras.

Nas demais regiões do gráfico, os desvios são pequenos, da ordem de 10%. A figura 5.8 mostra as curvas de temperatura, medida e calculada, para o termopar instalado a meia altura na lateral do revestimento próxima à superfície interna. No período de aquecimento, ambas indicam os efeitos dos aumentos de potência do plasma.

Nota-se uma defasagem entre as curvas medida e calculada quanto ao tempo de resposta. A curva do modelo responde mais rápido que a do reator, novamente por desvio nas propriedades adotadas para os materiais, sendo que a relação entre calor específico e condutividade térmica mostra-se menor no modelo que no reator real.

O mesmo efeito é notado nos demais termopares, como pode ser verificado nas figuras 5.5, 5.6 e 5.7.

Na figura 5.5, a temperatura calculada é constantemente maior que a medida, podendo significar a existência de resistência de contato no termopar provida da instalação.

Na figura 5.7, além dos efeitos mencionados, nota-se que a temperatura calculada cai mais rapidamente após o desligamento do plasma. Comparando-se as mesmas curvas nas figuras 5.4 e 5.5, observa-se que as temperaturas medidas aproximam-se mais rapidamente das temperaturas internas após o desligamento. Como este termopar encontra-se instalado mais próximo ao banho, o desvio pode significar que a energia fornecida ao banho no modelo foi menor que no reator. Considerando-se que maior parcela de energia é armazenada nas regiões abaixo do banho, explica-se o menor gradiente de temperatura na medição e inclusive a inversão verificada após 20 horas de ensaio na figura 5.3, quando o termopar 3 apresenta a temperatura máxima.

Reforçando esta hipótese, observa-se no gráfico da figura 5.11, que a parcela da energia total fornecida ao banho pelo modelo de radiação foi da ordem de 25%. Parisi (1990) sugere que esse valor encontra-se entre 30 e 40%, significando que o modelo de radiação pura fornece menos energia que a tocha real. Esta situação era esperada, já que o efeito Joule não foi considerado no banho.

A distribuição de temperatura no reator calculada pelo modelo é apresentada na forma de gráfico na figura 5.12 a 6 horas do início do ensaio. As tabelas com as distribuições de temperatura calculadas são apresentadas no apêndice em intervalos de 2 horas.

Observa-se que o modelo de radiação impõe concentrações de energia maiores nas regiões próximas ao arco de plasma. As temperaturas elevadas no pé do arco (ponto I da figura 4.2a) são esperadas, porém sempre abaixo da temperatura de volatilização do metal do banho, da ordem de 2500°C. Como o efeito Joule no banho não foi modelado, a temperatura nesta região para o reator real deverá permanecer neste patamar se atingida a volatilização, ou a temperaturas acima da calculada se ainda em aquecimento. A

temperatura elevada no cátodo (ponto J da figura 4.2b) é esperada no modelo de radiação devido à geometria do problema.

Entretanto, no reator real, o cátodo será resfriado pelo fluxo de gás de plasma, mantendo-se a temperaturas bastante abaixo da modelada.

A figura 5.10 mostra a evolução da temperatura no pé do arco, sendo apresentada a curva de temperatura interna medida no reator como referência. Nesta, é observada a imediata resposta na curva de temperatura no ponto onde há aumento de potência.

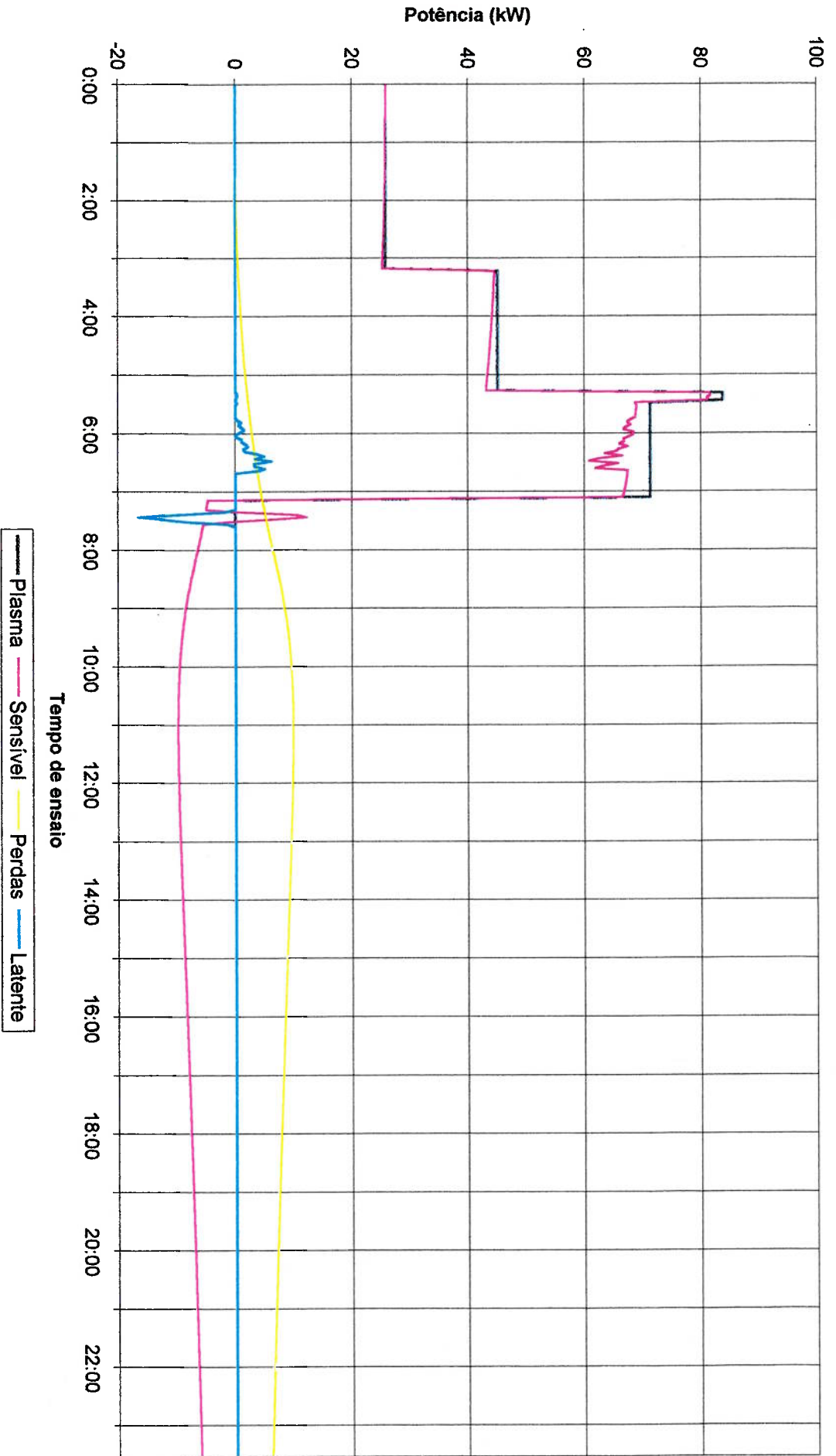
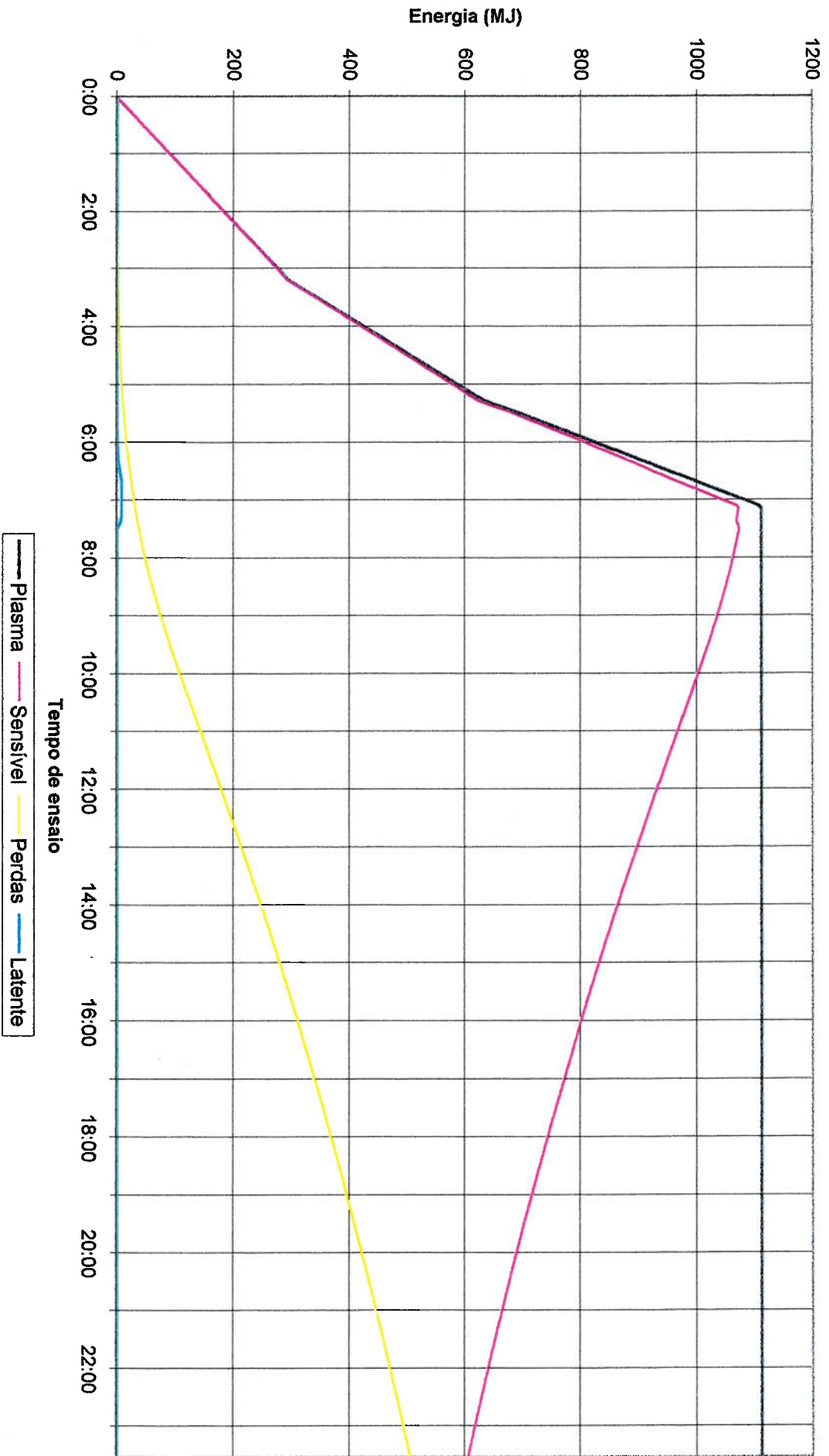
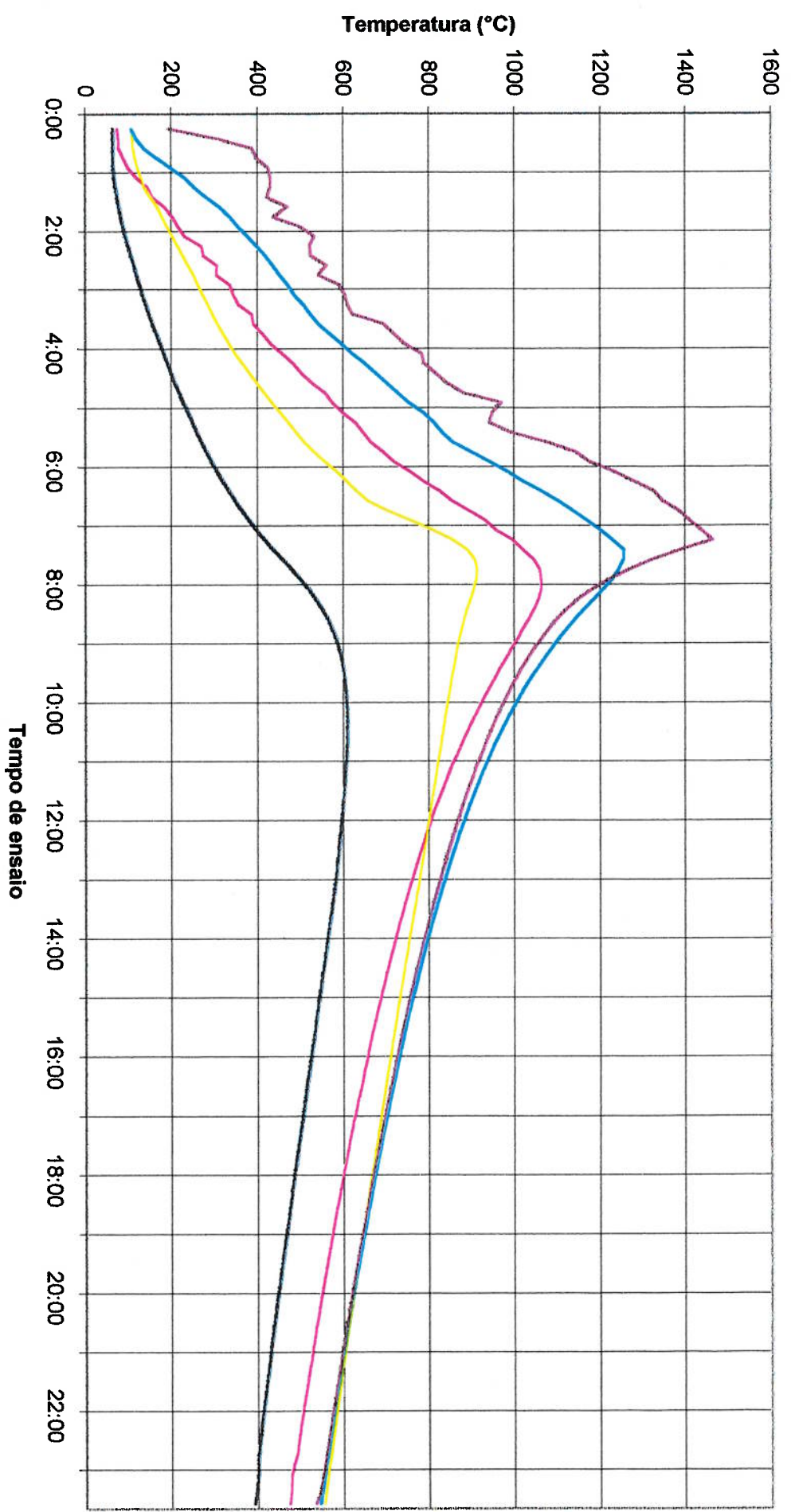


Figura 5.1: Fluxos energéticos calculados pelo modelo

Figura 5.2: Distribuição energética calculada pelo modelo



Todas da ensaio



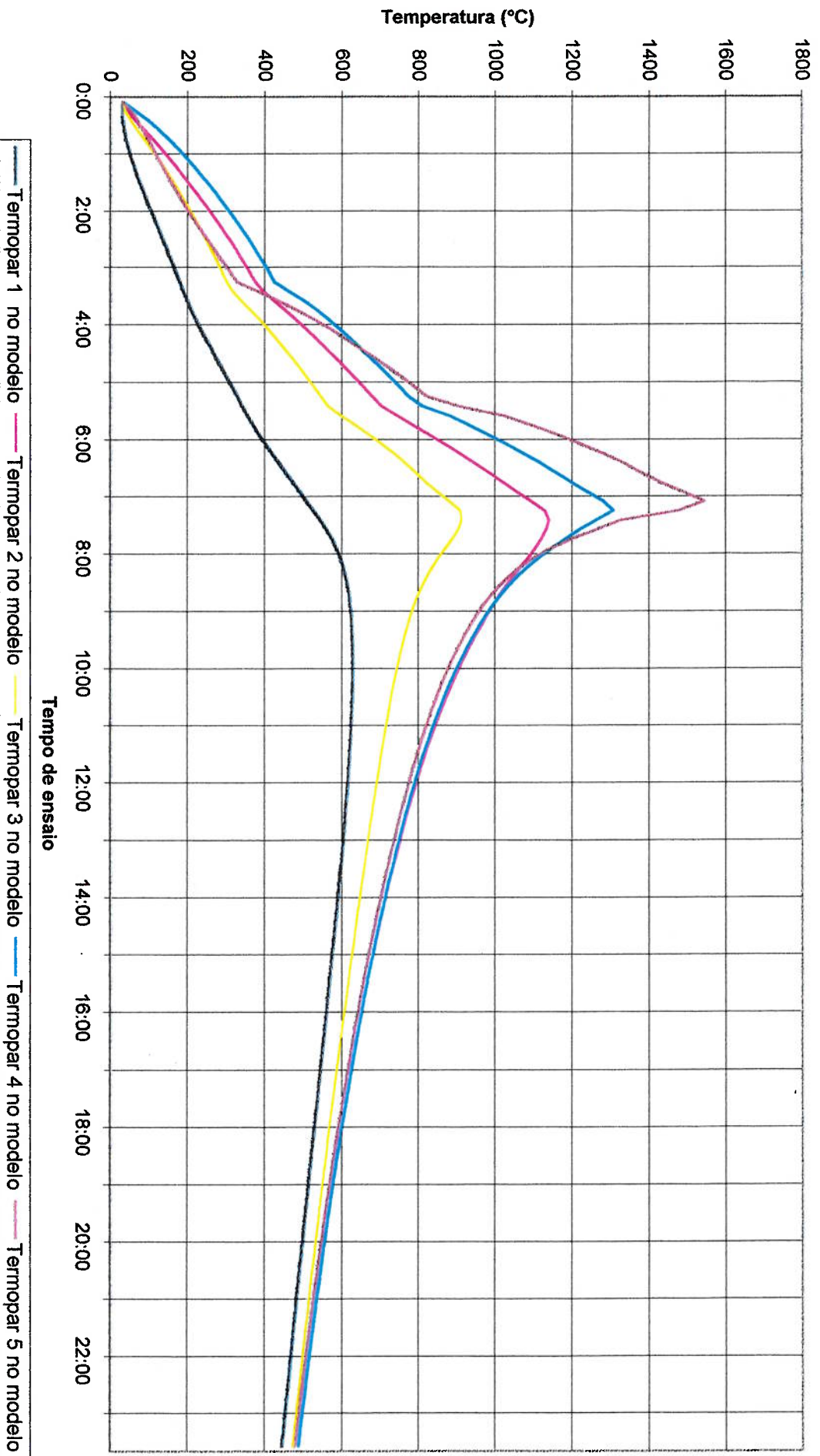


Figura 5.4: Curvas de temperatura nos termopares calculada

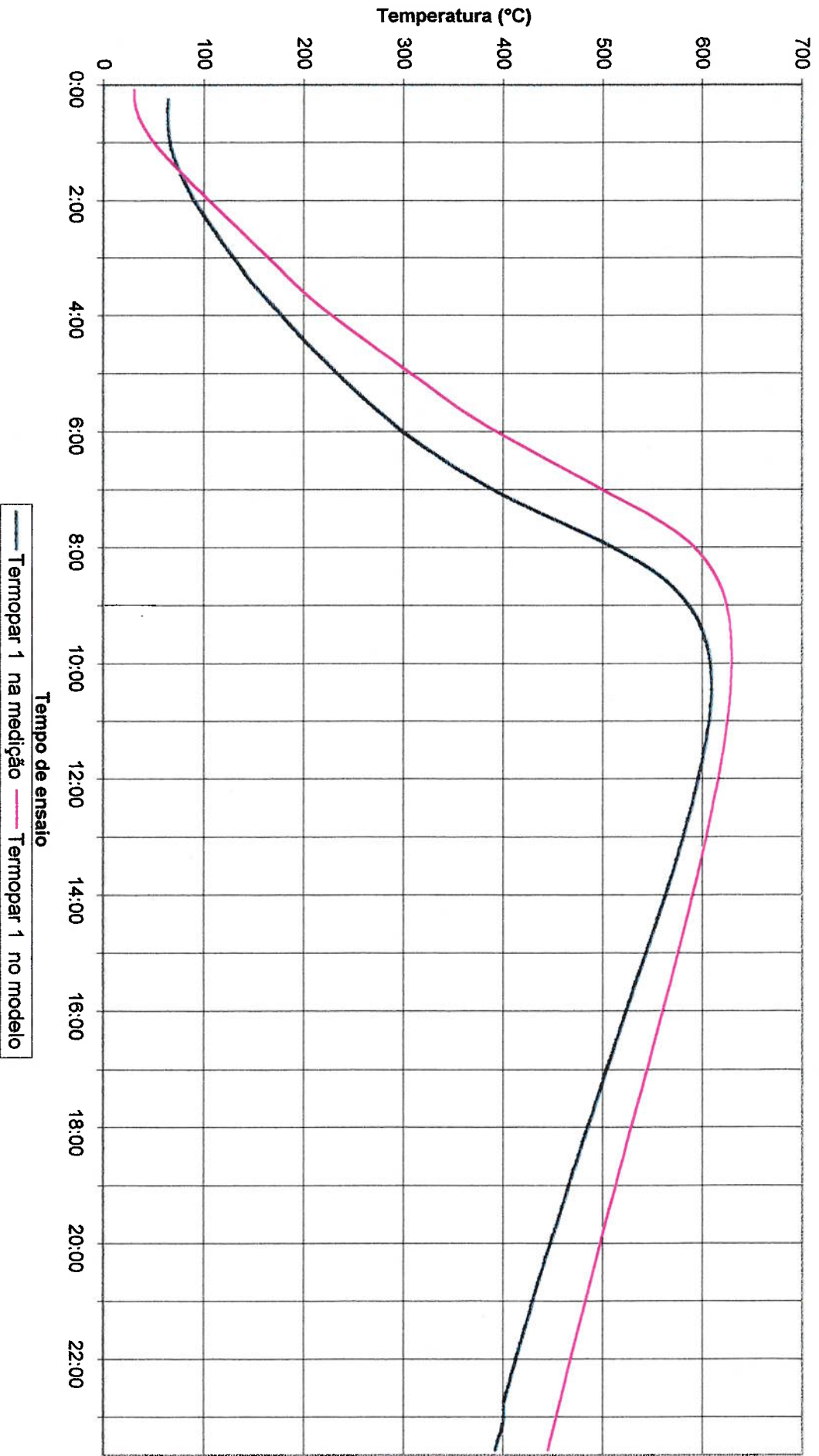


Figura 5.5: Curvas de temperatura calculada e medida para o termopar 1

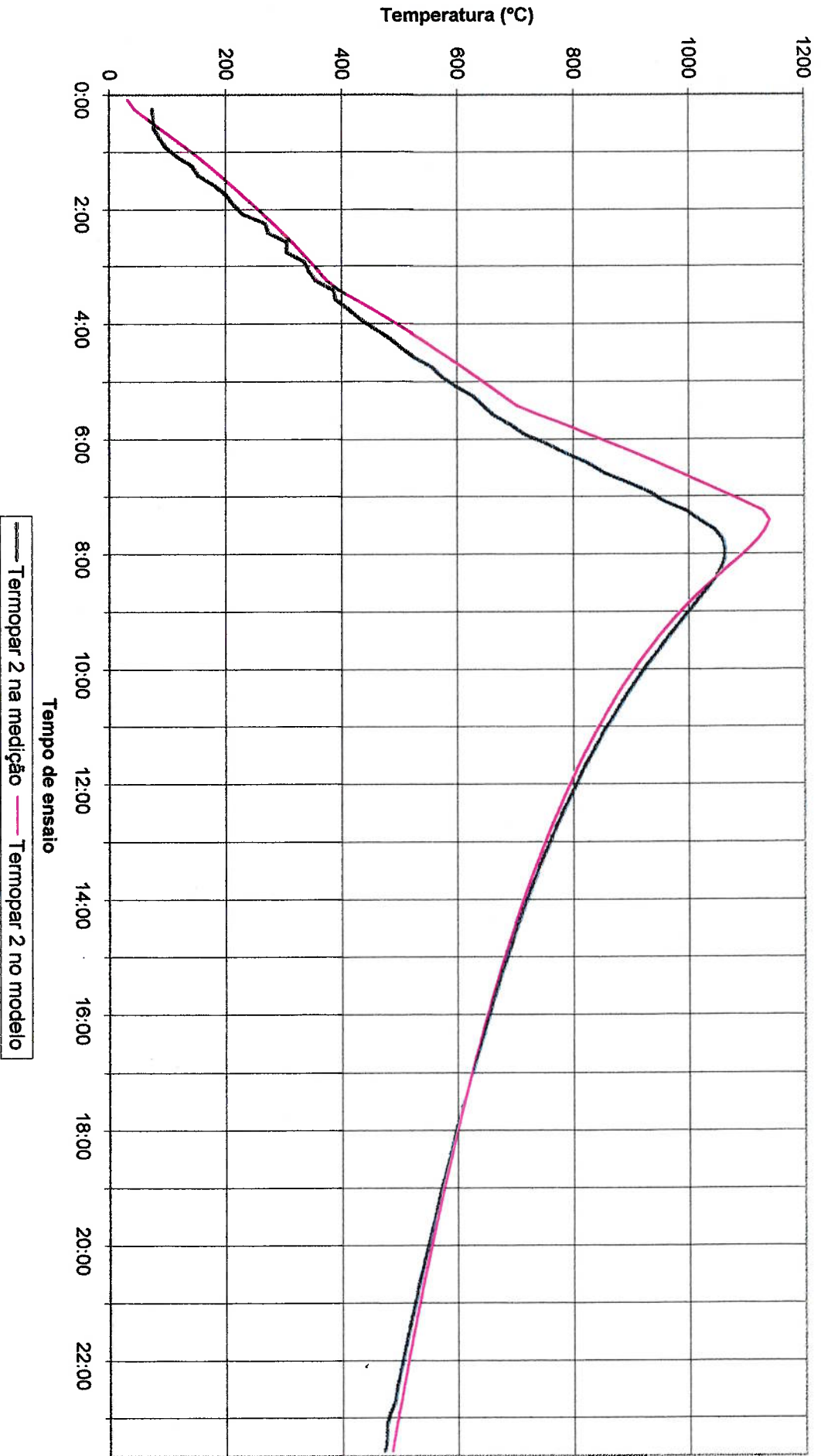


Figura 5.6: Curvas de temperatura calculada e medida para o termopar 2

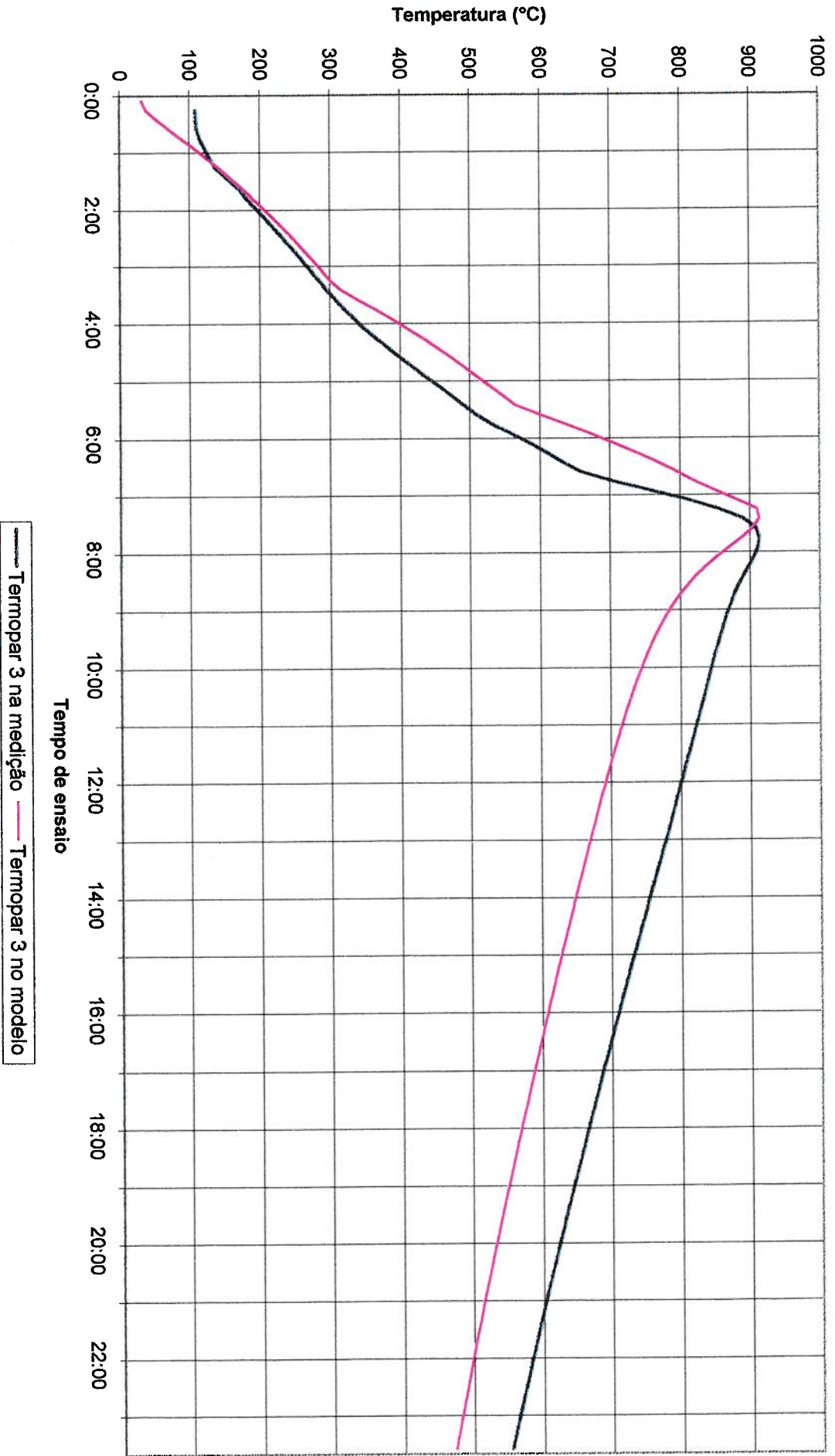


Figura 5.7: Curvas de temperatura calculada e medida para o termopar 3

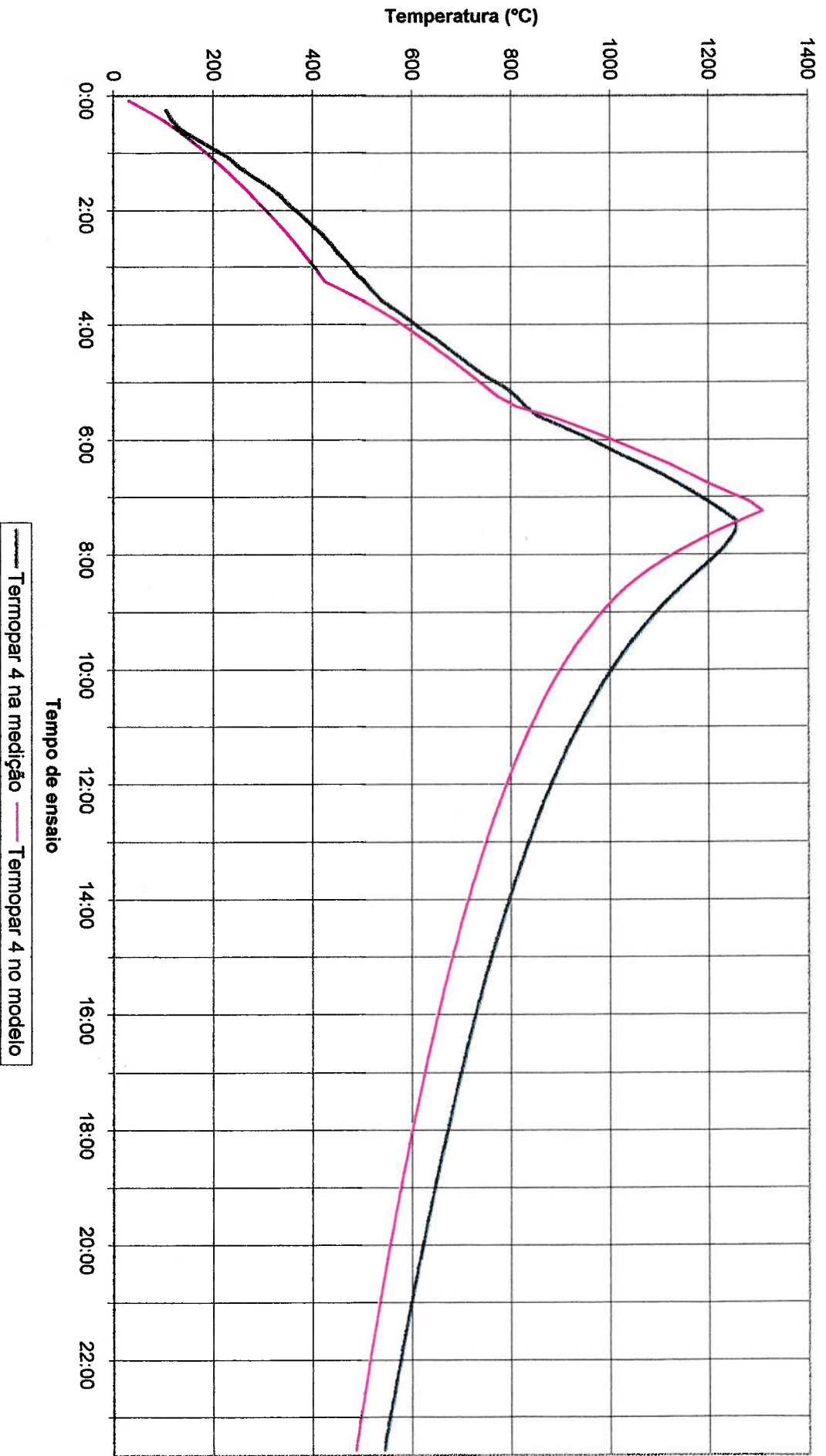
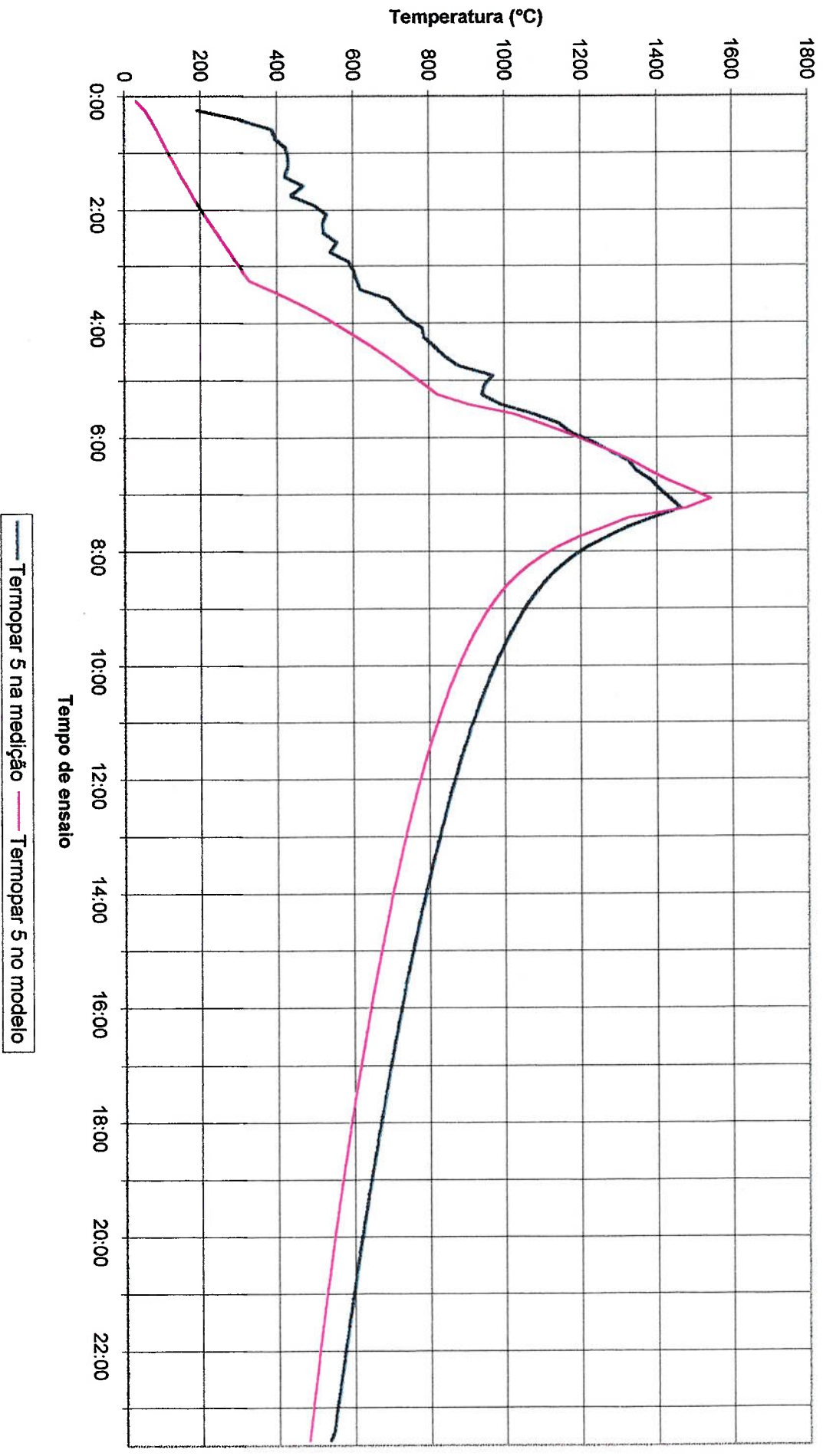


Figura 5.8: Curvas de temperatura calculada e medida para o termopar 4

Figura 5.9: Curvas de temperatura calculada e medida para o termopar 5



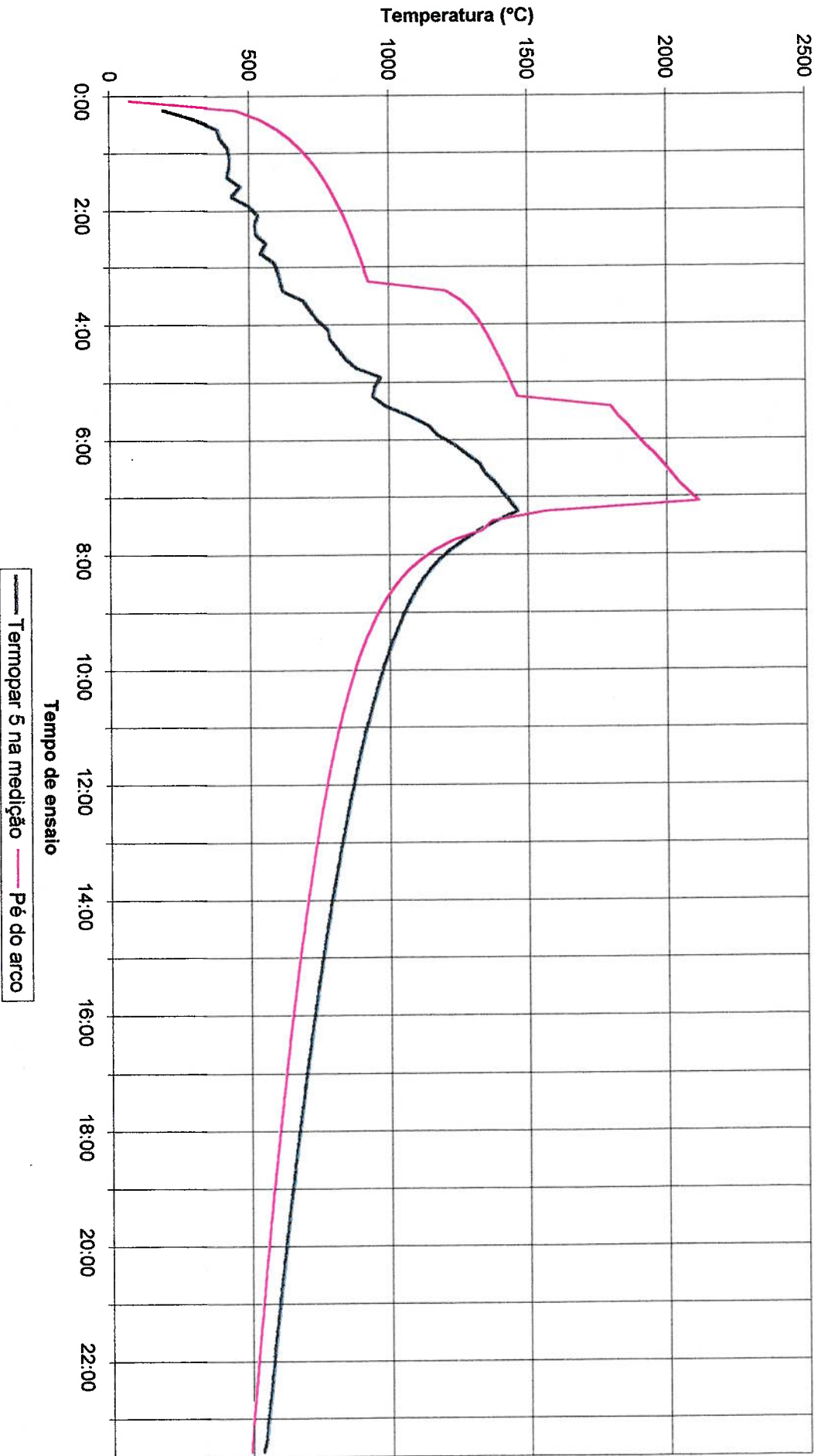


Figura 5.10: Curvas de temperatura calculada no pé do arco com termopar 5 como referência

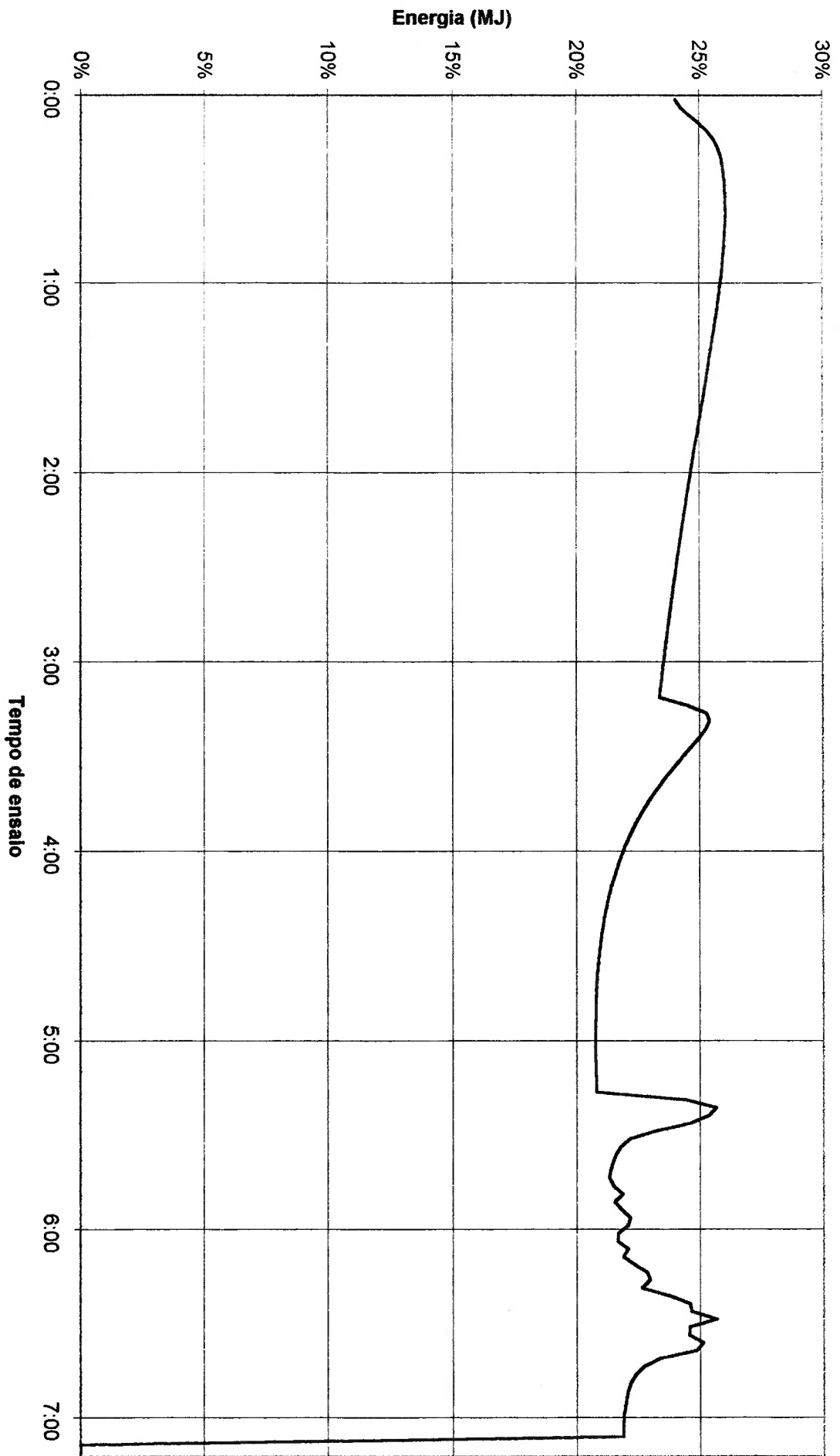


Figura 5.11: Parcela da energia total absorvida pelo banho

Capítulo 6

CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O modelo do reator apresentou resultados consistentes, servindo como ferramenta

para projeto e análise de reatores a plasma. A comparação dos resultados da simulação com os dados experimentais mostrou que a distribuição de temperaturas calculada acompanha as curvas obtidas por termopares instalados no reator. Assim sendo o modelo mostrou-se útil para o estudo dos efeitos da distribuição não homogênea de energia dentro do reator a

plasm

Além disso, o modelo mostrou resultados consistentes com os trabalhos experimentais de Parisi (1984) e que poderiam ser complementados pela inclusão do efeito Joule no banho.

Esta dissertação permitiu também que novas expressões e técnicas de cálculo pudessem ser acrescentadas à literatura dos fatores de forma de radiação.

A principal fonte de desvios observada entre o modelo e os experimentos provém dos valores das propriedades dos materiais envolvidos. Em futuras análises, é aconselhável a determinação minuciosa das propriedades dos materiais aplicados no reator com indicação de desvios experimentais nos valores empregados, para que possam ser analisadas as incertezas nestes parâmetros fundamentais o que deve levar a resultados numéricos mais precisos.

Da mesma forma, um estudo das incertezas de temperatura também seria útil, apesar de serem esperados erros menos representativos em relação àqueles providos das propriedades dos materiais.

O modelo poderá ser ampliado, considerando-se efeito Joule no banho, trocas de calor por convecção, ou até a modelagem completa da tocha dentro do reator.

Algumas providências a serem adotadas, visando a evolução do modelo, são descritas a seguir:

- determinação das trocas por efeito Joule no banho em ensaios experimentais ou simulações numéricas considerando variação em função da temperatura do banho e condições do plasma.

- inclusão no modelo de capacidades térmicas variáveis.

- redução da malha na região do banho e inclusão de mecanismos de troca de calor por convecção.

- trocas de calor por convecção referentes à tocha e devidas à volatilização do metal do banho.

- evaporação da umidade presente no refratário.
- emissividades variáveis com temperatura e estado do banho.

- determinação das propriedades dos materiais com análises de incertezas de medição, empregando-se amostras dos produtos efetivamente usados na construção do reator.

- medição das resistências de contato no refratário para inclusão no modelo.
- verificação da existência de resistências de contato entre temporar e refratário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bender, O. W., Vicente, L. C., Collares, M. P., Estudo da Característica operacional em Sistema a Plasma de Arco Transferido” Relatório Interno IPT (1990)
- Beudin, V., Guillard, B., Pineau, D., e Labrot, M., Soler, G., Favier, J. M., Boudeau, A., “Plasma Vitrification of Fly Ash” *Int. Symp. On Environ. Tech.-Plasma Systems and Applications*—Atlanta pp. 125-128 (1995)
- Bornside, D. E., e Brown, R. A., “View Factor Between Differing-Diameter, Coaxial Disks Blocked by a Coaxial Cylinder” *J. Thermophysics H. T.*, vol. 4 no. 3 pp. 414-416 (1990)
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit “Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes-17. BimSchV)” Bonn (1990)
- Carter, G. W., Tsangaris, A. V., “Plasma Gasification of Municipal Solid Waste” *Int. Symp. On Environ. Tech.-Plasma Systems and Applications*—Atlanta pp. 321-332 (1995)
- Carter, G. W., Tsangaris, A. V., “Plasma Gasification of Biomedical Waste” *Int. Symp. On Environ. Tech.-Plasma Systems and Applications*—Atlanta pp. 239-250 (1995)
- Cetseb – “Resolução de Diretoria nº 007/97/P de 06/02/97” (1997)
- Chapman, C. D., Williams, J. K., Heanley, C. P., Idles, D. M., Forde, A. J., Risdon, G., “Development of a Plasma Reactor for the treatment of Incinerator Ashes” *Int. Symp. On Environ. Tech.-Plasma Systems and Applications*—Atlanta pp. 129-140 (1995)
- Dempsey, C. R e Oppelt, E. T., “Incineration of Hazardous Waste: A Critical Review Update” *J. Air a. Waste Manag. Ass. Vol. 43*, (1993)
- E.P.A., Landrum, V. J., Barton, R. G., Neulich, R., Turner, M., Wallace, D., Smith, S., “Medical Waste Management and Disposal” Noyes Data Corporation (1991)
- Gandolla, M. “Aterros Sanitários e Incineradores – A Experiência Europeia” Seminário CETESB (1996)
- Gauvin, W. H., “Some Characteristics of Transferred-Arc Plasmas” *Plasma Chem. and Plasma Processing*, vol. 9, No.1 suppl. Pp.65s-85s (1989)
- Goldstein, R. J., Sparrow, E. M. e Jones, D. C. “Natural Convection Mass Transfer Adjacent to Horizontal Plates” *Int. J. Heat Mass Transfer*, 16, 1025-1035 (1973)
- Holman, J. P. “Transferência de Calor” (1983)

- Horbogen, E., Bode, R., Donner, P., (Hrsg.) "Recycling – Material Wissenschaftliche Aspekte" (1992)
- Hsu, K. C., Etemadi, K., e Pfender, E., "Study of Free-burning High-intensity Argon Arc" J. Appl. Phys. 54 vol. 3 pp. 1293-1301 (1983)
- Incropera, F. P. e DeWitt, D.P. "Fundamentals of heat and Mass Transfer- 4th Ed." (1996)
- Kakag, S. e Yener, Y., "Convective Heat Transfer"- 2nd Ed., (1995)
- Mac Rae, D. R., "Plasma Arc Process Systems, Reactors, and Applications" *Plasma Chem. and Plasma Processing*, vol. 9, No.1 suppl. pp.85s-118s (1989)
- Magnesita, Comunicações pessoais, (1996)
- Minning, C. P., "Shape Factors between Coaxial Annular Disks Separated by a Solid Cylinder" *AIChE J.* vol. 17 no. 3 pp. 318-320 (1979)
- Parisi, P. J. e Gauvin, W. H., "Heat Transfer from a Transferred-Arc Plasma to a Cylindrical Enclosure" *Plasma Chem. and Plasma Processing*, vol. 11, No.1 pp57-79 (1991)
- Prefeitura Municipal de São Caetano do Sul – "Usina de Beneficiamento de Resíduos Sólidos – Processo Termoseletivo " Relatório de Impacto de Meio Ambiente (1995)
- Rea, S. N., "Rapid Method for Determining Concentric Cylinder Radiation View Factors" *AIChE J.* vol. 13 no. 8 pp. 1122-1123 (1975)
- Schröter, R.A., Szente, R.N., Bender, O.W., Garcia, M.G., "Recovering Aluminium via Plasma Processing", J. O. M. pp 52-55 (1997)
- Schröter, R.A., Szente, R.N., Bender, O.W., Garcia, M.G., Souza, L.B. "Galvanic Sludge Treatment" *Ebrates* (2000)
- Siegel, R., e Howell, J. R., "Thermal Radiation Heat Transfer" 2nd Ed., McGraw Hill – New York (1981)
- Soelberg, N. R., Chambers, A. G., O'Connor, W. K., Anderson, G. L., Eddy, T. L., "Arc Melter Vittrification of Organic and Chloride Containing Materials" *Int. Symp. On Environm. Tech.-Plasma Systems and Applications* (1995)
- Stepanek, J., "Taschenbuch Industrielle Wärmetechnik" 3. Ed., Vulkan Verlag–Essen (19945)
- Szente, R.N., Cruz, A.C., Souza, L.B., "Aluminium Can Recovery by Thermal Plasma" (1993)

Vogg, H. "Bildung und Emission von Schadstoffen bei der Müllverbrennung" Karlsruhe (1985)

Vogg, H. "Drei R-Verfahren" Relatório de Divulgação (1995).

Wogroly, E., "Desinfection allein ist keine geeignete Entsorgung für Spitalmüll" Comunicação (1997)

TEMPERATURA
TABELAS DE DISTRIBUIÇÃO DE

Apêndice

Tabela A.1: Distribuição de temperatura no refratário após 2h do início do ensaio.

J:	I:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
33	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
32	0	36,09	36,01	35,3	34,62	34,21	33,83	33,38	32,83	32,22	31,96	31,72	31,49	31,29	31,17	31,07	30,97	30,88	30,78	30,7	30,64	30,59	30
31	0	42,81	42,81	42,71	40,49	40,67	40,51	39,7	38,08	35,79	34,82	33,91	33,12	32,46	32,12	31,81	31,54	31,27	30,93	30,67	30,53	30,56	30
30	0	50,41	50,58	51,07	49,92	50,93	50,9	49,43	46,21	41,51	39,5	37,64	36,02	34,69	34,01	33,43	32,89	32,35	31,53	30,93	30,6	30,55	30
29	0	59,07	59,53	61,14	65,41	67,67	67,66	65,07	59,34	50,93	47,31	43,95	41,04	38,67	37,49	36,5	35,63	34,7	32,74	31,46	30,79	30,55	30
28	0	68,76	69,66	73,8	90,29	94,21	94,04	89,65	80,14	66,06	59,95	54,28	49,37	45,41	43,47	41,92	40,75	39,89	34,6	32,17	31,04	30,55	30
27	0	85,05	86,23	91,05	99,4	103,3	103,1	98,32	87,6	71,21	64,02	57,4	51,73	47,19	44,98	43,27	42,07	41,38	35,85	32,87	31,34	30,57	30
26	0	103,7	105,2	110,9	118,9	123,7	123,7	118,2	105	82,96	72,9	63,91	56,44	50,52	47,65	45,46	43,96	43,16	36,87	33,4	31,57	30,6	30
25	0	125,2	127,6	136,8	150,3	157,4	157,7	151,5	134,9	103	86,84	73,74	63,52	55,29	51,14	48,04	46	44,98	37,75	33,81	31,74	30,64	30
24	0	147,8	151,6	167,8	196,9	207,9	208,6	202,2	182,3	135,5	104,5	86,08	73,22	61,7	54,54	49,97	47,22	45,91	37,93	33,83	31,75	30,67	30
23	0	186,7	191	208,5	30	30	30	30	30	164,9	134,7	113,8	100,7	94,25	73,19	58,42	48,33	41,56	36,12	33,09	31,51	30,76	30
22	0	218,2	222,7	240,9	30	30	30	30	30	199,7	163,7	138,8	123,2	115,5	87,95	68,18	54,43	45,17	37,9	33,95	31,92	30,98	30
21	0	251	255,7	274,8	30	30	30	30	30	236,5	194,5	165,2	146,6	137,3	103,5	78,81	61,44	49,61	40,26	35,15	32,54	31,33	30
20	0	289,6	294,3	313,7	30	30	30	30	30	279,8	230,4	195,7	173,6	162,3	121,7	91,52	69,97	55,13	43,27	36,74	33,38	31,86	30
19	0	338,2	342,3	359,3	30	30	30	30	30	329,8	271,5	230,2	203,6	190	142,5	106,6	80,55	62,35	47,48	39,1	34,69	32,65	30
18	0	409,9	410,6	416	30	30	30	30	30	383,4	313,8	263,9	231,2	214,6	163,5	124,8	96,44	75,76	56,67	44,65	37,63	33,81	30
17	0	577,1	554,2	504,5	30	30	30	30	30	434,4	350,1	286,5	240,6	209,6	184,8	165,9	152,2	143	94,68	64,59	46,53	35,3	30
16	0	1693	1139	704,3	30	30	30	30	30	481,8	382,6	306,3	248,7	206,4	186,4	171,2	160,5	154,4	103,6	70,46	49,69	36,78	30
15	0	30	30	30	30	30	30	30	30	517,2	407,3	322,8	259,1	213	191,8	175,9	165	158,8	106,9	72,61	50,89	36,78	30
14	0	30	30	30	30	30	30	30	30	529,2	412,7	324	257,9	210,4	188,8	172,8	161,8	155,7	105,1	71,61	50,41	36,61	30
13	0	30	30	30	30	30	30	30	30	504,1	384,5	297,2	234,1	189,7	169,8	155,1	145,2	139,7	94,95	65,78	47,54	35,84	30
12	0	833,2	719,3	633,1	555,7	482,6	429,3	391	366,4	379,4	289,1	224,6	178,6	146,4	132	121,3	114,1	110	76,44	55,24	42,44	34,62	30
11	0	706,4	668,3	604,9	541,7	474,2	422,7	385,3	360,3	336,6	243,9	191,9	155,2	129	117	108,1	102	98,6	69,46	51,34	40,56	34,15	30
10	0	698,1	662,2	599,9	537,7	470,8	419,6	382,4	357,8	245,8	213,2	174,8	143,5	120,3	109,6	101,6	96,08	92,95	66,04	49,43	39,65	33,92	30
9	0	383	376,6	356,7	334,1	299,2	268	240,6	211,5	159,9	138	118,1	101,2	87,98	81,68	76,85	73,46	71,45	53,22	42,36	36,27	33,01	30
8	0	228,1	226,1	218,9	210	191,1	172	153,2	132,3	104,9	92,45	81,42	72,1	64,73	61,17	58,4	56,42	55,2	43,73	37,2	33,77	32,22	30
7	0	150,7	150,1	147,9	145,2	134	121,3	108,1	93,4	76,45	68,69	61,92	56,24	51,74	49,55	47,83	46,59	45,8	38,34	34,3	32,34	31,66	30
6	0	103,9	104,2	105,9	110,8	103,8	94,65	84,68	73,74	61,59	56,13	51,49	47,63	44,57	43,07	41,86	40,96	40,35	35,18	32,59	31,48	31,23	30
5	0	86,54	86,95	88,91	95,73	90,46	82,83	74,39	65,19	55,22	51,02	47,29	44,16	41,65	40,39	39,36	38,55	37,93	33,92	31,94	31,13	31,06	30
4	0	72,15	72,51	74,24	87,86	83,49	76,67	69,08	60,84	52	48,36	45,1	42,34	40,12	38,99	38,03	37,2	36,36	32,89	31,4	30,86	30,91	30
3	0	57,58	57,67	57,99	56,63	54,03	50,64	47,02	43,19	39,21	37,61	36,18	34,98	34	33,5	33,05	32,62	32,15	31,27	30,74	30,58	30,77	30
2	0	46,11	46,01	45,59	41,27	39,73	38,2	36,66	35,1	33,52	32,91	32,36	31,9	31,52	31,32	31,15	30,98	30,82	30,59	30,45	30,45	30,66	30
1	0	37,1	36,84	35,27	33,89	33,07	32,46	31,95	31,52	31,14	31,01	30,88	30,78	30,7	30,65	30,62	30,59	30,57	30,55	30,55	30,56	30,59	30
0	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

Tabela A.2: Distribuição de temperatura no refratário após 4h do início do ensaio.

J.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
33	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
32	0	54,88	54,97	55,15	55,07	54,24	52,82	50,82	48,32	45,57	44,39	43,26	42,17	41,17	40,58	40,03	39,51	39,04	38,49	38,03	37,66	37,4
31	0	80,88	81,18	81,99	83,92	84,48	82,48	78	71,1	62,48	58,81	55,33	52,18	49,39	47,8	46,28	44,75	43,14	40,91	39,01	37,72	37,28
30	0	108,6	109,3	111,5	120,4	122,7	119,9	112,5	100,5	84,73	77,98	71,63	65,94	61,01	58,27	55,68	53,03	50,06	45,34	41,34	38,61	37,26
29	0	138,5	140	145,4	169,4	173,9	170,2	159,4	140,9	115,7	104,8	94,48	85,37	77,69	73,58	69,86	66,2	61,82	52,24	44,87	40,08	37,31
28	0	170,3	173,1	185,9	237	244	239,3	224,4	197,8	159,7	142,8	126,9	112,9	101,4	95,54	90,72	86,8	83,59	61,29	48,97	41,75	37,43
27	0	221,1	224,5	238,8	263,3	269,6	264,6	248,6	219,2	175,1	155	136,3	120,1	107	100,5	95,33	91,53	89,16	67,22	52,9	43,71	37,7
26	0	277	281,4	297,8	319	326,1	321	303,9	269,4	210,4	181,4	155,4	133,9	116,8	108,5	102,1	97,53	94,88	71,26	55,49	45,07	38,03
25	0	341,5	349,1	377,8	411,9	422,5	417,9	400,1	359,9	274,8	224,3	184,4	154,3	130,5	118,6	109,7	103,7	100,4	74,35	57,23	46,01	38,41
24	0	409,2	423,6	487,6	558,4	574,9	570,9	555	514,1	391,8	280,6	220,9	181,8	148,5	128,3	115,3	107,2	103,2	75,08	57,56	46,32	38,82
23	0	491,9	505,4	561,2	30	30	30	30	30	479	370,2	300,6	258,9	239,2	184,4	143,6	113,5	91,16	70,17	55,82	46,2	39,79
22	0	531,6	543,4	591,5	30	30	30	30	30	538,1	425,1	351,7	307,3	285,8	221,6	172	134,3	105,9	79,57	61,71	49,73	41,64
21	0	563,6	574,7	620	30	30	30	30	30	583,3	469,4	394,1	347,7	324,5	254,3	198,8	155,6	122,3	90,88	69,19	54,36	44,1
20	0	596,5	607,2	650,9	30	30	30	30	30	628,1	512,3	434,5	385,9	361	286,2	225,6	177,6	139,9	103,6	77,91	59,95	47,2
19	0	632,8	642,7	683,4	30	30	30	30	30	674,4	555	473,6	422,2	395,5	317,4	253,3	201,5	160,1	119	89,01	67,18	51,04
18	0	683,9	690,2	718,4	30	30	30	30	30	721	594,5	506,9	450,8	421,7	345,8	283,9	233,4	191,4	145,3	108,2	78,95	55,66
17	0	830,4	809,4	769,2	30	30	30	30	30	765,2	624,8	523,6	452,6	405,2	367,8	338,9	316,9	300,9	217,6	153,1	102,4	60,67
16	0	2113	1464	942,8	30	30	30	30	30	806,2	651,2	537,2	454	394,3	365,9	343,9	328	317,7	234,1	166,2	110,8	63,9
15	0	30	30	30	30	30	30	30	30	837,1	671,1	548,9	459,8	396,4	367,4	345,3	329,5	319,4	236,3	168,4	112,5	65,01
14	0	30	30	30	30	30	30	30	30	848,8	673,8	545,6	452,9	387,6	357,9	335,6	319,8	309,9	229	163,3	109,6	64,07
13	0	30	30	30	30	30	30	30	30	831,7	644,8	513	420,4	356,7	328,1	306,8	292	282,9	208,5	149,1	101,2	61,25
12	0	1342	1159	1034	925,3	832,3	768	722,7	692,5	716,1	537,5	422	345,2	293,9	271,1	254,2	242,5	235,3	173,7	125,6	87,75	56,96
11	0	1149	1089	997	907,5	820,9	758	712,8	681,2	641,4	462,7	370,1	308,3	265,7	246,4	232	221,9	215,6	159,6	116,2	82,43	55,27
10	0	1138	1081	990,6	902,2	816,1	753,3	708,2	677,3	468,9	409	341,9	289,2	251,3	233,8	220,7	211,4	205,5	152,5	111,5	79,75	54,41
9	0	635,5	626,9	601,1	571,9	528	488,1	450,5	405,1	316,2	279,1	245,3	216,9	194,7	184	175,5	169,3	165,2	124	92,71	69,08	50,88
8	0	408,2	405,9	397,4	386,9	362,3	335,5	306,3	270,9	222,7	200,7	181,1	164,3	150,7	143,9	138,5	134,3	131,4	99,99	76,76	59,89	47,56
7	0	295,2	295	297,2	293	277,7	257,8	234,4	206,5	173,6	158,5	144,9	133,2	123,6	118,7	114,7	111,6	109,4	84,12	66,07	53,55	44,98
6	0	220,4	221,8	227,9	241,3	232	216,1	196,3	172,9	146,4	134,4	123,7	114,5	106,7	102,7	99,24	96,44	94,31	72,58	58,01	48,62	42,79
5	0	187,9	189,4	196,4	218,2	211,5	197,3	179,1	157,8	134	123,8	114,4	106,1	99,01	95,19	91,8	88,81	86,29	66,81	54,12	46,33	41,86
4	0	157,2	158,5	164,4	204,4	199,3	186,1	169	148,9	126,8	117,4	108,7	101	94,26	90,55	87,1	83,68	79,75	60,77	50,07	44,08	41,04
3	0	120,9	121,4	123,3	137,2	133,5	124,8	113,7	100,8	87,06	81,36	76,06	71,28	67,02	64,52	62	59,23	55,78	49,24	44,21	41,24	40,2
2	0	87,61	87,65	87,65	89,28	86,5	81,48	75,23	68,22	60,92	57,95	55,18	52,67	50,39	49,03	47,67	46,21	44,59	42,23	40,36	39,38	39,58
1	0	57,42	57,12	55,27	53,57	51,8	49,87	47,79	45,65	43,57	42,75	41,98	41,28	40,66	40,31	40	39,73	39,5	39,27	39,14	39,11	39,19
0	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

Tabela A.3: Distribuição de temperatura no refratário após 6h do início do ensaio.

J.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
33	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
32	0	91,85	92,79	97,96	101,6	101,3	98,52	93,71	87,21	79,65	76,33	73,07	69,92	66,95	65,19	63,53	61,97	60,51	58,8	57,33	56,15	55,28
31	0	156	157,2	161,6	185,4	189,4	185,2	174,6	157,2	134	123,5	113,4	104	95,58	90,72	86	81,22	76,13	69,01	62,59	57,72	54,92
30	0	223,7	225,7	232,4	280	288,3	282,8	266,7	238,7	198,8	180,5	162,6	146,3	131,9	123,7	115,9	107,9	98,7	84,15	71,14	61,31	54,85
29	0	295,7	299,4	312,9	391,5	403,7	397,2	376,2	337,9	279,9	252,1	224,9	200,2	179	167,4	156,8	146,1	133,2	105,4	82,62	66,29	55,02
28	0	371,5	377,9	407,7	524,1	539	531,7	507	459,5	382	342,7	303,9	268,9	239,4	224,2	211,4	200,7	191,5	131,5	95,24	71,68	55,37
27	0	491,4	499	530,2	583,8	595,4	587,7	562,2	511,4	423,3	375,6	329,2	288,3	254,6	237,7	224,2	213,9	207,3	149,1	107,4	77,9	56,15
26	0	623,2	632,1	664,6	701,2	710,4	703,2	679	626,6	518,1	445,9	379	323,5	279,8	258,4	241,7	229,8	222,5	160,8	115,3	82,19	57,07
25	0	779	795,9	856	896,8	905,4	900	881,2	834,9	703,5	562,4	453,4	373,8	313,2	283,4	260,9	245,4	236,6	169,5	120,7	85,12	58,04
24	0	948,6	988,7	1179	1217	1224	1222	1216	1200	1107	715,4	541,1	437	354,6	306,5	274,8	254,6	243,8	172,5	122,4	86,34	59,06
23	0	1064	1094	1217	30	30	30	30	30	1180	891,1	713,9	609,4	558	448,5	358,1	284,7	225,6	165,4	120,4	86,98	61,38
22	0	1089	1115	1224	30	30	30	30	30	1207	940,9	774,1	673,5	621,9	506	406,7	323,5	255,1	185,9	134	95,24	65,13
21	0	1102	1128	1233	30	30	30	30	30	1222	967,9	807,3	709,2	657,5	541,2	439,8	353,3	280,9	205,9	148,6	104,6	69,7
20	0	1116	1141	1244	30	30	30	30	30	1238	989,9	832,4	735,6	683,7	568,3	466,5	378,7	304	225,1	163,2	114,6	75,01
19	0	1133	1157	1257	30	30	30	30	30	1256	1011	863,8	757	704,8	591,3	490,8	403,3	327,8	246,2	180,1	126,3	81,16
18	0	1162	1182	1270	30	30	30	30	30	1276	1027	867,1	767,4	714,1	608	515,6	434,9	363,6	280	207,1	143,9	88,2
17	0	1277	1269	1287	30	30	30	30	30	1297	1034	858,8	741	663	603,1	556,4	520,3	492,9	371,4	267,4	177	95,52
16	0	2513	1850	1384	30	30	30	30	30	1319	1041	854	724	632,7	589,4	555,5	530,3	513	392,2	284,9	188,7	100
15	0	30	30	30	30	30	30	30	30	1336	1049	854,9	720,1	626,6	583,7	550,8	526,5	510	391,5	285,4	189,8	101,2
14	0	30	30	30	30	30	30	30	30	1343	1046	845,4	706,8	611,3	567,9	534,9	510,8	494,7	379	276,3	184,1	99,22
13	0	30	30	30	30	30	30	30	30	1334	1018	809	667,7	572,3	529,5	497,4	474,4	459,4	350,4	255,1	170,9	94,36
12	0	1916	1669	1530	1415	1340	1286	1266	1243	1273	915,2	706,9	576,6	492,5	455,5	428,2	408,8	396,4	301,3	220	149,7	87,17
11	0	1668	1591	1489	1394	1325	1281	1250	1223	1158	796,4	628,5	522,6	451,8	420,1	396,4	379,4	368,4	280,2	205,3	141	84,3
10	0	1657	1582	1481	1387	1318	1274	1243	1217	816,4	703,5	583,8	430,5	401,6	379,8	364	353,8	269,3	197,7	136,6	82,82	30
9	0	939,5	930,5	904,6	875,9	838,3	801,4	759,8	694,7	545,9	484,1	427,6	380,4	343,5	325,5	311,3	300,6	293,3	224,4	166,8	118,4	76,75
8	0	629,3	627,3	620,2	611,1	587	557,5	520,4	468,3	391,4	356,2	324,2	286,5	273,9	262,5	253,2	245,8	240,5	185,1	139,6	102,2	70,91
7	0	471,8	472,3	474,4	476,8	461,2	437,3	405,5	363,9	312	287,8	265,7	246,4	230,2	221,8	214,8	209,1	204,9	158,1	120,6	90,63	66,29
6	0	360,8	363,6	375,9	400,3	391,9	372,2	344,5	309,2	267,5	248,1	230,7	215,2	201,9	194,8	188,6	183,3	179,1	137	105,1	80,98	62,27
5	0	309,3	312,4	326,2	366,5	361,6	343,7	317,9	285,3	247,5	230,9	215,3	201,2	188,8	181,9	175,6	169,8	164,7	125,7	96,99	76,12	60,52
4	0	258,5	261,2	273	345	342,3	325,6	301,1	270,4	235,1	219,7	205,2	192	180,2	173,3	166,8	160	151,9	112,8	87,9	70,97	58,97
3	0	196,3	197,5	201,9	239,3	237,8	225,9	208,6	187,4	163,7	153,7	144,1	135,2	126,9	121,8	116,4	110,2	102,2	87	73,86	64,07	57,37
2	0	137,3	137,7	139,2	154	152,4	145,2	134,9	122,6	109,2	103,6	98,24	93,2	88,4	85,37	82,18	78,64	74,55	68,38	62,78	58,6	56,2
1	0	82,06	82,12	82,12	81,8	80,02	77,36	73,98	70,16	66,2	64,54	62,95	61,44	60,03	59,22	58,45	57,75	57,12	56,42	55,9	55,6	55,55
0	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

Tabela A.4: Distribuição de temperatura no refratário após 8h do início do ensaio.

J.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22			
33	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30		
32	0	138	141,3	161	175,5	178,7	175,9	168,3	156,6	142,1	135,5	128,9	122,3	116	112,2	108,6	105,2	102	98,12	94,79	92,08	90,07	30		
31	0	248,8	252,4	266	345,4	359,6	355,5	338,9	309	266,1	245,7	225,4	205,9	187,9	177,1	166,5	155,6	143,9	127,3	111,7	98,79	89,36	30		
30	0	363,5	367,9	383,7	510,4	532,2	527,1	503,7	459,5	392,6	360,1	327,4	286,1	267,4	250,5	233,8	216,2	196,1	164,2	133,9	108,8	89,33	30		
29	0	482,1	488,7	513,9	674	699,7	693,7	665,5	610,5	523,8	480,5	436,6	394,7	356,6	334,9	314	292,3	265,8	210,1	160,5	121	89,85	30		
28	0	601,8	612	659,6	835,3	860,8	853,9	822,9	760,4	658,1	605,3	551,5	500,4	454,7	429,8	407,7	388	369,5	262	188,1	133,6	90,78	30		
27	0	774	784	827,2	905,2	924,3	916,3	884,1	818,2	707	647,7	587,4	530,7	480,7	454,3	431,8	413,9	400,9	298,6	215,2	148,2	92,69	30		
26	0	924,9	930,9	955,2	990,8	1002	994,3	965,2	902,9	786,2	715,4	643,4	576,4	517,6	486,8	461,3	441,6	428,1	322,4	232,9	158,4	94,87	30		
25	0	1052	1052	1055	1067	1072	1066	1046	1001	896	804,3	716,1	635,6	562,7	523,3	491,3	467,6	452	340,4	245,4	165,7	97,12	30		
24	0	1144	1136	1104	1098	1098	1096	1093	1084	1084	1043	998,3	979,3	921,8	874,2	841,9	822,6	818,7	650	525,3	350	252,3	170,2	99,36	
23	0	1210	1188	1108	30	30	30	30	30	1084	1042	981,6	921,8	874,2	841,9	822,6	818,7	818,7	650	525,3	350	252,3	170,2	99,36	
22	0	1224	1199	1108	30	30	30	30	30	1096	1086	1047	997,5	951,2	841,9	822,6	818,7	818,7	650	525,3	350	252,3	170,2	99,36	
21	0	1228	1202	1109	30	30	30	30	30	1100	1103	1074	1030	983,9	875,6	841,9	822,6	818,7	650	525,3	350	252,3	170,2	99,36	
20	0	1230	1204	1110	30	30	30	30	30	1102	1111	1086	1045	999,8	893,2	841,9	822,6	818,7	650	525,3	350	252,3	170,2	99,36	
19	0	1231	1205	1110	30	30	30	30	30	1103	1114	1091	1050	1006	999,8	893,2	841,9	822,6	818,7	650	525,3	350	252,3	170,2	99,36
18	0	1232	1206	1110	30	30	30	30	30	1102	1109	1083	1040	1006	999,8	893,2	841,9	822,6	818,7	650	525,3	350	252,3	170,2	99,36
17	0	1219	1195	1109	30	30	30	30	30	1098	1091	1048	987,7	923,1	862,3	808,3	761,5	721,7	568,2	421,4	281,2	144,2	30		
16	0	1120	1116	1098	30	30	30	30	30	1095	1076	1022	951,4	878,7	836,6	798,9	767,2	741,9	589,3	439,7	293,6	148,4	30		
15	0	30	30	30	30	30	30	30	30	1093	1067	1008	934,4	861,4	820,8	785,4	755,7	732	583,1	436,3	292,2	148,5	30		
14	0	30	30	30	30	30	30	30	30	1090	1055	989,8	912,1	837,4	820,8	785,4	755,7	732	583,1	436,3	292,2	148,5	30		
13	0	30	30	30	30	30	30	30	30	1084	1030	950,9	866,5	789,6	748,9	714,6	686,9	665,8	527	392,8	263,6	137	30		
12	0	1111	1111	1110	1109	1106	1100	1092	1080	1070	965,2	863,4	773,1	698,7	661,1	630,3	606,1	588,3	462,9	344,5	233	126,2	30		
11	0	1113	1113	1112	1111	1107	1101	1092	1078	1053	902,9	803,5	720,6	652,8	618,7	590,7	568,8	552,7	434,4	323,5	220,1	121,8	30		
10	0	1113	1112	1112	1111	1107	1100	1091	1076	1053	902,9	803,5	720,6	652,8	618,7	590,7	568,8	552,7	434,4	323,5	220,1	121,8	30		
9	0	1007	1006	1004	1001	986,7	963,3	925	858,7	736,7	678,5	620,8	568	523,2	500,1	480,9	465,5	453,9	356,3	267	185,6	110,3	30		
8	0	814,4	814,7	815,5	815,3	800,1	773,4	731,2	667,6	580	498	461,8	430,8	414,5	400,8	389,5	380,8	298,8	225,6	160,4	101,3	30			
7	0	658,1	660,1	668	677,5	666,7	642,3	603,9	549,7	482,2	450,1	420	392,7	369,1	356,5	345,6	336,6	329,5	258	195,8	141,9	94,08	30		
6	0	519,4	524,2	544,8	582,4	578,8	558,1	524,2	477,6	420,9	394,3	369,6	347	327,1	316,1	306,3	297,8	290,7	225	170,8	126	87,73	30		
5	0	448,5	453,7	476,7	539,1	539,7	520,8	488,9	445,4	393,2	369,8	347,3	326,5	307,6	296,9	286,7	277,3	268,7	206,6	157,1	117,6	84,94	30		
4	0	375,5	379,9	399,7	508,9	512,3	494,8	464,6	423,6	374,6	352,8	331,7	312,1	294	283,2	272,7	261,5	247,9	184,9	141,3	108,6	82,45	30		
3	0	283,3	285,6	293,8	364,3	368,2	355,2	332,6	302,7	267,7	252,5	237,7	223,7	210,1	201,5	192,2	181,4	167,4	140,7	116,2	95,99	79,86	30		
2	0	194,6	195,7	199,7	235,7	237,7	229,5	215,4	197,3	176,6	167,6	158,9	150,6	142,3	137	131,3	124,8	117,2	105,6	94,44	85,07	78	30		
1	0	110,5	111,2	114,8	117	115,9	112,9	108,3	102,6	96,39	93,69	91,04	88,46	85,99	84,53	83,13	81,81	80,59	79,19	78,08	77,34	77,03	30		
0	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30		

Tabela A.5: Distribuição de temperatura no refratário após 10h do início do ensaio.

J:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
33	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
32	0	143	147,5	174,6	194,6	200,9	200,5	195,2	186	174,1	168,4	162,4	156,3	150,1	146,3	142,5	138,7	135,1	130,7	126,8	123,5	121,2	30
31	0	255,8	260,2	277,4	368,8	385,7	383,9	371	348,6	317,8	302,9	287,4	271,6	255,3	244,6	233,2	220,4	205,9	184	161,5	140,2	120,7	30
30	0	367,8	372,5	389,5	522,1	545,3	542,4	524,4	492,7	448,2	426,4	403,6	380,3	356,5	340,9	323,8	304,1	280,1	239,9	198	158,3	121,2	30
29	0	477,4	483,8	507,7	659,2	684,4	680,5	659,3	621,6	567,7	540,8	512,7	484,1	455,4	436,9	417,3	394,5	364,6	299,9	235,9	177,1	122,4	30
28	0	580,4	589,5	631,7	783,1	806,5	801,5	778,6	737,6	677,7	647,2	615,3	583,1	551,6	532,6	514	495,2	475,1	360,8	271,5	194,8	124	30
27	0	709,9	718,5	755,7	822,3	839,2	833,6	810,6	769,4	707,7	675,5	641,6	607,6	574,9	555,8	538,1	522,4	509,2	403,6	305,6	214,5	127	30
26	0	797,8	803,1	824,1	853,9	863,6	858	838,3	801,9	742,9	709	673	636,5	601,2	580,8	562,4	546,6	533,7	428,2	326	227,3	130,1	30
25	0	851,2	853,1	860,8	871,7	876	871,8	858,8	833,3	784,1	747	708,6	669,3	629	605	583,7	566	552	444	338,7	235,7	133	30
24	0	879,8	878,8	874	872,6	873,2	871,9	868,1	860,2	835,2	786,1	747,5	708,3	659,6	624,8	597,6	576,3	560,4	450,6	344,7	240,5	135,8	30
23	0	894,3	890,6	875,7	870	870	870	870	870	862,5	852,4	836,8	817,8	797,9	737,9	675,7	611	543,3	449,1	350,1	247,5	141,8	30
22	0	896,8	892,5	875,9	870	870	870	870	870	873,1	879,4	876,1	865	847,5	786,3	720,8	651,3	578	477,5	372,1	262,3	147,8	30
21	0	897,4	893,1	876,2	870	870	870	870	870	877,1	891,8	895,1	888	871,7	811,6	746,4	676,4	601,9	498,8	389,5	274,5	153,5	30
20	0	897,5	893,2	876,4	870	870	870	870	870	878,6	896,9	903,2	898	882,6	823,9	759,7	690,2	615,9	512,1	401,2	283,5	158,7	30
19	0	897,2	892,9	876,2	870	870	870	870	870	878,6	897,5	904,4	899,8	885,1	828,4	766,2	698,6	625,5	522,5	411,1	291,5	163,8	30
18	0	895,9	891,7	875,4	870	870	870	870	870	876,9	893,4	898,4	893,1	879,1	828,3	772,8	711,6	643,6	542,2	428,6	304,1	169,2	30
17	0	891,2	887,7	873,7	870	870	870	870	870	873,4	883,4	882,1	870,5	849,9	823,7	796,5	768,2	739,1	611,8	476,6	331,7	174,7	30
16	0	871,2	870,5	867,4	870	870	870	870	870	870	874,5	868,6	853,8	831,8	815,3	797,4	778,9	760,5	631,6	492,5	341,9	177,3	30
15	0	30	30	30	30	30	30	30	30	866,7	866,3	856,6	839,6	817,2	801,8	785	768	750,7	624,4	487,5	338,8	176,2	30
14	0	30	30	30	30	30	30	30	30	862,2	854,7	839,2	818,1	793,5	777,2	760,6	744	727,4	604,1	471,2	327,6	171,5	30
13	0	30	30	30	30	30	30	30	30	854,6	834,6	809,6	782	753,7	736,4	719,5	703,3	687,8	569,3	443	308,2	163,5	30
12	0	866	865,9	865,4	864,6	861,5	856,9	850,8	843,3	839,4	795,7	756,6	721,6	690,3	672,5	656,1	641	627,2	516,6	401	280	152,5	30
11	0	865,7	865,6	865	864,2	860,9	856	849,5	841,4	829	765,4	725,3	691,2	660,9	643,8	628,1	613,8	600,9	494,1	383,3	268,3	148,2	30
10	0	865,5	865,4	864,8	864	860,6	855,6	848,8	840,5	767,3	741,1	707,2	674,7	645,3	628,6	613,4	599,5	587	482,3	374,1	262,2	145,9	30
9	0	827,3	827,3	827,2	826,4	818,1	803,6	780,9	746,3	687,3	659,1	630,7	603,3	578,2	563,9	550,8	538,8	528,2	432,3	335,1	236,7	136,5	30
8	0	757	757,7	760,4	762,5	753,2	734,1	704,3	663	610	584,3	559,3	535,6	513,9	501,5	490,2	479,9	470,8	383,5	297,2	212	127	30
7	0	676,7	679,2	688,9	700,3	694,2	675,1	644,1	602,6	553,8	529,8	507	485,4	466,6	454,3	443,9	434,6	426,3	345,1	267,1	192,1	119,1	30
6	0	575	580,4	603,3	642,8	643,5	626,4	596,8	557,2	510,5	488,3	467,1	446,8	427,8	416,6	406,1	396,4	387,8	309,4	238,2	173	111,8	30
5	0	509,9	515,8	542,2	610,6	615,8	600,1	571,5	533,2	488,1	467,5	447,1	427,4	408,5	397	385,6	374,3	363,6	287,2	220,7	162,1	108,5	30
4	0	435,5	440,8	464,1	584,2	592,4	577,8	550,3	513,5	470,1	450,5	430,9	411,9	393,2	381,4	369,1	355,3	338	259,1	199,3	149,7	105,5	30
3	0	334,3	337,3	348,1	441,8	451,2	440,2	418,3	389	354,7	339,4	324	308,6	292,9	282,2	270,2	255,7	236,6	199,9	163,9	131,5	102,3	30
2	0	231,4	233,3	240	297,2	303,7	296,6	282,1	262,9	240,6	230,7	220,7	210,7	200,2	193,1	185,2	175,9	165	147,8	130,3	114,3	100,1	30
1	0	129,9	131,6	140,3	146,5	147	144,5	139,8	133,5	126,2	122,8	119,5	116,1	112,8	110,8	108,8	106,9	105	102,9	101,1	99,73	99	30
0	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

Tabela A.6: Distribuição de temperatura no refratário após 12h do início do ensaio.

J.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
33	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
32	0	131,6	135,7	161,3	180,3	187,4	188,7	186,1	180,4	172,2	168	163,4	158,6	153,6	150,3	147	143,7	140,4	136,3	132,6	129,5	127,2
31	0	231,7	235,7	251,2	329,5	345,9	347,3	340,6	327,6	308,9	299,2	288,8	277,4	264,8	256	245,9	234,1	220	198,1	174,3	150,5	126,9
30	0	329,9	334	348,8	462,2	484,3	485,4	476	457,8	431,3	417,5	402,5	386,2	368,2	355,3	340,4	322,3	299,1	259,1	215,3	171,3	127,5
29	0	425,1	430,6	451	581,7	605,8	606,6	595,3	573,7	541,7	524,8	506,4	486,7	465,3	450,4	433,6	412,9	384,3	321	255,5	191,7	128,7
28	0	513,6	521,5	557,9	690,5	713,2	713,3	701	677,5	641,8	622,7	601,8	579,7	556,7	541,8	526,3	509,6	490,7	381,2	291,7	210,1	130,3
27	0	623,5	631	663,3	721,6	738,6	738	725,8	702,2	665,7	645,7	623,9	600,8	577,2	562,6	548,3	534,8	522,8	422,4	325	229,6	133,1
26	0	697,4	702,2	720,9	747,6	758	756,8	746,1	725,2	690,3	669,6	646,8	622,7	597,8	582,6	568,2	555,1	543,5	443,9	343,3	241,1	135,8
25	0	743	745,2	753,6	764,4	769,6	768,3	760,8	745,7	716,1	694,1	670,5	644,9	617,2	599,9	583,7	569,3	557,1	455,4	352,6	247,4	138
24	0	769	769,4	770,3	770,4	771,8	771,2	768,5	762,5	745,2	717,8	694,6	669,4	636,7	612,4	592,2	575,1	561,1	456,1	353,5	248,9	139,9
23	0	783,8	782	774,5	30	30	30	30	30	764,7	758,6	748,8	736,5	722,8	675,2	625,4	572,6	515,9	434	344,2	247,3	143,7
22	0	786,5	784,3	775,2	30	30	30	30	30	772,7	775,3	772,3	764,3	751,9	702,5	649,5	592,7	532,1	446,9	354,5	254,6	147,4
21	0	787,2	784,9	775,7	30	30	30	30	30	775,9	783,4	784	778,3	766,7	717,8	664,8	607,7	546,2	459,4	364,8	262	151,1
20	0	787,5	785,2	776	30	30	30	30	30	777,3	787	789,5	784,9	773,9	725,9	673,7	617	555,6	468,4	372,7	268,2	154,8
19	0	787,4	785,1	776	30	30	30	30	30	777,6	788	791,1	787,1	776,6	730,4	679,8	624,5	564	477,2	380,8	274,6	158,8
18	0	786,6	784,4	775,5	30	30	30	30	30	776,7	786,4	789,1	785,2	775,6	734,9	690,1	640,1	583,4	496,9	397,6	286,2	163,5
17	0	783,7	781,9	774,2	30	30	30	30	30	774,6	781,5	781,3	774,2	760,5	742	721,9	700,1	676,6	583,7	442,9	312	168,6
16	0	772,1	771,6	769,5	30	30	30	30	30	772,4	776,7	774,4	766	751,8	740,3	727,3	713,2	698,6	583,8	458,9	322,1	171,4
15	0	30	30	30	30	30	30	30	30	769,8	771,3	766,9	757,2	743,1	732,3	720,3	707,3	693,3	580,3	456,6	320,8	171,1
14	0	30	30	30	30	30	30	30	30	765,9	762,7	754,4	742	726,2	715	702,9	690	676,5	565,6	444,8	312,7	167,9
13	0	30	30	30	30	30	30	30	30	759,5	748,3	733,7	716,9	698,4	686,3	673,8	661,2	648,3	540,4	424,5	279	154,2
12	0	766,9	766,9	766,5	765,9	763,6	760,3	755,9	750,8	748,1	722,6	699,1	677,1	656	643,3	630,9	618,8	606,9	504,4	395,4	270,8	150,9
11	0	766,7	766,6	766,2	765,6	763,2	759,7	755,1	749,7	742	704,1	679,5	657,5	636,8	624,3	612,2	600,5	589,1	489,1	383,2	270,8	150,9
10	0	766,6	766,5	766,1	765,5	763	759,5	754,8	749,2	705,5	689,4	668,1	646,9	626,5	614,2	602,3	590,8	579,7	481	376,8	266,5	149,2
9	0	744,6	744,7	745	744,9	740	730,8	716,3	694,5	667,3	638,9	619,8	600,7	582,1	570,9	560	549,6	539,6	446,6	349,7	248,4	142,1
8	0	701,5	702,4	705,4	708,3	703,4	691,3	671,7	644,3	608,6	590,6	572,6	554,8	537,6	527,3	517,3	507,9	498,9	411,6	322,1	229,9	134,6
7	0	645,1	647,6	657,2	668,9	667,1	655	633,9	605,2	570,2	552,8	535,4	518,2	501,6	491,7	482,1	473,1	464,7	381,7	298,1	213,8	128,1
6	0	561,9	567,2	589,3	627,3	631,8	621,3	600,6	572,3	537,8	520,7	503,8	487	470,3	460,1	450	440,3	431,3	349,9	272	196,5	121,7
5	0	503,5	509,3	534,9	601,2	610	600,5	580,4	552,7	519	502,9	486,4	469,8	452,9	442	430,9	419,4	408,1	327,9	254,3	185,5	118,7
4	0	434	439,2	462	578,2	589,8	581,1	561,8	534,9	502,3	486,9	471	454,7	437,8	426,6	414,4	400,2	381,7	298,3	231,5	172,1	115,9
3	0	336,6	339,6	350,7	446,2	458,9	452,6	436,9	415	388,6	376,1	363,2	349,6	334,7	324	311,5	295,8	274,8	234	191,9	151,7	112,9
2	0	234,9	237,1	244,8	306,3	315,5	311,5	301	286,2	268,3	259,9	251,1	241,8	231,5	224,1	215,5	205,3	192,8	172,8	151,6	130,8	110,8
1	0	132,7	134,8	146	154,1	156,1	154,9	151,3	146,1	139,5	136,4	133,1	129,7	126,2	124	121,9	119,7	117,6	115	112,8	111	109,9
0	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

Tabela A.7: Distribuição de temperatura no refratário após 14h do início do ensaio.

J:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
33	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
32	0	121,8	125,5	148,9	166,6	173,7	175,7	174,3	170,2	163,8	160,4	156,6	152,6	148,2	145,3	142,4	139,4	136,4	132,6	129,1	126,2	124	30
31	0	211,5	215,1	229	296,7	312,3	315,1	311,6	303,1	289,9	282,7	274,6	265,5	255	247,3	238,3	227,5	214,3	193,5	170,6	147,3	123,7	30
30	0	299,1	302,7	315,6	414,2	435,1	438,4	433,3	421,6	403,1	393	381,5	368,6	353,7	342,5	329,3	312,6	291	253	210,8	167,8	124,2	30
29	0	383,6	388,4	406,3	521,5	544,5	547,9	541,7	527,6	505,2	492,9	478,9	463,3	445,7	433	418,1	399,1	372,4	312,5	249,6	187,5	125,4	30
28	0	461,9	469	501,3	620,4	642,4	645,3	638,3	622,8	597,7	583,7	567,8	550,5	531,7	519	505,6	490,7	473,4	369,6	284,1	205	126,8	30
27	0	559,1	565,8	594,7	647,1	664	666,2	659,2	643,7	618	603,3	586,9	568,9	549,8	537,6	525,4	513,5	502,7	408	315,2	223,2	129,2	30
26	0	625	629,3	646,3	670,7	681,5	682,7	676,4	662,4	637,7	622,6	605,6	586,9	567	554,5	542,4	531	520,7	427,1	331,4	233,3	131,3	30
25	0	666,7	668,9	677,2	687,6	693,5	693,8	689,2	678,6	657,1	641,3	623,8	604,2	582,4	568,3	554,8	542,5	531,6	436	338,5	238	133	30
24	0	691,9	692,7	695,7	696,6	698,7	698,6	696,5	691,6	677,7	658,7	641,7	622,5	596,9	577,4	560,7	546,2	533,6	433,7	336,7	237,7	134,3	30
23	0	708	706,8	702	30	30	30	30	30	693,8	689,1	681,5	671,8	660,8	618,7	574,5	527,4	476,4	402,1	320,3	231,6	136,6	30
22	0	711,3	709,7	703,3	30	30	30	30	30	700,4	701,3	697,9	690,9	680,6	635,9	588,1	537,2	482,7	406,4	323,7	234,4	138,8	30
21	0	712,3	710,6	703,9	30	30	30	30	30	703,2	707	706	700,3	690,4	645,6	597,6	546	490,9	413,5	329,5	238,7	141,3	30
20	0	712,7	711	704,3	30	30	30	30	30	704,5	709,8	709,9	705	695,4	651,3	603,8	552,5	497,5	419,8	335	243,1	144,1	30
19	0	712,8	711,1	704,5	30	30	30	30	30	705	710,8	711,5	707,1	698	655,5	609,4	559,4	505,1	427,7	342,2	248,8	147,6	30
18	0	712,3	710,7	704,2	30	30	30	30	30	704,6	710,2	710,7	706,5	698,3	661,2	620,7	575,7	524,8	447,3	358,7	259,9	152	30
17	0	710,4	709	703,3	30	30	30	30	30	703	706,8	705,3	698,7	687,1	671,4	654,3	635,8	615,7	512,2	402,5	284,6	157	30
16	0	702,4	701,8	699,5	30	30	30	30	30	701,4	703,7	701	693,5	681,5	671,8	660,9	649,1	636,8	531,8	418,2	294,8	160,1	30
15	0	30	30	30	30	30	30	30	30	699,5	700,2	696,3	688,2	676,6	667,7	657,7	646,7	634,9	531,2	418,4	295,2	160,7	30
14	0	30	30	30	30	30	30	30	30	696,5	694,2	688	678,3	666,6	656,5	646,4	635,6	624,1	521,8	410,9	290,3	159	30
13	0	30	30	30	30	30	30	30	30	691,6	684,3	674	661,4	647	637,2	626,9	616,2	605,1	505	397,3	281	155,1	30
12	0	698,2	698,2	697,9	697,5	695,8	693,3	690,1	686,4	683,9	667,4	651,1	634,9	618,6	608,3	597,9	587,5	576,9	480,4	377,5	267,5	149,5	30
11	0	698,2	698,1	697,8	697,4	695,6	693,1	689,7	685,8	680,6	655,5	638,2	621,8	605,5	595,3	585,1	574,9	564,6	469,8	369,1	261,7	147,1	30
10	0	698,1	698	697,7	697,3	695,6	693	689,5	685,4	657,4	646	630,6	614,6	598,5	588,4	578,3	568,2	558,1	464,2	364,6	258,7	145,8	30
9	0	684,4	684,6	685,2	685,7	682,9	677	667,2	652,1	626,2	612,5	598	582,9	567,6	558	548,5	539	529,7	439,8	345,3	245,7	140,4	30
8	0	653,1	654	657,3	660,8	658,9	651,4	638,1	618,7	592,5	578,7	564,3	549,7	535	525,8	516,8	508	499,3	413,7	324,6	231,7	134,4	30
7	0	607,4	609,9	619,4	631,2	632,6	625,5	611,1	590,4	563,9	550,1	535,8	521,3	506,7	497,7	488,8	480,2	471,9	389,5	305,1	218,5	129	30
6	0	534,4	539,4	560,5	597,2	604,6	599	584,9	564,1	537,5	523,6	509,4	494,9	479,9	470,3	460,8	451,4	442,4	361,2	281,7	203	123,5	30
5	0	480,8	486,4	510,8	574,4	585,8	581,1	567,4	547	520,8	507,6	493,8	479,2	463,9	453,7	443	431,7	420,5	340,1	264,7	192,4	120,8	30
4	0	416,3	421,2	442,8	553,7	567,7	563,7	550,5	530,3	492,6	479,1	464,8	449,4	438,8	427	413	394,5	310,7	241,8	179,1	118,3	30	
3	0	324,6	327,5	338,1	430	444,7	442,1	431,5	415,3	394,6	384,3	373,1	361	347,1	336,8	324,5	308,7	287,3	245,4	201,4	158,1	115,5	30
2	0	227,9	230,1	237,6	297,6	308,3	306,9	299,7	288,6	274,3	267,3	259,6	251,1	241,3	234,1	225,5	215,1	202,2	181,3	158,7	136	113,5	30
1	0	129,7	132	143,9	152,6	155,4	155,1	152,5	148,2	142,5	139,6	136,6	133,3	129,9	127,8	125,6	123,3	121,2	118,5	116,1	114,1	112,8	30
0	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

Tabela A.8: Distribuição de temperatura no refratário após 16h do início do ensaio.

J:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22		
33	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
32	0	114	117,4	138,9	155,3	163,3	163,3	160	154,6	151,6	148,3	144,7	140,8	138,2	135,5	132,8	130,1	126,6	123,4	120,6	118,5	30	30	
31	0	195,7	198,9	211,4	271,3	286,9	280,4	269,9	263,9	257,2	249,4	240,2	233,3	225,2	215,3	203,2	193,8	182,4	162,4	140,5	118,3	30	30	
30	0	275,1	278,4	289,8	377,2	396,7	397,5	388,7	374	365,9	356,2	345,3	332,2	322,3	310,3	295,1	275	239,6	200,2	159,7	118,7	30	30	
29	0	351,5	355,8	371,8	475,1	496,7	496,9	486,2	468,4	458,3	446,7	433,5	418,2	406,9	393,5	376,2	351,5	295,4	236,4	178,1	119,7	30	30	
28	0	422,1	428,5	457,6	566,1	586,8	580,8	586,1	574,3	554,2	529,4	514,7	498,5	487,4	475,5	462,1	446,4	348,9	268,6	194,4	121	30	30	
27	0	509,6	515,7	541,8	589,5	605,7	604,2	592,3	571,7	559,7	546	530,8	514,5	503,9	493,2	482,6	472,9	384,3	297,3	211	123	30	30	
26	0	569	573	598,5	610,8	621,5	619,2	608,3	588,4	576,1	562	546,3	529,4	518,6	508,1	498,1	488,9	401,3	311,7	220	124,8	30	30	
25	0	607,2	609,3	617,1	626,9	633	634	630,6	622	604,4	591,6	577,2	560,9	542,3	530,2	518,6	507,8	498,1	408,7	314,6	222,7	126,2	30	30
24	0	630,9	631,8	635,4	636,7	639,2	639,5	637,7	633,1	620,8	605,8	592	576	554,3	537,7	523,2	510,4	499,2	405,2	314,6	222,7	127,1	30	30
23	0	647,2	646,4	643	643	639,2	637,7	633,1	620,8	605,8	592	576	554,3	537,7	523,2	510,4	499,2	405,2	314,6	222,7	128,6	30	30	
22	0	651	649,7	644,6	643	639,2	637,7	633,1	620,8	605,8	592	576	554,3	537,7	523,2	510,4	499,2	405,2	314,6	222,7	128,6	30	30	
21	0	652,1	650,8	645,4	643	639,2	637,7	633,1	620,8	605,8	592	576	554,3	537,7	523,2	510,4	499,2	405,2	314,6	222,7	128,6	30	30	
20	0	652,7	651,3	645,9	643	639,2	637,7	633,1	620,8	605,8	592	576	554,3	537,7	523,2	510,4	499,2	405,2	314,6	222,7	128,6	30	30	
19	0	652,9	651,6	646,2	643	639,2	637,7	633,1	620,8	605,8	592	576	554,3	537,7	523,2	510,4	499,2	405,2	314,6	222,7	128,6	30	30	
18	0	652,7	651,4	646,2	643	639,2	637,7	633,1	620,8	605,8	592	576	554,3	537,7	523,2	510,4	499,2	405,2	314,6	222,7	128,6	30	30	
17	0	651,3	650,2	645,5	643	639,2	637,7	633,1	620,8	605,8	592	576	554,3	537,7	523,2	510,4	499,2	405,2	314,6	222,7	128,6	30	30	
16	0	645,5	644,9	642,4	643	639,2	637,7	633,1	620,8	605,8	592	576	554,3	537,7	523,2	510,4	499,2	405,2	314,6	222,7	128,6	30	30	
15	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
14	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
13	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
12	0	642,7	642,6	642,4	642,1	640,8	639	636,5	633,6	631,2	619,5	607,3	594,6	581,2	572,5	563,5	554,3	544,8	453,9	357,1	253,7	143,3	30	30
11	0	642,7	642,6	642,5	642,1	640,8	638,9	636,3	633,2	629,6	611,6	598,5	585,4	571,9	563,2	554,3	545,2	536	446,3	351	249,6	141,5	30	30
10	0	642,7	642,6	642,4	642,1	640,8	638,9	636,2	633	613,9	605,2	593,2	580,4	566,9	558,2	549,4	540,4	531,3	442,2	347,7	247,3	140,5	30	30
9	0	633,9	634,1	634,9	635,6	634,2	630,2	623,2	611,9	592,6	581,8	570	557,4	544,3	535,9	527,4	518,8	510,2	424,1	333,4	237,6	136,2	30	30
8	0	609,4	610,3	613,7	617,4	617,3	612,6	603,1	588,5	568	556,7	544,7	532,1	519,1	511	502,7	494,5	486,4	403,7	317,1	226,5	131,4	30	30
7	0	570,3	572,7	582	593,6	596,8	592,8	582,6	566,7	545,5	533,9	521,7	509	495,9	487,7	479,5	471,4	463,5	383,4	300,8	215,4	126,7	30	30
6	0	504,6	509,4	529,5	564,5	573,5	570,9	560,9	544,8	523,1	511,4	499,1	486,1	472,4	463,6	454,6	445,7	437,1	357,8	279,5	201,3	121,8	30	30
5	0	455,3	460,6	483,5	544,1	556,9	555,1	545,4	529,6	508,2	496,9	484,8	471,8	457,7	448,2	438,1	427,3	416,4	337,8	263,3	191,3	119,4	30	30
4	0	395,3	400	420,3	525,3	540,5	539,3	530	514,6	493,7	482,9	471,1	458,3	444,1	434,1	422,8	409,3	391,4	309,2	241,1	178,5	117,1	30	30
3	0	309,4	312,2	322,3	409,2	424,6	424,4	416,9	404,4	387,3	378,4	368,6	357,6	344,7	334,9	322,9	307,6	286,6	245,2	201,3	157,8	114,6	30	30
2	0	218,4	220,5	228	284,7	295,9	296,1	291	282,2	270,3	264,2	257,3	249,5	240,3	233,4	225,1	214,8	202,1	181,4	158,8	135,8	112,8	30	30
1	0	125,2	127,5	139,5	148,3	151,5	151,7	149,7	146,1	141	138,3	135,5	132,4	129,2	127,1	124,9	122,8	120,6	117,9	115,5	113,5	112,2	30	30
0	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	

Tabela A.9: Distribuição de temperatura no refratário após 18h do início do ensaio.

J:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
33	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
32	0	107,5	110,6	130,4	145,5	151,9	154	153,4	150,5	145,7	143,1	140,1	136,8	133,2	130,9	128,4	125,9	123,4	120,2	117,3	114,7	112,8
31	0	182,5	185,5	196,8	250,4	263,6	267	265,4	260	251	245,8	239,9	233	224,8	218,6	211,2	202,2	191	173,2	153,4	133,1	112,5
30	0	255,2	258,2	268,5	347	364,9	369	366,6	359,3	346,8	339,6	331,3	321,6	310	301,1	290,2	276,2	257,7	224,9	188,3	150,9	112,9
29	0	325	328,9	343,3	436,9	456,9	461,2	458,1	449,2	434	425,2	415,1	403,5	389,9	379,8	367,6	351,8	329	276,7	221,9	167,9	113,8
28	0	389,3	395,1	421,6	521,1	540,5	544,5	540,9	530,8	513,5	503,5	492	479	464,7	454,8	444,1	432,1	417,9	326,6	251,8	182,8	114,9
27	0	468,8	474,3	498,1	541,9	557	560,4	556,7	546,6	528,9	518,5	506,6	493,3	478,9	469,5	460	450,6	441,9	359,1	278,1	198	116,7
26	0	522,8	526,4	540,6	561,1	571,2	573,5	570	560,6	543,4	532,8	520,6	506,9	492,1	482,6	473,2	464,3	456,1	374,4	291,1	206	118,2
25	0	557,6	559,6	566,9	576	581,9	583,2	580,3	572,7	557,2	546,3	533,9	519,6	503,4	492,7	482,4	472,8	464,2	380,7	295,9	209,2	119,4
24	0	579,5	580,4	584	585,5	588,3	588,8	587,1	582,6	571,1	558,6	546,7	532,8	513,8	499,1	486,3	474,9	464,8	376,8	292,6	207,8	120
23	0	595,6	595	592,4	30	30	30	30	30	584,8	581,1	575,4	568,2	560	524,5	487,2	447,4	404,4	341,7	273,1	199,3	121,1
22	0	599,6	598,6	594,4	30	30	30	30	30	590,8	590,3	587	581,3	573,4	534,6	493,7	450,3	404,3	340,5	272	199,2	122,2
21	0	600,9	599,8	595,3	30	30	30	30	30	593,5	594,6	592,5	587,5	579,8	540,5	498,9	454,8	408,2	343,6	274,5	201,2	123,7
20	0	601,6	600,5	596	30	30	30	30	30	594,9	596,8	595,4	590,8	583,2	544,3	502,9	458,9	412,3	347,5	278,1	204,1	125,8
19	0	602	600,9	596,4	30	30	30	30	30	595,5	597,8	596,7	592,4	585,2	547,7	507,6	464,7	418,7	354,2	284,1	208,7	128,7
18	0	602	600,9	596,5	30	30	30	30	30	595,4	597,5	596,3	592,3	585,7	553,4	518,4	480	437,1	372,2	299	218,8	132,7
17	0	601	600	596,1	30	30	30	30	30	594,2	595,1	592,4	586,4	577	564,4	551	536,4	520,8	431,4	338,6	241	137,4
16	0	596,6	596	593,4	30	30	30	30	30	593,2	593,2	589,8	583,2	573,5	565,9	557,5	548,4	539	448,9	352,9	250,3	140,7
15	0	30	30	30	30	30	30	30	30	592,3	591,6	587,9	581,3	572,1	565,3	557,6	549,2	540,3	451	355,2	252,4	142,1
14	0	30	30	30	30	30	30	30	30	590,7	588,9	584,2	577,1	567,6	560,7	553,1	544,8	536	447,5	352,6	250,9	141,8
13	0	30	30	30	30	30	30	30	30	587,9	584,1	577,7	569,2	559	551,8	544	535,8	527,1	439,7	346,4	246,6	140,1
12	0	595	595	594,8	594,6	593,6	592,1	590,1	587,7	585,4	576,6	567	556,4	545	537,5	529,6	521,4	512,9	427,4	336,4	239,7	136,9
11	0	595,1	595,1	594,9	594,7	593,7	592,1	590	587,5	584,7	571,2	560,6	549,8	538,2	530,6	522,8	514,6	506,3	421,7	331,9	236,6	135,5
10	0	595,1	595,1	595	594,7	593,7	592,2	590	587,4	573,6	566,5	556,8	546	534,4	526,9	519	511	502,7	418,6	329,4	234,9	134,7
9	0	589,3	589,5	590,4	591,3	590,6	587,8	582,4	573,6	558,3	549,4	539,5	528,6	517,1	509,7	502	494,2	486,3	404,5	318,2	227,2	131,1
8	0	569,2	570,1	573,5	577,3	578,1	575,1	567,9	556,2	539,4	529,8	519,5	508,5	496,9	489,5	482	474,5	467	387,8	304,9	218,1	127
7	0	535	537,3	546,2	557,4	561,5	559,3	551,6	538,8	521,1	511,1	500,4	489,1	477,3	469,7	462,2	454,7	447,3	370,4	290,8	208,5	123
6	0	475,3	479,8	498,8	532	541,6	540,7	533,2	520,2	501,8	491,5	480,6	468,9	456,4	448,3	439,9	431,5	423,5	347,1	271,5	195,7	118,6
5	0	429,8	434,7	456,2	513,6	526,6	519,4	506,5	488,3	478,4	467,6	455,8	442,9	434	424,5	414,4	404,1	328,2	256,2	186,3	116,4	30
4	0	373,9	378,3	397,2	466,4	511,9	512,2	505,2	492,7	474,9	465,4	454,9	443,2	430,1	420,8	410,2	397,4	380,3	301	235	174,1	114,3
3	0	293,7	296,3	305,7	387,3	402,8	403,9	398,3	388,1	373,5	365,6	356,8	346,8	334,8	325,5	314,2	299,4	279,2	239,2	196,7	154,3	112
2	0	208,3	210,2	217,4	270,5	281,7	282,7	278,9	271,7	261,5	256	249,8	242,8	234	227,4	219,5	209,7	197,4	177,4	155,4	132,9	110,3
1	0	120,4	122,6	134,3	143	146,2	146,7	145,2	142	137,3	134,9	132,2	129,4	126,3	124,3	122,2	120,1	118,1	115,5	113,1	111,2	109,8
0	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30