

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DO AQUECIMENTO TRANSIENTE EM FORNOS DE FILAMENTO

por

Mateus de Matos Carlos

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2016



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE DO AQUECIMENTO TRANSIENTE EM FORNOS DE FILAMENTO

por

Mateus de Matos Carlos

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Francis Henrique Ramos França

Comissão de Avaliação:

Prof. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Prof. Paulo Smith Schneider

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 18, novembro de 2016.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, pelo apoio durante todo o tempo da graduação. Em especial meus pais, Luiz Adelmo e Elizete, por todo o incentivo, dedicação e confiança que me depuseram durante estes anos. A minha irmã, Heloisa, pelo amor e o carinho que sempre me auxiliaram a seguir em frente.

Ao professor Francis, por sua orientação, auxílio e principalmente, por todo o conhecimento que me passou para o desenvolvimento deste trabalho.

A Larissa Domingues Lemos, por sua dedicação e atenção durante o transcorrer do Trabalho de Conclusão de Curso.

A todos os meus professores, que durante estes anos de graduação, dedicaram seu tempo a passar os conhecimentos que foram necessários para este trabalho, assim como para a minha formação.

CARLOS, M. M. **Análise do Aquecimento Transiente em Fornos de Filamento**. 2016. 22. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

O presente trabalho propõe a realização de uma análise transiente do processo aquecimento de um forno a filamento, partindo da condição ambiente, até atingir o regime permanente. Baseando-se em uma geometria de filamento previamente desenvolvida, gerada por análise inversa, em regime estacionário, este trabalho tem por objetivo analisar as implicações que a etapa inicial de aquecimento traz à operação do forno. Como parâmetro de medida do seu bom funcionamento, considerou-se a uniformidade das temperaturas e da distribuição de calor na superfície submetida ao aquecimento. O fornecimento constante e bem distribuído de calor é um dos requisitos para o projeto desse tipo de equipamento; por este motivo, foi avaliado como a modificação de parâmetros do sistema pode influenciar os resultados obtidos. Esta análise foi realizada com a utilização do Método das Radiosidades para calcular o fluxo radiante em todas as faces do sistema, aqui tratado como cavidade radiante, com fluido não participante. Com isso, foi possível avaliar o desenvolvimento do processo de aquecimento do forno, observando também o impacto da variação de propriedades, como a capacidade térmica das paredes e a condutividade térmica, influenciam no processo de aquecimento do forno. Como resultado, a modificação do parâmetro de condutividade gera menores diferenças de temperatura no sistema; já o aumento da capacidade térmica, além de aumentar as diferenças de temperatura, também aumenta o tempo necessário para que o regime estacionário seja atingido. Entretanto, apesar desses parâmetros apresentarem influência significativa durante o período transiente, quando o regime permanente é atingido, as diferenças se reduzem e os resultados convergem a um mesmo valor.

PALAVRAS-CHAVE: fornos a filamento, método das radiosidades, regime transiente.

CARLOS, M. M. **Analysis of Transient Heating in Filament Ovens**. 2016. 22. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

The present work proposes the realization of a transient analysis of the heating process of a filament oven, starting from the ambient condition until reaching the permanent regime. Based on a pre-developed filament geometry, generated by reverse analysis, in steady state, this work aims to analyze the implications that the initial stage of heating brings to the operation of the oven. As a measure of its good functioning, the uniformity of temperatures and the distribution of heat on the surface under heating was considered. The constant and well distributed supply of heat is one of the requirements for the design of this type of equipment; For this reason, it was evaluated how the modification of system parameters can influence the results obtained. This analysis was performed using the Radiosity Method to calculate the radiant flux in all the faces of the system, here treated as radiant cavity, with non-participating fluid. With this, it was possible to evaluate the development of the furnace heating process, also observing the impact of the variation of properties, such as the thermal capacity of the walls and the thermal conductivity, influence the oven heating process. As a result, the modification of the conductivity parameter generates lower temperature differences in the system; Already the increase of the thermal capacity, besides increasing the temperature differences, also increases the time necessary for the steady state to be reached. However, although these parameters present significant influence during the transient period, when the permanent regime is reached, the differences are reduced and the results converge to the same value.

KEYWORDS: filament oven, radiosity method, transient regime.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
4. METODOLOGIA	3
4.1 Geometria	3
4.2 Superfície Cinza e Difusa	4
4.3 Balanço de Energia em Uma Superfície	5
4.4 Método das Radiosidades	6
4.5 Condução	7
4.6 Balanço de Energia na Superfície de Projeto	7
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	9
5.1 Regime Permanente	9
5.2 Fluxo de Calor no Momento do Acionamento do Forno	10
5.3 Aquecimento com Baixa Condutividade	11
5.4 Aquecimento com Alta Condutividade	12
5.5 Influência da Capacidade Térmica das Paredes	14
6. CONCLUSÕES	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
APÊNDICE A	16

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Desenho da cavidade radiante, com destaque para a superfície de projeto [Lemos, 2015].....	3
Figura 4.2 – Desenho da cavidade simulada, mostrando os elementos do sistema, com exceção da superfície superior. Em destaque os elementos da superfície de projeto.....	4
Figura 4.3 – Geometria do filamento aquecedor [Lemos, 2015].....	4
Figura 4.4 – Meio semi-transparente submetido a irradiação externa [Incropera et al., 2008].....	5
Figura 4.5 – Balanço energético na superfície. Fronteira interna ao elemento.....	5
Figura 4.6 – Balanço superficial, fronteira externa ao elemento.....	6
Figura 4.7 – Elementos utilizados: (a) elemento da superfície de projeto; (b) outros elementos elemento (paredes e teto).....	7
Figura 5.1 – Perfil do fluxo de calor adimensional para regime permanente.....	10
Figura 5.2 – Distribuição de calor adimensional na superfície de projeto no momento em que os aquecedores são acionados ($t^* = 0$).....	11
Figura 5.3 – Diferença de temperatura adimensional ΔT^* , variando-se C_{cd} , $R_{ct} = 1,0$ para todos os casos.....	12
Figura 5.4 – Fluxo de calor adimensional para $C_{cd} = 10,0$, $R_{ct} = 1,0$ e tempo adimensional $t^* = 100$	13
Figura 5.5 – Perfil de temperatura adimensional para $C_{cd} = 10,0$, $R_{ct} = 1,0$ e $t^* = 100$	13
Figura 5.6 – Máximas diferenças de temperatura adimensional variando-se as relações entre as capacidades térmicas, $C_{cd} = 0,1$	14
Figura A.1 – Fator de forma associado a troca de radiação entre os elementos dA_i e dA_j	16

1. INTRODUÇÃO

Fornos são equipamentos cujo objetivo principal é fornecer calor a um determinado material, visando a elevar de forma uniforme sua temperatura. Geralmente o material é depositado na superfície inferior do forno, sendo então seu projeto voltado a fornecer energia de maneira contínua nessa superfície e, por isto, chamada superfície de projeto. Comumente os fornos requerem que as temperaturas na superfície de projeto sejam as mais uniformes possíveis. Para garantir isto, é necessário que o fluxo de energia que chega à face inferior seja também homogêneo.

A geometria do forno, bem como de seu aquecedor, foi obtida por Lemos, 2015, O problema foi resolvido através da análise inversa via otimização para determinar a posição do filamento aquecedor. Nesse trabalho, foram definidos os fluxos de calor superficiais desejados e, empregando o método GEO (Otimização Extrema Generalizada), foram calculadas as melhores posições para os elementos do filamento aquecedor. Todavia, este cálculo é feito apenas para o regime estacionário do problema; toda a parcela transiente é desconsiderada, não podendo assim ser garantido o fluxo adequado de calor durante o processo inicial de aquecimento.

A fim de avaliar a eficiência desta geometria, quando o forno se encontra fora de seu regime final de operação, este trabalho se propõe a analisar a homogeneidade da distribuição de calor e temperatura na superfície de projeto, durante o seu processo de aquecimento. Para tal, serão observados o desenvolvimento do perfil de temperaturas, desde o acionamento dos elementos aquecedores, até que o sistema atinja seu estado permanente. Utilizar-se-ão diversos parâmetros para avaliar como estes influenciam no desenvolvimento do processo de aquecimento e, também, quais destes fornecem as melhores propriedades.

O forno é representado como uma cavidade radiante, composta por seis superfícies retangulares, onde o meio é considerado não participante. As superfícies são consideradas cinzas e difusas. O filamento aquecedor é posicionado no topo do sistema, sendo sua capacidade térmica desprezada devido à sua pequena massa. O fluxo de energia que emana dos aquecedores é prescrito e considerado uniforme durante todo o processo.

Serão consideradas apenas as trocas radiantes entre as diferentes faces que compõem o sistema; transferência de calor por condução é considerada apenas na superfície de projeto, deixando as demais isoladas. Para a determinação do fluxo radiativo nas superfícies do sistema, é empregado o método das radiosidades, que permite determinar os fluxos momentâneos de calor em cada elemento que compõe o forno.

Os resultados foram obtidos através de programação em linguagem *Fortran*. Foi desenvolvido uma rotina de cálculo iterativo para o método radiosidades, bem como, são calculadas as trocas térmicas condutivas e a perda de calor para o exterior. A rotina, por fim, calcula as temperaturas do sistema, e utiliza esta como dado de entrada para a próxima iteração.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o recebimento de calor na superfície de projeto de um forno durante o seu processo de aquecimento, permitindo observar como a energia emitida pelos elementos aquecedores é recebida pela face inferior, bem como, analisar a uniformidade das temperaturas na superfície analisada (superfície de projeto). Tal estudo é necessário em projetos de fornos (tanto domésticos, como industriais), pois, garantir a homogeneidade do aquecimento destes equipamentos os torna muito mais adequados ao uso; a exemplo dos fornos para tratamentos térmicos em ligas metálicas, que ocasionará alterações nas propriedades do material caso este não se aqueça de forma constante.

Para realizar a avaliação da qualidade de um forno, primeiramente é necessário que se desenvolvam mecanismos para o cálculo da radiações presentes no sistema e, também, a determinação das temperaturas em todos os elementos do sistema. Este sistema de cálculo,

baseado no método das radiosidades, permite que sejam feitas as observações necessárias para o desenvolvimento do trabalho, permitindo também avaliar outros sistemas de cavidades radiantes.

Outra proposta é a observação de como as diferentes propriedades do forno modificam a sua etapa transiente. Variando-se, por exemplo, a capacidade térmica ou a massa das paredes laterais do forno, o processo de aquecimento acaba sendo alterado, modificando tanto o tempo necessário para que o regime estacionário seja alcançado, como também modificando o perfil do recebimento de calor na face inferior. Tais considerações são importantes em projetos de fornos pois permitem avaliar quais materiais devem ser utilizados para a fabricação do equipamento, bem como, permitem obter fornos com melhores propriedades térmicas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em Reis, 2001, é definido um problema de troca térmica condutiva-radiativa. Nesse trabalho é dada grande ênfase ao cálculo dos fatores de forma do sistema, principalmente para geometrias complexas ou com superfícies obstrutoras. Também é focado a metodologia para a solução de um problema conjugado de condução-radiação. A parcela radiativa do sistema é abordada por meio do método das radiosidades, justificando a ênfase nos fatores de forma. A condução é abordada pelo CVFEM (Control Volume Finite Element Method), metodologia aplicada a condução em superfícies delgadas.

Em Francis e Howell, 2005, foram utilizados métodos de análise inversa para obter-se o melhor posicionamento para as fontes de calor pontuais utilizadas no sistema. Estas fontes podem alterar o valor de sua emissão, controlando assim quanto calor elas introduzem no sistema. Neste trabalho é levado em consideração o regime transiente de operação do forno. As paredes são isoladas, não perdendo calor para o exterior. A única perda de calor externa é introduzida na superfície de projeto, permitindo assim que o sistema se estabilize.

Em Navaneethkrishnan *et al.*, 2008, são investigados, através de simulação numérica e dados experimentais, as variações de temperatura dentro de um forno para produtos alimentícios. Nesse trabalho, os filamentos aquecedores são posicionados em diferentes regiões da cavidade radiante, tanto no topo como nas paredes laterais, a fim de encontrar soluções que melhor distribuíssem o calor sobre os alimentos, gerando também, uma distribuição de temperaturas mais uniformes. Segundo esse trabalho, a melhor distribuição de calor, não apenas uniformiza o aquecimento dos produtos, como também reduz os gastos energéticos do equipamento.

Em Ibrahim *et al.*, 2012, foi utilizado o método das radiosidades para o cálculo das trocas radiantes em um forno de uso alimentar. Nesse trabalho, o forno foi descrito através de uma representação de cadeia; sendo associado um fator de forma para cada uma de suas ligações. Por fim, foram definidos os valores de radiação que deixam cada superfície e a fração que é recebida pela outra.

No trabalho de Lemos, 2015, foi modelado um forno como uma cavidade radiante. Todas as superfícies são consideradas cinzas-difusas. O fluido foi considerado não participante e as paredes foram isoladas, não havendo perdas para o exterior, a condução entre elementos das paredes não foi considerada. Logo, a única forma de troca térmica do sistema é por meio de radiação. O forno foi considerado em regime permanente e o fluxo de calor e a temperatura desejadas na superfície de projeto foram prescritas. Assim pode-se utilizar de uma ferramenta de análise inversa, o método da Otimização Extrema Generalizada (GEO), para gerar a geometria do filamento aquecedor mais adequada à aquelas condições.

Ainda em Lemos, 2015, foi utilizado posteriormente o método das radiosidades para calcular o perfil do fluxo de calor radiante na superfície de projeto, a fim de verificar o correto funcionamento da geometria do filamento. Neste caso a emissão de calor dos elementos aquecedores foi prescrita, foram calculadas as radiosidades do sistema e, então, a radiação na face desejada, sendo então comparados com os valores esperados.

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o cálculo da radiação térmica do sistema foi o Método das Radiosidades. Neste método são computados os valores da radiação que saem de uma determinada superfície (irradiação e reflexão) e, através da utilização de fatores de forma, determinar a radiação que atinge outra. O método das radiosidades é empregado para o cálculo do calor recebido pelos elementos do sistema de forma imediata, ou seja, determina o valor da radiação apenas para aquele período de tempo.

Para levar em consideração a variação da temperatura e, conseqüentemente, da radiação, é realizado, a cada iteração do sistema, um balanço térmico em todo o elemento que compõe a cavidade. Tal balanço leva em conta toda a energia recebida ou perdida pelo elemento e calcula a diferença da temperatura devido a troca de calor. Novamente os valores obtidos são imediatos; todavia, estes valores permitem obter novas radiosidades. Este cálculo é realizado diversas vezes até o sistema atingir o regime permanente.

Os valores de temperatura e radiação presentes no trabalho foram tratados de forma adimensional, da mesma forma que as propriedades térmicas dos materiais envolvidos. A opção pelo uso de um sistema adimensional se deve a maior praticidade para o cálculo das variáveis desejadas, bem como fornece uma maior flexibilidade na interpretação dos resultados, pois permite que os valores obtidos sejam comparados com sistemas reais, ao invés de fornecer resultados que valem apenas para as propriedades especificadas.

4.1 Geometria

Para a realização das simulações, o forno será considerado uma cavidade radiante, composta por 6 paredes retangulares. As dimensões utilizadas no projeto são adimensionais, com sua referência na dimensão de maior comprimento, esta foi considerada igual a 1 ($L=1,0$). As demais dimensões são definidas a partir desta, ficando a largura do forno definida como 0,8 ($W/L=0,8$) e a altura foi definida como sendo 0,2 ($H/L=0,2$). A superfície de projeto não cobre a totalidade da face inferior, ficando seu comprimento e sua largura definidas respectivamente como: $L_d/L=0,8$ e $W_d/L=0,6$. A cavidade considerada é ilustrada pela figura 4.1.

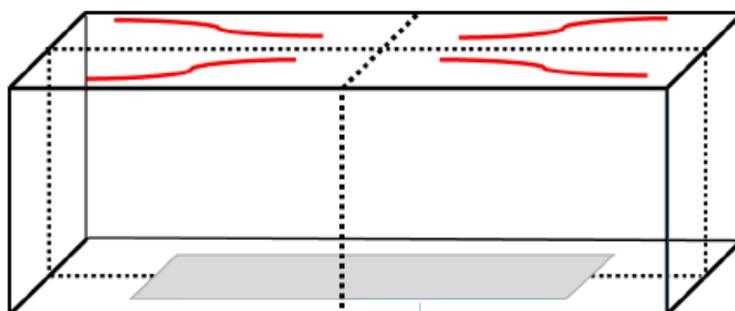


Figura 4.1 – Desenho da cavidade radiante, em destaque a superfície de projeto [Lemos, 2015]

As superfícies foram divididas em elementos menores, com todas as suas dimensões iguais: $\Delta x = \Delta y = \Delta z$. Ficando a dimensão x com 30 elementos, a dimensão y com 24 elementos e a dimensão z com 6 elementos. Por questão de simetria, pode-se considerar apenas um quarto da cavidade total para a simulação, tal simplificação reduz o tempo de processamento requerido pelo sistema. A malha a ser simulada possui 15x12x6 e pode ser vista na figura 4.2.

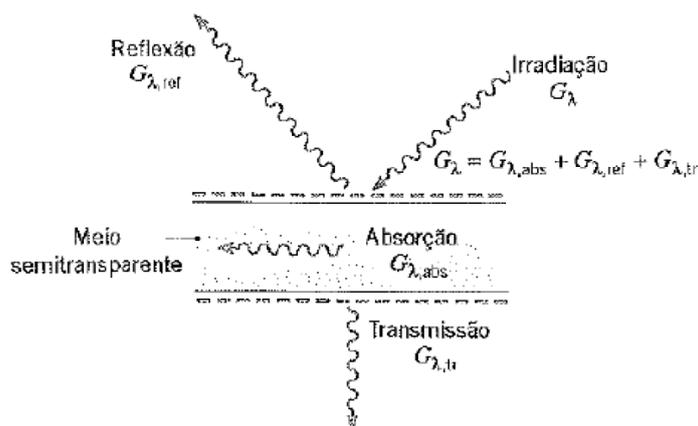


Figura 4.4 – Meio semi-transparente submetido a irradiação externa [Incropera *et al.*, 2008].

Neste trabalho, todas as superfícies foram consideradas como cinzas e difusas, sendo então que as propriedades de emissividade e absorvidade são iguais ($\varepsilon = \alpha$). Esta hipótese implica que a absorvidade e a refletividade são independentes do comprimento de onda da radiação, sendo que, estas propriedades não são alteradas pelo seu ângulo de incidência. Outra hipótese é a de superfície opaca, o que implica em transmissividade nula ($\tau = 0$) e a refletividade é dada por:

$$\rho = 1 - \varepsilon \quad (4.1)$$

4.3 Balanço de energia em uma superfície

Considerando que as trocas radiativas ocorrem entre as superfícies do sistema, faz-se necessário a realização de um balanço energético nestas. “Uma superfície não contém volume nem massa, portanto não possui energia. Assim, uma superfície pode ser visualizada como um sistema fictício cuja quantidade de energia permanece constante durante o processo (como sistema estacionário ou escoamento em regime permanente)” [Çengel e Ghajar, 2012]. Então, o balanço de energia na superfície pode ser expresso por:

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} = 0 \quad (4.2)$$

Assumindo esta hipótese de regime estacionário, é possível realizar algumas observações. Colocando a superfície de controle na parte interna, logo abaixo da superfície j , se obtém o fluxo de calor.

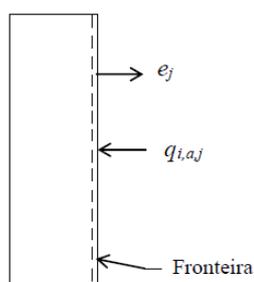


Figura 4.5 – Balanço energético na superfície. Fronteira interna ao elemento.

O balanço é mostrado na Eq. (4.3), onde $q_{r,j}$ (W/m^2) é a diferença entre o poder emissivo e_j (W/m^2) e a absorção $q_{i,a,j}$ (W/m^2).

$$q_{r,j} = e_j - q_{i,a,j} \quad (4.3)$$

Considerando a superfície cinza e difusa, a Eq. (4.3) pode ser reescrita como:

$$q_{r,j} = \varepsilon_j e_{b,j} - \varepsilon_j q_{i,j} \quad (4.4)$$

Da mesma forma, se for colocada a superfície de controle no lado externo da parede, se obtém outra equação.

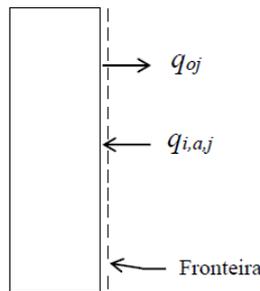


Figura 4.6 – Balanço superficial, fronteira externa ao elemento.

Definindo o fluxo radiante, $q_{r,j}$ (W/m^2), como sendo a diferença entre a radiosidade $q_{o,j}$ (W/m^2) e a radiação incidente $q_{i,j}$ (W/m^2), aqui chamada de irradiação, tem-se:

$$q_{r,j} = q_{o,j} - q_{i,j} \quad (4.5)$$

A equação para a radiosidades pode ser obtida por meio das equações (4.4) e (4.5), combinando estas e gerando a Eq. (4.6).

$$q_{o,j} = \underbrace{\varepsilon_j e_{b,j}}_{\text{Emissão}} + \underbrace{(1 - \varepsilon_j) q_{i,j}}_{\text{Reflexão}} \quad (4.6)$$

4.4 Método das radiosidades

A radiosidades é definida como a totalidade da radiação que deixa uma superfície; nela estão inclusas a radiação emitida pelo corpo, assim como a parcela da radiação que é refletida pela superfície. O cálculo da radiação proveniente de outros elementos leva em consideração o fator de forma (Apêndice A), onde é computada a fração da radiação que deixa um corpo e é recebida pelo outro. A Eq. (4.6) pode ser reescrita como:

$$q_{o,j} = \varepsilon_j e_{b,j} + (1 - \varepsilon_j) \sum_{i=1}^N F_{i,j} q_{o,i} \quad (4.7)$$

O método das radiosidades por sua vez utiliza esta definição para calcular o fluxo de radiação nas superfícies de uma cavidade radiante. A emissão é calculada por meio do poder emissivo $e_{b,j}$ (w/m^2), calculado pela Eq. (4.8).

$$e_{b,j} = \sigma T_j^4 \quad (4.8)$$

Por fim o fluxo radiante em uma superfície pode ser calculado pela Eq. (4.9)

$$q_{r,j} = q_{o,j} - \sum_{i=1}^N F_{i,j} q_{o,i} \quad (4.9)$$

Quando a temperatura não é conhecida, mas o fluxo radiante é, a Eq. (4.9) pode ser utilizada para calcular a radiosidades nesse elemento.

4.5 Condução

Segundo Incropera *et al.*, 2008, a condução pode ser definida como a transferência de energia de partículas mais energéticas para as menos energéticas devido a interação das moléculas. Seguindo a metodologia de uma cavidade radiante, sem fluido participante, a condução pode ser definida como a troca de calor de um elemento da parede com os elementos que o circundam. Para a determinação da troca de calor condutiva é utilizada a Eq. (4.15), onde k (W/(m.K)) é a condutividade térmica, A (m²) a área superficial, Δx a distância e ΔT (K) a diferença de temperatura.

$$\dot{Q}_{cd} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (4.10)$$

Para o cálculo da condução em uma parede utilizando a Eq. (4.10) é necessário fazer algumas simplificações. Neste caso, a espessura da parede será desprezada, considerando a temperatura uniforme nesta dimensão. Também a temperatura será considerada uniforme em toda a extensão do elemento observado.

4.6 Balanço térmico na superfície de projeto

Para realizar a determinação do aumento de temperatura em um corpo, quando este recebe uma certa quantidade de calor, é necessário realizar um balanço energético. O balanço de energia tem por finalidade definir quanta energia o corpo recebeu e obter valores para o incremento de temperatura. A Eq. (4.11) mostra o balanço energético em um sistema com massa uniforme.

$$\rho V C_d \frac{dT}{dt} = \dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} \quad (4.11)$$

Na Eq (4.16), ρ (kg/m³) é a densidade do material, V (m³) do corpo, C_d (J/(kg.K)) a capacidade térmica, dT (K) o incremento de temperatura, dt (s) o tempo transcorrido, \dot{E} (W/s) a energia por unidade de tempo. Analisando a parte direita da Eq. (4.11) podem-se definir as taxas de energias no corpo, assim é obtida a Eq. (4.12).

$$\rho_d \Delta x A C_d \frac{dT}{dt} = -\frac{k_d A}{\Delta x} (4T - \sum_{j=1}^4 T_j) - A q_{r,i}'' - A \frac{q_{prescrito}''}{T_{prescrita} - T_\infty} (T - T_\infty) \quad (4.12)$$

A variável T_j é a temperatura nos elementos vizinhos. O termo $q''_{prescrito} / (T_{prescrita} - T_\infty)$ é o coeficiente de perda de calor da superfície de projeto para a base do forno, sendo esta, a única forma de perda de calor introduzida no sistema. A utilização deste termo permite a estabilização das temperaturas quando o sistema atinge o regime estacionário.

As adimensionalizações foram realizadas com base nos valores da temperatura prescrita ($q^* = q / \sigma T_{prescrita}^4$ e $T^* = T / T_{prescrita}$). Para a variável tempo, foi utilizado um fator τ descrito pela Eq. (4.13), ficando o tempo adimensional como $t^* = t / \tau$. A condução foi condensada em uma única variável, chamada coeficiente condutivo C_{cd} , mostrado na Eq. (4.14).

$$\tau = \frac{\rho_d C_d \Delta x}{\sigma T_{prescrita}^3} \quad (4.13)$$

$$C_{cd} = \frac{K_d}{\sigma \Delta x T_{prescrita}^3} \quad (4.14)$$

Com as equações (4.13) e (4.14) é possível obter uma forma adimensional para o balanço de energia na superfície de projeto, mostrado na Eq. (4.15), obtendo-se:

$$\frac{dT^*}{dt^*} = -C_{cd} (4T^* - \sum_{j=1}^4 T_j^*) - q_{r,i}^* - \frac{q_{prescrito}^*}{1 - T_\infty^*} (T^* - T_\infty^*) \quad (4.15)$$

A Eq. (4.15) também é utilizada para as demais paredes do sistema, porém os termos condutivos e de perdas são retirados. Para fins de simplificação, é possível criar uma correlação entre a capacidade térmica das paredes em relação a superfície de projeto, apresentada na Eq. (4.16).

$$R_{ct} = \frac{\rho_w C_w \Delta x}{\rho_d C_d \Delta x} = \frac{\tau_w}{\tau_d} \quad (4.16)$$

Aplicando a relação R_{ct} na equação de balanço da parede, obtém-se a Eq. (4.17).

$$R_{ct} \frac{dT^*}{dt^*} = -q_{r,i}^* \quad (4.17)$$

A utilização da metodologia apresentada implica em uma série de simplificações. Primeiramente, foi utilizado o modelo de capacitância global, assim, os elementos do sistema possuem temperatura uniforme no interior do seu volume. Este modelo, pode ser utilizado quando a condução é suficientemente alta para fazer com que as diferenças de temperatura interna sejam negligenciadas; os elementos também necessitam ter suas dimensões pequenas o suficiente para não apresentarem variação de temperatura ao longo de sua extensão. O fluido interno as paredes é considerado não participante, não sendo consideradas trocas convectivas no interior da cavidade. A inércia térmica do filamento aquecedor é desprezada, e a taxa de emissão, constante durante todo o processo.

Outra simplificação é a utilização de paredes isoladas; isto implica em não haverem trocas térmicas com o exterior nas paredes laterais e superior. Os elementos da superfície inferior (de projeto) apresentam um termo de troca térmica para a base do forno. A introdução deste termo se deve a necessidade do sistema possuir modo de extração de calor, caso contrário, o sistema não entraria em equilíbrio e as temperaturas subiriam indefinidamente. O valor do coeficiente de perda é calculado de forma que, quando as temperaturas atingem o valor prescrito, a taxa de calor, para fora do sistema, seja a mesma que a taxa prescrita no filamento aquecedor.

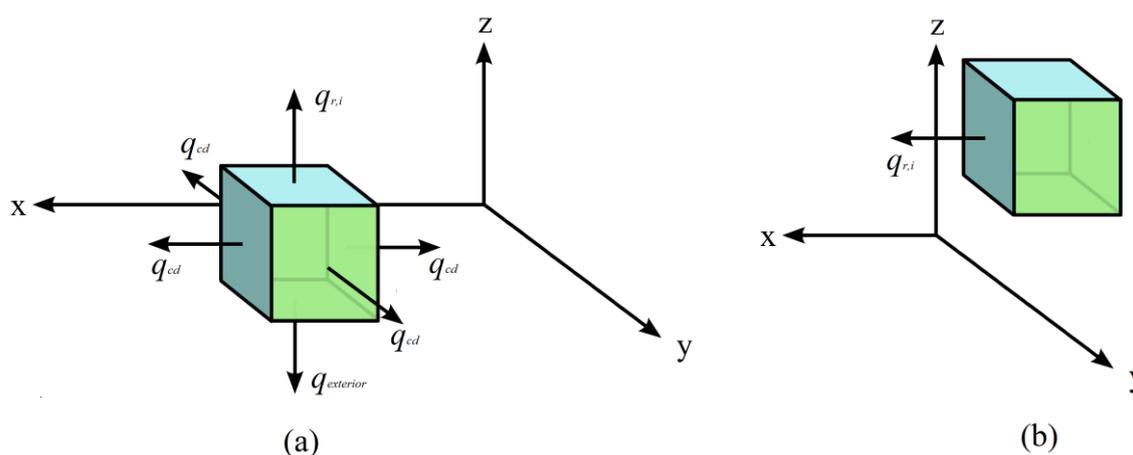


Figura 4.7 – Elementos utilizados: (a) elemento da superfície de projeto; (b) outros elementos elemento (paredes e teto).

Na figura 4.7, são mostrados exemplos dos elementos que compõem a cavidade. Os elementos da superfície de projeto (a) consideram trocas térmicas por radiação, por condução para os elementos vizinhos e perda de calor para o exterior. Os demais elementos apresentam apenas trocas radiantes.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de permitir a comparação dos resultados obtidos com outros trabalhos na área, todo o procedimento foi feito utilizando variáveis adimensionais. Os valores prescritos para o fluxo de calor e temperaturas são: $q_{prescrito} = -3,22 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ e $T_{prescrita} = 673 \text{ K}$. Os valores prescritos passam a ter seus valores adimensionais como: $q_{prescrito}^* = -0,227$ e $T_{prescrita}^* = 1$.

Os parâmetros utilizados para a emissividade para as paredes, superfície de projeto e aquecedores são respectivamente: $\epsilon_w = 0,9$, $\epsilon_d = 0,9$ e $\epsilon_h = 0,9$. O valor da irradiação nos elementos aquecedores foi obtido multiplicando-se os valores adimensionais do fluxo de calor prescrito na superfície de projeto ($q_{prescrito,total}^* = -29,916$) e dividindo entre os cinquenta elementos aquecedores ficando então $q_{i,h}^* = 0,59832$. A temperatura adimensional inicial em todos os elementos do forno foi definida como $T_{\infty}^* = 0,442$, o que equivale a 298 K ou 25 °C.

5.1 Regime permanente

A fim de verificar se a metodologia utilizada para a obtenção dos resultados está correta, foram realizadas comparações entre o perfil calculado em regime permanente e o obtido por meio da análise transiente. Isto, tem como objetivo, averiguar se o fluxo de calor e as temperaturas superficiais alcançadas, ao final do regime transiente (quando este atinge o regime estacionário), são os mesmos obtidos com o cálculo realizado em regime permanente.

Para o cálculo do sistema em regime permanente, seguiu-se a mesma metodologia proposta por Lemos, 2015, em que foi utilizada a Eq. (4.9) para o método das radiosidades. O valor do fluxo radiante nesta equação foi considerado zero ($q_{r,i} = 0$), o que faz com que as paredes fiquem isoladas. A condução foi negligenciada em todas as superfícies. Os resultados obtidos são mostrados na figura (5.1).

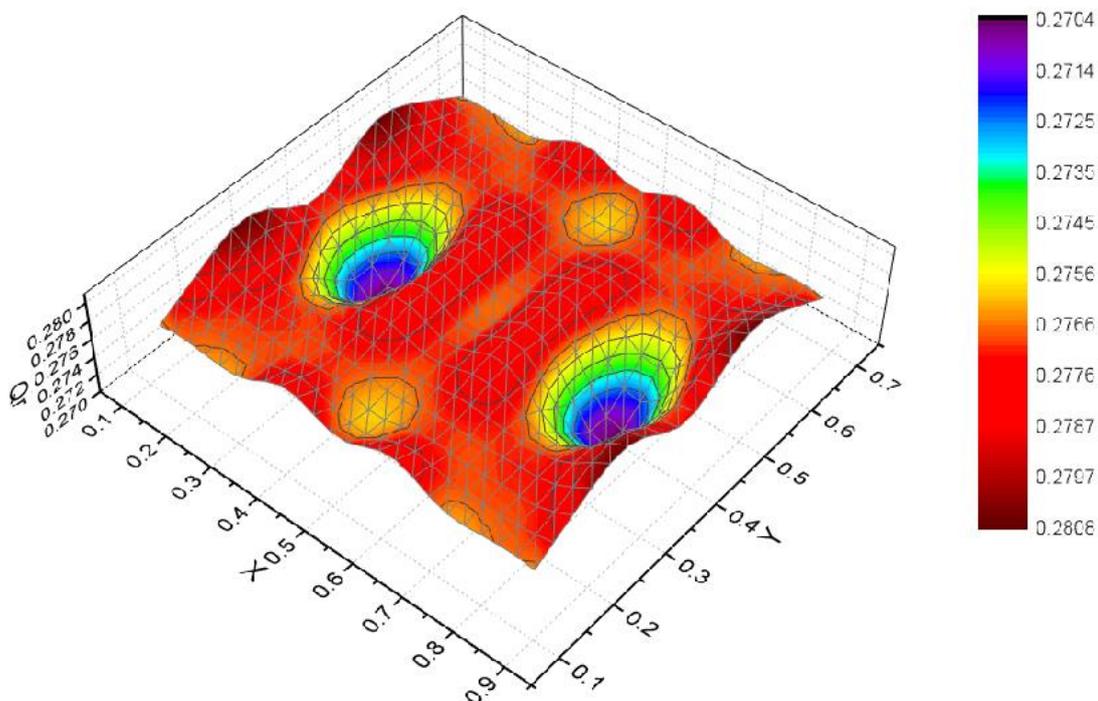


Figura 5.1 – Perfil do fluxo de calor adimensional para regime permanente.

Para avaliar quão próximos os resultados estão dos valores prescritos, foi calculado o desvio médio, bem como o desvio máximo do perfil de calor na superfície de projeto, em relação ao valor especificado de $q^*_{prescrito} = -0,227$. Os valores para o desvio podem ser vistos na tabela 5.1. Estes resultados são os mesmos obtidos por Lemos, 2015.

Tabela 5.1 – Desvios médio e máximo do fluxo de calor adimensional para regime permanente.

<i>Desvio médio (%)</i>	<i>0,39820</i>
<i>Desvio máximo (%)</i>	<i>2,43494</i>

5.2 Fluxo de calor no momento do acionamento do forno

O fluxo de calor adimensional, no momento do acionamento do forno $t^* = 0$ pode ser visto na Figura 5.2.

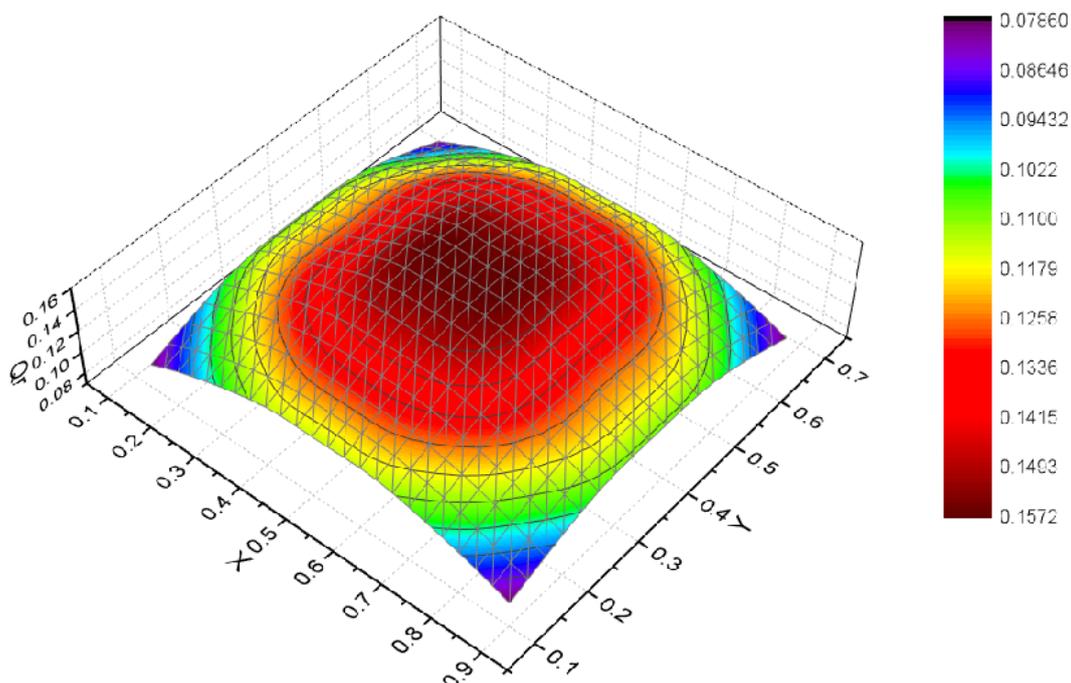


Figura 5.2 – Distribuição de calor adimensional na superfície de projeto no momento em que os aquecedores são acionados ($t^* = 0$).

O fluxo médio de calor adimensional, neste caso ficou como $q_{r,médio} = -0.124837$. Como esperado, este valor está bem abaixo do valor prescrito. Ele também se mostra bastante desigual, isto porque, as paredes, por estarem em temperatura baixa, absorvem grande parte da radiação emitida pelos aquecedores. Tal fato é evidenciado pelo fato do fluxo nas proximidades das paredes se mostra muito inferior ao no centro. Os desvios do fluxo adimensional q_r^* , em relação a $q_{r,médio}$, podem ser vistos na Tabela 5.2

Tabela 5.2 – Desvios médio e máximo da solução para regime transiente em $t^* = 0$.

Desvio médio (%)	15.08599
Desvio máximo (%)	36.94579

5.3 Efeitos da condução na superfície de projeto

Para a avaliação da influência que a condução de calor na superfície de projeto causa no desenvolvimento do fluxo radiante, foram calculados os valores de q_r^* para três condições distintas. Os coeficientes de condução adimensional foram definidos como: $C_{cd} = 0,1$, $C_{cd} = 1,0$ e $C_{cd} = 10,0$. Para avaliar a homogeneidade do sistema ao longo do tempo, foi escolhido o valor da máxima diferença de temperatura ΔT^* , cuja definição se encontra na Eq. (5.1).

$$\Delta T^* = T_{máx}^* - T_{mín}^* \quad (5.1)$$

Os valores de ΔT^* são mostrados na Figura 5.3. O valor utilizado para a relação entre a capacidade térmica das paredes, em relação a superfície de projeto, foi de $R_{ct} = 1,0$ para todos os casos.

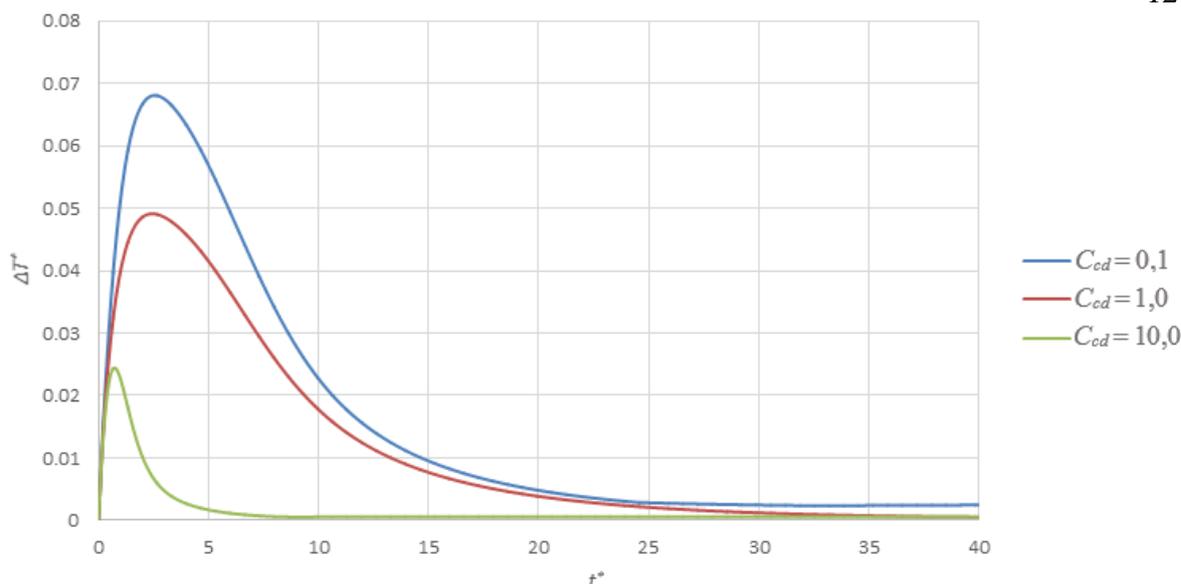


Figura 5.3 – Diferença de temperatura adimensional ΔT^* , variando-se C_{cd} , $R_{ct}=1,0$ para todos os casos.

Pode-se perceber na Figura 5.3 que os valores de ΔT^* são bastante influenciados pela variação do coeficiente condutivo, havendo uma tendência para a diferença de temperatura diminuir conforme C_{cd} é aumentado. Isso se deve ao fluxo de calor condutivo, que distribui o calor dos elementos mais aquecidos, para aqueles com menor temperatura. Sendo assim, maiores coeficientes de condução geram uma maior distribuição do calor pela superfície de trabalho e, conseqüentemente, uma maior homogeneidade de temperaturas. Os valores máximos de ΔT^* são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Máxima diferença de temperatura adimensional.

Coeficiente Condutivo C_{cd}	Máxima Temperatura Adimensional ΔT^*
0,1	$6,61 \times 10^{-2}$
1,0	$4,91 \times 10^{-2}$
10,0	$2,44 \times 10^{-2}$

O desvio do fluxo radiante, na superfície de projeto, ao final do período transiente em relação a $q^*_{prescrito}$, é apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Desvio do fluxo de calor q^*_r na superfície de trabalho em relação a $q^*_{prescrito}$.

C_{cd}	Desvio médio (%)	Desvio máximo (%)
0,1	0,05110	0,31036
1,0	0,32186	1,92557
10,0	0,32182	1,92457

Na Tabela 5.4 é perceptível que, uma vez alcançado o regime permanente, a condução de calor não representa mais um fator preponderante para a distribuição de calor na superfície de trabalho; tendendo, os resultados, a valores próximos dos obtidos em regime permanente (Tabela 5.1). Isso acontece pois as temperaturas dos elementos tendem a se estabilizar próximas ao valor prescrito ($T^*_{prescrita}=1$), reduzindo a troca de calor por condução na superfície.

A figura 5.4 apresenta o fluxo de calor adimensional q_r^* , para o caso de maior condução analisado ($C_{cd} = 10,0$). Mesmo neste caso, após passado certo tempo, os valores do fluxo radiante ficam próximos aos encontrados no sistema sem condução (Figura 5.1).

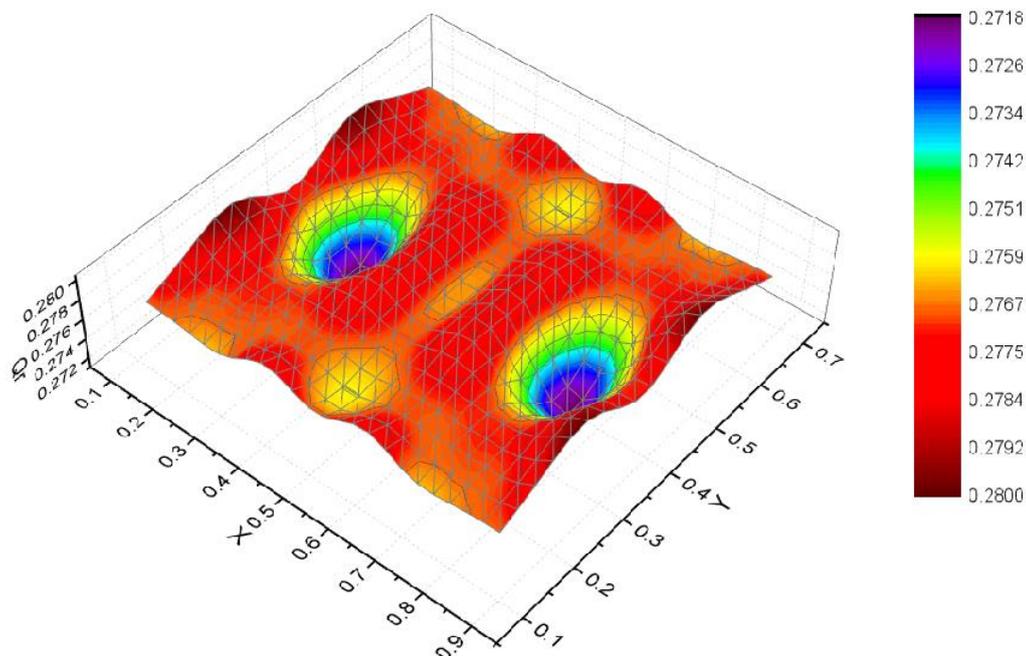


Figura 5.4 – Fluxo de calor adimensional para $C_{cd} = 10,0$, $R_{ct} = 1,0$ e tempo adimensional $t^* = 100$.

Na figura 5.5, pode ser visto o perfil de temperaturas associado as mesmas condições da Figura 5.4.

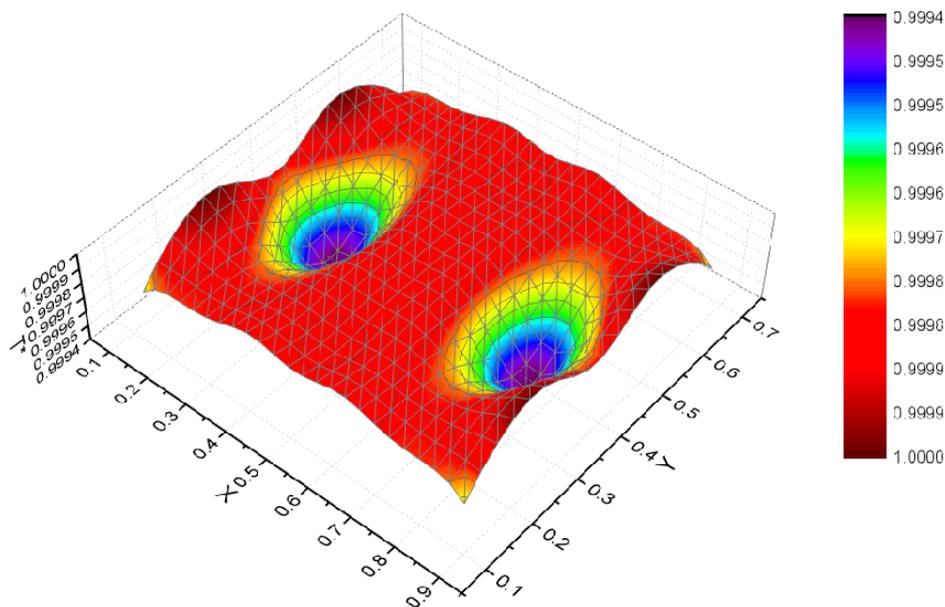


Figura 5.5 – Perfil de temperatura adimensional na superfície de projeto. $C_{cd} = 10,0$, $R_{ct} = 1,0$ e $t^* = 100$.

5.5 Influência da capacidade térmica das paredes.

Para observar como a capacidade térmica das paredes do forno influenciam no seu aquecimento, foram definidas três relações entre as capacidades térmicas das paredes, em relação as da superfície de projeto. Os valores escolhidos são $R_{ct}=0,1$, $R_{ct}=1,0$ e $R_{ct}=10$.

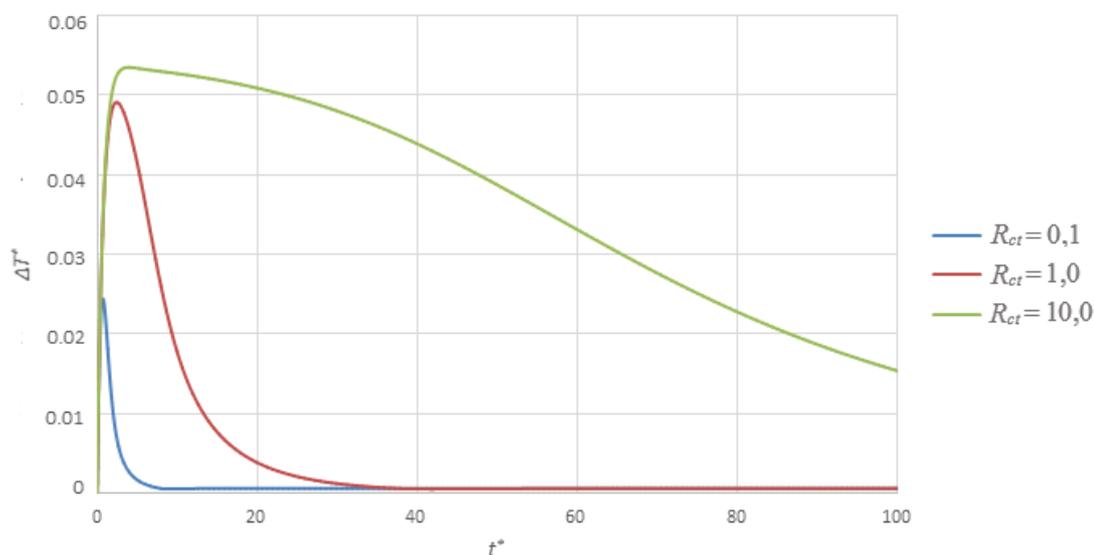


Figura 5.6 – Máximas diferenças de temperatura adimensional variando-se as relações entre as capacidades térmicas, $C_{cd}=0,1$.

Na Figura 5.6 é possível observar como a alteração da razão R_{ct} modificam a evolução do processo de aquecimento. Notadamente, valores mais altos de capacidade térmica das parede, aumentam o ΔT^* , assim como o tempo para ser atingido o regime permanente (t^*_{est}). O valor de t^*_{est} foi definido como o tempo adimensional necessário para que ΔT^* fique menor do que 1×10^{-3} . A Tabela 5.6 mostra estes resultados.

Tabela 5.5 – Comparação do desempenho variando R_{ct} .

R_{ct}	ΔT^* Máximo	t^*_{est}
0,1	$2,44 \times 10^{-2}$	6,33
1,0	$4,91 \times 10^{-2}$	31,83
10	$5,35 \times 10^{-2}$	281,19

Os desvios do fluxo de calor adimensional, em relação ao valor prescrito, são apresentados na Tabela 5.7. Os valores apresentados, também são próximos aos valores encontrados em regime permanente (Tabela 5.1), evidenciando que a capacidade térmica da parede possui influência significativa apenas durante a fase de aquecimento. Após transcorrido tempo suficiente, essa influência passa a ser imperceptível.

Tabela 5.6 – Desvios do fluxo de calor adimensional.

R_{ct}	Desvio médio (%)	Desvio máximo (%)
0,1	0.32182	1.92457
1,0	0.32186	1.92557
10	0.34432	0.89166

6. CONCLUSÕES

A proposta deste trabalho foi analisar a geometria de um forno, projetado por análise inversa, em regime estacionário, submetendo-a a um processo transiente de aquecimento. Como esperado, os resultados obtidos no início do processo de aquecimento são bem divergentes a aqueles obtidos com o sistema em regime permanente. É interessante notar que, não apenas os fluxos de calor são menores, como também possuem distribuição desigual, como mostrado na Tabela 5.2. O principal fator que altera os resultados são as paredes, que no momento do acionamento do filamento aquecedor, se encontram em temperatura ambiente; sendo assim, as paredes acabam por absorver grande parcela da energia que deveria ser direcionada a superfície inferior do forno.

Analisando-se os resultados da máxima diferença de temperatura adimensional, para os três valores do coeficiente adimensional de condução de calor, fica claro uma grande tendência de que, valores mais altos de condução, apresentam perfil de temperatura mais homogêneo. Isto porque, a condução, distribui o calor recebido nos elementos de mais alta temperatura, para os de mais baixa, impedindo que grandes diferenças sejam geradas. Por outro lado, quando o regime permanente é atingido, a distribuição de radiação se mostra menos dependente da condução, atingindo valores próximos aos obtidos sem considerar este efeito.

A capacidade térmica das paredes do forno, por sua vez, apresenta grande influência no processo de aquecimento do forno. Paredes com alta capacidade térmica demoram mais tempo para se aquecerem, por este motivo, o fluxo radiante na superfície de projeto fica irregular durante mais tempo, gerando maiores diferenças de temperaturas em relação às geradas com paredes com menor capacidade de armazenamento de energia. O tempo necessário para que o sistema se estabilize também aumenta significativamente. Tais resultados indicam que, paredes muito massivas, ou com materiais com grande capacidade térmica, devem ser evitados em fornos que trabalhem em regime transiente, ou seja, fornos que são submetidos a processos frequentes de aquecimento e resfriamento, ou que trabalhem por curtos períodos de tempo, preferencialmente devem possuir paredes mais leves e que se aqueçam mais rapidamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Çengel, Y. A.; Ghajar, A. J.; **“Transferência de Calor e Massa”**, Bookman, 4ª edição, 2012.

França, F. H. R.; Howell, J. R.; **“Transient Inverse Design of Radiative Inclosures for Thermal Processing of Materials”**, Inverse Problems in Science and Engineering, vol.14, No.4, p.423-436, 2006.

Ibrahim, U. K.; Mohd Salleh, R.; Zhou, W.; **“Radiation Heat Transfer Analysis in High Emissivity Baking Oven Using Network Representation Method”**, ICCCP, Kuala Lumpur, Malaysia, 2012.

Incropera, F. P.; Dewitt, D. P.; Bergman, T. L.; Lavine, A. S.; **“Fundamentos de Transferência de Calor e Massa”**, LTC, 6ª Edição, 2008.

Lemos, L. D.; **“Aplicação da Análise Inversa no Projeto de Fornos com Aquecedores de Filamento”**, Discertação de Mestrado em Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, 2015.

Navaneethkrishnan, P.; Srinivasan, P. S. S.; Mansouri, S. H.; Sakurai, A.; **“Numerical And Experimental Investigation Of Temperature Distribution Inside a Heating Oven”**, Journal of Food Processing and Preservation, v. 34, p.275-288, 2008.

Reis, M. V. F.; **“Simulação Numérica Da Transferência De Calor Em Problemas Radiativos – Condutivos”**, Discertação de Mestrado em Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2001.

APÊNDICE A – FATORES DE FORMA

Para a obtenção das radiosidades, é necessário que sejam calculados os fatores de forma entre os elementos que compõem a cavidade. Estes fatores, segundo Incropera *et al.*, 2008, são definidos como a fração da radiação que deixa a superfície i e é interceptado pela superfície j . Tal processo pode ser observado na figura A.1.

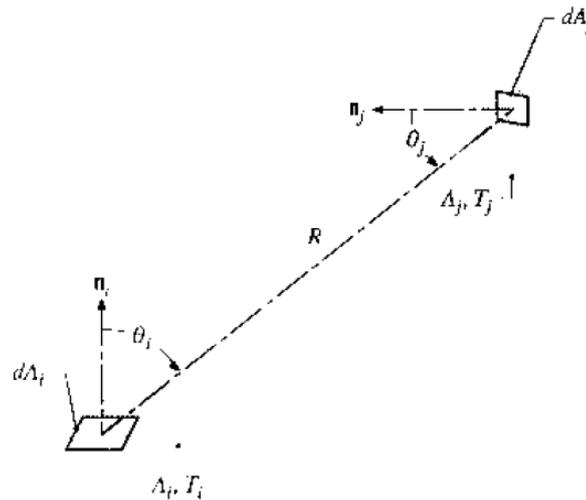


Figura A.1 – Fator de forma associado a troca de radiação entre os elementos dA_i e dA_j .

O fator de forma entre os elementos dA_i e dA_j pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$F_{i-j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi S^4} dA_j dA_i \quad (\text{A.1})$$

Analogamente para a troca entre o elemento dA_i e dA_j a expressão fica:

$$F_{j-i} = \frac{1}{A_j} \int_{A_j} \int_{A_i} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi S^4} dA_i dA_j \quad (\text{A.2})$$

Ao se igualarem as Eqs. (A.1) e (A.2), obtém-se uma relação conhecida por regra da reciprocidade. Expressa na Eq. (A.3).

$$A_j F_{j-i} = A_i F_{i-j} \quad (\text{A.3})$$

Em uma cavidade fechada, composta por N superfícies, as somas dos fatores de forma que saem de uma determinada face é sempre igual a um. Isto se deve a lei da conservação de energia, uma vez que, toda a radiação que deixa um elemento, será interceptada por outro. Tal propriedade é descrita pela Eq. (A.4).

$$\sum_{j=1}^N F_{i-j} = 1 \quad (\text{A.4})$$