

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

ANÁLISE TRANSIENTE DO AQUECIMENTO EM FORNOS COM DIFERENTES
GEOMETRIAS DE FILAMENTOS AQUECEDORES

por

Victor Gomes Helder

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, Junho de 2018



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

ANÁLISE TRANSIENTE DO AQUECIMENTO EM FORNOS COM DIFERENTES
GEOMETRIAS DE FILAMENTOS AQUECEDORES

por

Victor Gomes Helder

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^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

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

Orientador: Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Prof^a. Dr^a. Letícia Jenisch Rodrigues

M. Eng. Yuri Theodoro Barbosa de Lima

Porto Alegre, 26 de Junho de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, pelo apoio incondicional e pelo carinho durante todo o período de graduação.

Agradeço ao professor Francis Henrique Ramos França por sua orientação, pelas boas ideias e pelos ensinamentos transmitidos durante a realização do trabalho.

Agradeço à Larissa Domingues Lemos, doutoranda no PROMEC, por toda a contribuição para o desenvolvimento do trabalho e pela ímpar prestatividade.

Agradeço aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica pelos conhecimentos passados durante a graduação.

HELDER, V. G. **Análise Transiente do Aquecimento em Fornos com Diferentes Geometrias de Filamentos Aquecedores**. 2018. 24. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

Uma característica bastante desejada em fornos é a uniformidade de aquecimento. Tal aspecto é obtido através de uma distribuição uniforme do fluxo de calor na peça submetida ao aquecimento. Considerando-se um forno retangular tridimensional, com um filamento aquecedor na superfície superior, buscou-se minimizar a maior diferença de temperatura atingida na superfície inferior durante o processo de aquecimento. Sendo a forma e a disposição do aquecedor parâmetros essenciais em relação à distribuição de temperatura no interior do forno, fez-se a aplicação de uma metodologia de análise inversa, através do algoritmo da otimização extrema generalizada (GEO), visando à obtenção de uma nova geometria de filamento aquecedor que proporcionasse um aquecimento mais uniforme. O método das radiosidades foi empregado para o cálculo do fluxo radiante em todas as faces do sistema, o qual foi considerado como não tendo um meio participante em seu interior, sendo também desprezados os efeitos de convecção. O novo filamento gerado foi submetido a comparações, através de simulação computacional, com o primeiro filamento aquecedor, nas quais foi possível identificar que ocorreu uma redução na máxima diferença de temperatura de 0,0512 para 0,0229 (valores adimensionais) com a utilização do novo aquecedor. Também foi realizada uma comparação entre o forno com o filamento novo partindo da temperatura ambiente, e o forno com o primeiro filamento partindo da temperatura de operação. Esse teste foi realizado com a finalidade de analisar a distribuição de temperatura gerada pelo novo filamento em uma condição sem preaquecimento, frente a um forno preaquecido. Nessa situação, as simulações apresentaram valores próximos em termos de amplitude máxima de temperatura, sendo 0,0283 para o forno com preaquecimento e 0,0229 para o forno com o novo filamento.

PALAVRAS-CHAVE: análise inversa, distribuição de temperatura uniforme, filamento aquecedor.

HELDER, V. G. **Transient Analysis of Heating in Ovens with Different Filament Geometries Heaters**. 2018. 24. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

A very desirable characteristic in ovens is the heating uniformity. Such aspect is obtained by a uniform distribution of heat flow in the piece subjected to the heating. Considering a three-dimensional rectangular oven, with a heater filament on the top surface, it was sought to minimize the greatest amplitude of temperature difference reached on the bottom surface during the heating process. Since the shape and the layout of the heater are essential parameters in relation to the temperature distribution inside the oven, an inverse analysis methodology was applied through the generalized extreme optimization (GEO) algorithm, aiming at obtaining a new heater filament format, that would provide a more uniform heating. The radiosity method was used to calculate the radiant flux in all the faces of the system, which was considered as having no participant medium in its interior, and the convection effects were also neglected. The new generated filament was submitted to comparisons, through computer simulation, against the first heater filament, in which was possible to identify that occurred a reduction of the maximum temperature difference from 0,0512 to 0,0229 (dimensionless values) with the use of the new filament heater. A comparison was also made between the oven starting at room temperature with the new filament, against the oven starting at operation temperature with the first filament. That test was performed with the purpose of analyzing the temperature distribution generated by the new filament in a condition without preheating, in front of a preheated oven. In this situation, the simulations presented close values in terms of maximum temperature range, with 0,0283 for the preheated oven and 0,0229 for the oven with the new filament.

KEYWORDS: inverse analysis, uniform temperature distribution, filament heater.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
4. METODOLOGIA.....	2
4.1. Geometria.....	3
4.2. Balanço de energia.....	4
4.3. Condução e balanço térmico.....	6
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	7
5.1. Novo filamento aquecedor	7
5.2. Forno preaquecido.....	11
5.3. Comparação do fluxo de calor	13
6. CONCLUSÕES.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Representação da cavidade radiante, com destaque para a superfície de projeto [Lemos, 2015].	3
Figura 4.2 – Esquema do quarto da cavidade simulada, dividida em elementos de área, com a superfície de projeto em destaque.	4
Figura 4.3 – Balanço energético em uma superfície, com fronteira no interior do volume de controle.	5
Figura 4.4 – Balanço energético em uma superfície, com fronteira exterior ao volume de controle.	5
Figura 5.1 – Disposição do filamento $F_{q,e}$. Em azul está representada a superfície de projeto, enquanto os elementos em vermelho representam as posições onde existem aquecedores.	8
Figura 5.2 – Disposição do filamento $F_{T,t}$ obtido pelo método GEO. A cor azul indica a superfície de projeto, vermelho quando há um elemento aquecedor e amarelo quando há dois ou mais, sendo associado o respectivo número de elementos.	8
Figura 5.3 – Máximas diferenças de temperatura obtidas pelo filamentos $F_{q,e}$ e $F_{T,t}$ na superfície de projeto.	9
Figura 5.4 – Distribuição da temperatura na superfície de projeto ao final da simulação, obtida com o filamento $F_{q,e}$.	10
Figura 5.5 – Distribuição da temperatura na superfície de projeto ao final da simulação, obtida com o filamento $F_{T,t}$.	10
Figura 5.6 – Perfil do desenvolvimento da temperatura média na superfície de projeto com o filamento $F_{q,e}$, para o forno preaquecido e não preaquecido.	11
Figura 5.7 – Perfil do desenvolvimento da temperatura média das paredes do forno preaquecido com filamento $F_{q,e}$.	12
Figura 5.8 – Máximas diferenças de temperaturas atingidas na superfície de projeto pelo filamento $F_{T,t}$ e pelo filamento $F_{q,e}$ sem e com preaquecimento.	12
Figura 5.9 – Distribuição do fluxo de calor na superfície de projeto gerado com o filamento $F_{q,e}$.	13
Figura 5.10 – Distribuição do fluxo de calor na superfície de projeto gerado com o filamento $F_{T,t}$.	14

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área, m ²
C_d	Capacidade térmica, J/(kg.K)
C_{cd}	Termo adimensional de condução
dT	Incremento de temperatura, K
dT^*	Incremento de temperatura adimensional
dt	Incremento de tempo, s
dt	Incremento de tempo adimensional
\dot{E}	Energia por unidade de tempo, J/s
$e_{b,j}$	Poder emissivo de um corpo negro, W/m ²
e_j	Emissão de uma superfície j , W/m ²
F_{j-k}	Fator de forma
F_{obj}	Função objetivo
$F_{q,e}$	Filamento aquecedor gerado para fluxo uniforme
$F_{T,t}$	Filamento aquecedor gerado para redução da diferença de temperatura
H	Altura adimensional
k_d	Condutividade térmica, W/(m.K)
L	Comprimento adimensional
P	Profundidade adimensional
Q_{cd}	Troca de calor condutiva, W
q_i	Irradiação, W/m ²
$q_{i,a}$	Radiação térmica absorvida, W/m ²
$q_{i,a,j}$	Absorção em uma superfície j , W/m ²
$q_{i,j}$	Radiação incidente em uma superfície j , W/m ²
$q_{i,r}$	Radiação térmica refletida, W/m ²
$q_{i,t}$	Radiação térmica transmitida, W/m ²
$q_{o,j}$	Radiosidade em uma superfície j , W/m ²

$q_{r,j}$	Fluxo radiante em uma superfície j , W/m ²
q_{prescr}	Fluxo de calor prescrito, W/m ²
q^*	Fluxo de calor adimensional
t	Tempo, s
t^*	Tempo adimensional
T_0	Temperatura ambiente, K
T_j	Temperatura dos elementos vizinhos, K
T_{prescr}	Temperatura prescrita, K
T^*	Temperatura adimensional
$T^*_{max,jd}$	Temperatura máxima adimensional na superfície de projeto
$T^*_{min,jd}$	Temperatura mínima adimensional na superfície de projeto
V	Volume, m ³
ΔT	Diferença de temperatura, K
ΔT^*	Diferença de temperatura adimensional
Δx	Distância entre centros de dois elementos adjacentes, m
α	Absortividade
ε	Emissividade
ε_d	Emissividade da superfície de projeto
ε_h	Emissividade dos aquecedores
ε_w	Emissividade das paredes
ρ	Refletividade
ρ_d	Massa específica, kg/m ³
σ	Constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
τ	Transmissividade
ψ	Fator de tempo, s

1. INTRODUÇÃO

Fornos representam importantes sistemas na indústria e também na vida cotidiana. São responsáveis por proporcionar o aquecimento dos mais diversos objetos e alimentos até temperaturas elevadas em um ambiente fechado e, na medida do possível, isolado. Assim, permitem que praticamente todo o calor gerado permaneça em seu interior, reduzindo-se perdas para o ambiente exterior.

Um aspecto importante no que diz respeito à utilização de um forno é o seu processo de preaquecimento, ou seja, desde o momento em que ele é ligado, até atingir uma determinada distribuição de temperatura de equilíbrio no seu interior, conforme o objeto que será aquecido. Esse é um processo que por vezes pode ser demorado; em se tratando de uma escala industrial, onde as dimensões dos fornos são consideravelmente maiores que os domésticos, o preaquecimento pode representar um significativo gasto de energia e tempo com um processo onde o forno não está sendo efetivamente aproveitado. A maneira como ocorre o aquecimento está intrinsicamente ligada à forma do aquecedor, assim, torna-se interessante a busca por uma geometria de aquecedor que proporcione o aquecimento mais uniforme possível, ou seja, com menor variação de temperatura entre os diferentes pontos do interior do forno em cada instante de tempo.

Partindo dessa premissa, foi proposta a simulação de um forno como uma cavidade radiante tridimensional, com um filamento aquecedor na superfície superior e uma superfície de projeto na superfície inferior, sendo sua geometria obtida de Lemos, 2015. Nesse contexto, fez-se a aplicação do método estocástico da otimização extrema generalizada (*generalized extreme optimization* – GEO), com o intuito de se obter um formato de filamento aquecedor que proporcionasse uma redução da variação máxima de temperatura entre dois pontos da superfície de projeto durante o aquecimento. Devido à natureza do trabalho, no sentido em que se busca a obtenção de um parâmetro de entrada, que é o posicionamento dos aquecedores, em função de um parâmetro de saída, a temperatura uniforme, a metodologia empregada pode ser caracterizada como análise inversa.

A análise dos resultados gerados é feita comparando-se o comportamento da temperatura na superfície de projeto, bem como o fluxo de calor do filamento originalmente proposto com o filamento gerado através da análise inversa.

2. OBJETIVOS

O principal objetivo do trabalho consiste em minimizar a máxima diferença de temperatura atingida na superfície inferior de um forno durante o processo de aquecimento. Nesse sentido, a proposta é gerar um formato de filamento aquecedor que possibilite a obtenção dessa condição. A diferença entre a maior e a menor temperatura atingidas pelo sistema em um mesmo instante de tempo é a definição da função objetivo do problema. Nesse contexto, tomar-se-á como base um filamento inicial, o qual será submetido a um método estocástico para determinar as alterações a nele serem feitas, no intuito de reduzir a função objetivo.

Em certos casos, o preaquecimento é necessário pelo fato dos fornos, em geral, apresentarem diferenças de temperatura significativas em seu interior, desde o momento em que são acionados, até atingirem uma condição de regime permanente. Isso significa que um objeto colocado dentro de um forno desde o instante inicial do processo, sofreria com temperaturas díspares em diferentes regiões do forno, provocando assim um aquecimento desigual.

A redução da variação de temperatura visa a gerar um aquecimento mais uniforme, assim, em determinadas situações, como a fabricação de componentes eletrônicos, em que segundo Arkhipov *et al.*, 2014, o principal objetivo do preaquecimento é gerar uma distribuição de temperatura uniforme, se torna interessante a aplicação de um sistema que proporcione essa característica sem preaquecimento.

Uma maior uniformidade de aquecimento busca permitir uma redução no tempo em que o forno permaneceria em funcionamento, e assim, conseqüentemente, deve proporcionar um menor gasto com energia.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em França e Howell, 2006, é aplicada uma metodologia de análise inversa para se obter a quantidade de calor liberado um aquecedor, localizado no topo de uma cavidade tridimensional, que proporcione uma curva de temperatura prescrita na superfície de projeto na base da cavidade. O processo proposto é governado por trocas radiantes entre superfícies cinzas e difusas. A análise foi realizada em regime transiente, levando à uma solução para cada instante de tempo do processo.

Em Navaneethakrishnan *et al.*, 2009, buscou-se, através de métodos numéricos e experimentais, proporcionar um aquecimento em fornos alimentícios com mínimas variações de temperatura, sendo analisados diferentes posicionamentos dos aquecedores. Os resultados levaram a uma temperatura mais uniforme aliada a um menor consumo de energia.

Em Cassol, 2009, foi analisado o problema de se determinar a posição e o poder luminoso das lâmpadas em projetos de iluminação de interiores. Nesse sentido, tal situação foi modelada como um problema de análise inversa, sendo aplicado o método estocástico de busca global otimização extrema generalizada (GEO). A metodologia, que foi aplicada em uma cavidade retangular tridimensional, levou à possibilidade de parametrização do posicionamento das fontes de luz.

Em Lemos, 2015, fez-se um estudo utilizando o conceito de análise inversa, através do método GEO, para determinar a melhor configuração de elementos aquecedores para proporcionar um fluxo uniforme de calor para o interior do forno. Nesse trabalho, o forno foi modelado como uma cavidade tridimensional preenchida com um meio não participante, foi assumido que as paredes eram cinzas e difusas, e o único meio de transferência de calor analisado era a radiação térmica. A solução foi obtida usando-se um quarto da cavidade, no intuito de dinamizar as simulações, mantendo a simetria do problema.

No artigo de Lemos *et al.*, 2016, foi realizado um estudo sobre o processo de aquecimento em fornos de filamento, tendo como parâmetros prescritos fluxo de calor e temperatura uniforme em uma das superfícies da cavidade radiante. O formato e o posicionamento dos filamentos aquecedores foram obtidos pela aplicação do método de otimização GEO, configurando, portanto, um problema de análise inversa.

No trabalho realizado por Carlos, 2016, foi utilizado o método das radiosidades para calcular o fluxo radiante em todas as faces de um sistema tratado como cavidade radiante com meio não participante. Foi avaliado o desenvolvimento do processo de aquecimento da cavidade com a variação dos parâmetros de condutividade térmica na superfície de projeto e de capacidade térmica das paredes.

4. METODOLOGIA

O presente trabalho tem como base analisar o comportamento da transferência de calor de um filamento aquecedor em um ambiente fechado; assim, o estudo em questão foi tratado como um problema de cavidade radiante. O cálculo da radiação térmica foi baseado no método das radiosidades, que leva em consideração fatores de forma entre as superfícies do interior da cavidade, pois a transferência de radiação no sistema é altamente influenciada pela geometria do ambiente. Cada elemento de área emite radiação e também absorve dos demais, o que pode ser equacionado através do balanço de energia para cada superfície do sistema. A geometria da cavidade, que representa um forno de aquecimento por filamento, é detalhada na Seção 4.1.

Sendo um problema de análise inversa, o desenvolvimento do filamento aquecedor será guiado por um parâmetro de saída, que é a redução da máxima

diferença de temperatura na superfície de projeto, também definida como a função objetivo do problema. Para essa situação, foi adaptado um código, na linguagem de programação *Fortran*, baseado no método estocástico da otimização extrema generalizada (GEO), proposto por Sousa *et al.*, 2003. Nesse contexto, para cada elemento de área (bit) que compõe o filamento aquecedor, é associado um número de adaptabilidade, que é a probabilidade do bit gerar um ganho ou perda à função objetivo. Dessa forma, em cada iteração, um bit sofre uma perturbação, deslocando-se uma unidade, que não é necessariamente melhor no ponto de vista de reduzir a função objetivo, mas devido à adaptabilidade atribuída, as chances disso acontecer são maiores. Esse processo é repetido um número determinado de vezes, e ao final da simulação, tem-se um novo formato de filamento. Foi imposto ao sistema que nenhum bit assumira uma posição na qual um elemento aquecedor possa ficar isolado; assim não há aquecedores pontuais, sendo mantida a característica de filamento.

O trabalho foi desenvolvido sob a perspectiva de parâmetros adimensionais, a fim de generalizar a situação proposta, proporcionando maior flexibilidade na interpretação dos resultados, pois favorece a comparação com sistemas reais.

4.1. Geometria

A geometria que representa o forno é composta por uma superfície superior, onde há o filamento aquecedor, uma superfície inferior, onde se encontra a superfície de projeto, e quatro paredes laterais, como representado pela Figura 4.1. A largura da cavidade foi definida como a maior dimensão L , com o valor adimensional de 1, servindo como referência para as outras dimensões, que são a profundidade, igual à 0,8 ($P/L = 0,8$), e a altura, valendo 0,2 ($H/L = 0,2$). A cavidade foi dividida em elementos menores, ficando a largura seccionada em 30 partes iguais. Mantendo-se a proporção, a profundidade ficou dividida em 24 e a altura em 6 elementos. Afim de se reduzir o tempo de processamento durante as simulações, foi considerado apenas um quarto do volume da cavidade, resultando em uma malha de $15 \times 12 \times 6$, o que não invalida os resultados, visto que é mantida a simetria do problema. Um esquema do quarto da cavidade é mostrado na Figura 4.2.

Foi adotada a consideração de que as paredes são isoladas. Dessa forma, apenas elementos da superfície inferior apresentam troca térmica com o exterior, que poderia ser o próprio interior de uma peça, caso esta possua uma espessura significativa. Para minimizar o efeito das paredes isoladas, a superfície de projeto não representa toda a área inferior, sendo ela recuada em três elementos de distância das paredes. O fluido presente no interior da cavidade foi considerado não participante, sendo desprezados efeitos relativos à convecção.

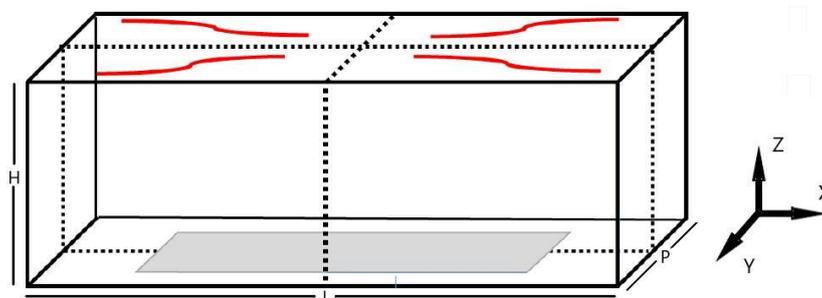


Figura 4.1 – Representação da cavidade radiante, com destaque para a superfície de projeto [Lemos, 2015].

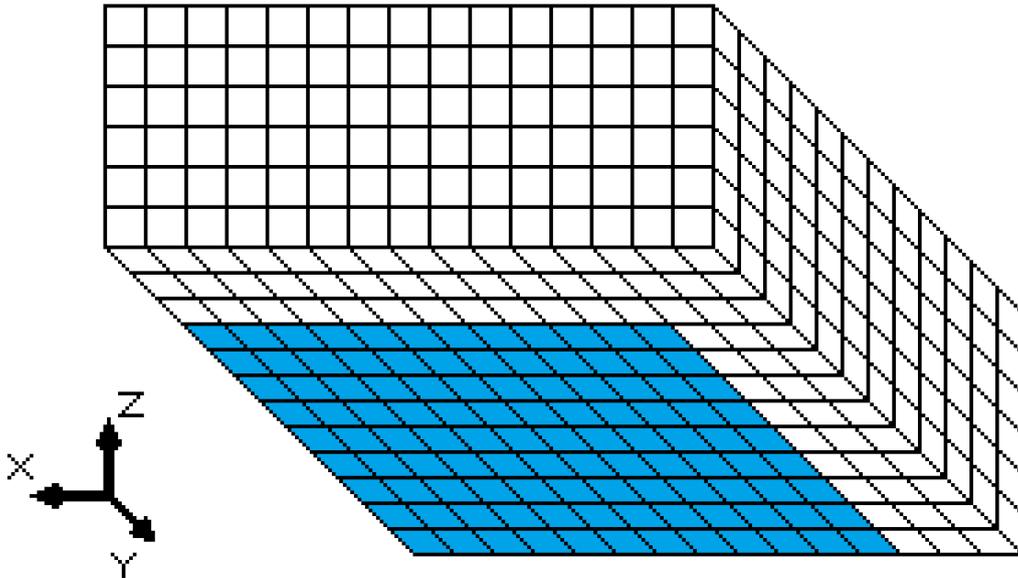


Figura 4.2 – Esquema do quarto da cavidade simulada, dividida em elementos de área, com a superfície de projeto em destaque.

4.2. Balanço de energia

O principal meio de transferência de calor envolvido no contexto do trabalho trata-se da radiação, nesse sentido, segundo Incropera *et al.*, 2008, o balanço de energia da radiação térmica incidente em uma superfície, a irradiação q_i , leva em conta as radiações térmicas absorvida $q_{i,a}$, refletida $q_{i,r}$, e transmitida $q_{i,t}$, conforme é demonstrado na Eq. (4.1).

$$q_i = q_{i,a} + q_{i,r} + q_{i,t} \quad (4.1)$$

Uma superfície dita cinza possui a característica de apresentar a absorvidade e a emissividade independentes do comprimento de onda nas regiões espectrais da irradiação e da emissão superficial. Em uma superfície difusa, as intensidades de radiação emitida e refletida são independentes da direção. Para fins de engenharia, é muitas vezes razoável tratar uma superfície como cinza e difusa, e isto implica na consideração de que a absorvidade é igual a emissividade ($\alpha = \epsilon$). Também foi adotada a hipótese de superfície opaca. Dessa forma, a transmissividade é nula ($\tau = 0$). Consequentemente, a propriedade da refletividade ρ pode ser obtida a partir da emissividade ϵ , como mostra a equação abaixo:

$$\rho = 1 - \epsilon \quad (4.2)$$

O problema em questão envolve trocas radiantes entre superfícies, dessa forma, é necessário que se faça um balanço energético entre as mesmas. Considerando que a quantidade total de energia durante o processo permanece constante, o balanço de energia pode ser feito tratando-se o sistema como um volume de controle.

Em uma primeira abordagem para a resolução do balanço de energia, foi considerado um volume de controle com a fronteira no interior da superfície, como mostrado esquematicamente na Figura 4.3. Dessa forma, o fluxo de calor radiante na superfície j , $q_{r,j}$ (W/m^2), pode ser dado pela diferença entre emissão e_j (W/m^2) e absorção $q_{i,a,j}$ (W/m^2), conforme a Eq. (4.3).

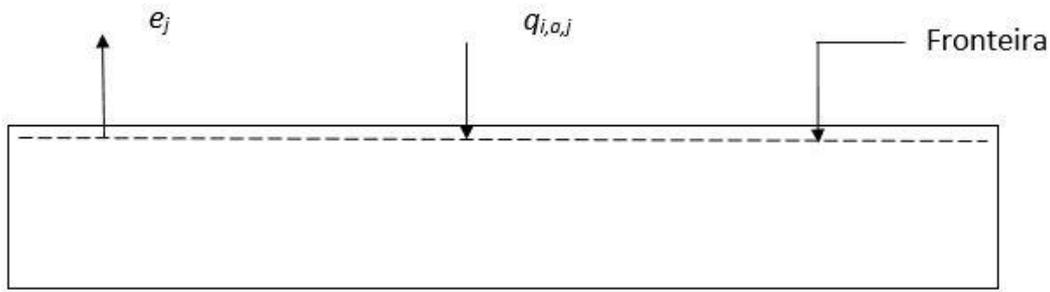


Figura 4.3 – Balanço energético em uma superfície, com fronteira no interior do volume de controle.

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

A equação anterior também pode ser representada em termos de emissividade e absorvidade. Assim, levando-se em consideração a adoção de superfícies cinzas e difusas, obtêm-se a Eq. (4.4).

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

Ao considerar o volume de controle imediatamente acima da superfície, como demonstrado na Figura 4.4, tem-se que o fluxo de calor radiante $q_{r,j}$ (W/m^2) é dado pela diferença entre radiosidade $q_{o,j}$ (W/m^2) e a radiação incidente $q_{i,j}$ (W/m^2) como mostra a Eq. (4.5).

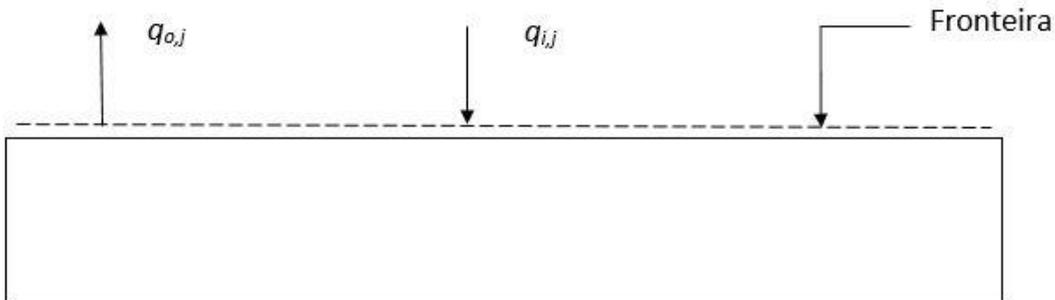


Figura 4.4 – Balanço energético em uma superfície, com fronteira exterior ao volume de controle.

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

Combinando-se as equações (4.4) e (4.5), obtêm-se para a radiosidade a Eq. (4.6).

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

O método das radiosidades baseia-se no balanço de energia em cada elemento de área que compõe a cavidade. Nesse sentido, a taxa de calor radiante incidente em uma superfície j , $q_{i,j}$ (W/m^2) pode ser representada pela Eq. (4.7).

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

Em que F_{j-k} é o fator de forma entre duas superfícies.

Combinando-se as equações (4.5), (4.6) e (4.7), pode-se obter as duas equações para a solução do problema de cavidade radiante, uma considerando o fluxo de calor especificado, e a outra com a temperatura prescrita. Na situação em que o fluxo de calor $q_{r,j}$ é prescrito, a radiação pode ser obtida através da Eq. (4.8).

$$q_{0,j} = q_{r,j} + \sum_{k=1}^N F_{j-k} q_{0,k} \quad (4.8)$$

Para o caso de uma temperatura prescrita, a radiosidade é dada pela Eq. (4.9).

$$q_{0,j} = \varepsilon_j e_{b,j} + (1 - \varepsilon_j) \sum_{k=1}^N F_{j-k} q_{0,k} \quad (4.9)$$

Em que $e_{b,j} = \sigma T_j^4$ é o poder emissivo de um corpo negro, sendo σ a constante de Stefan-Boltzmann, com o valor de $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$.

4.3. Condução e balanço térmico

A condução pode ser definida como a transferência de energia entre partículas adjacentes mais energéticas para as menos energéticas, devido a interação intermolecular. Considerando o sistema como uma cavidade radiante sem meio participante, a condução pode ser entendida como a troca de calor de um elemento da parede com os elementos que o cercam. Para o presente problema, não será considerada a espessura das paredes, e será imposto que cada elemento de área possua temperatura uniforme. Diante disso, pode-se determinar a taxa de transferência de calor por condução através da seguinte equação:

$$\dot{Q}_{cd} = k_d A \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \quad (4.10)$$

em que k_d (W/(m.K)) é a condutividade térmica, A (m²) é a área superficial, Δx (m) é a distância entre centros de dois elementos adjacentes e ΔT (K) a diferença de temperatura.

Para atingir uma condição de equilíbrio térmico, o interior da cavidade deve apresentar algum termo de troca de calor com o exterior. Nesse sentido, os elementos que compõe a superfície de projeto representam os únicos pontos que realizam essa troca, permanecendo as paredes isoladas. O balanço energético relativo às quantidades de calor que entram e saem do sistema pode ser dado pela equação abaixo:

$$\rho_d V C_d \left(\frac{dT}{dt} \right) = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} \quad (4.11)$$

sendo ρ_d (kg/m³) a massa específica do material, V (m³) o volume do corpo, C_d (J/(kg.K)) a capacidade térmica, dT (K) o incremento de temperatura, dt (s) o incremento de tempo transcorrido e \dot{E} (J/s) a energia por unidade de tempo.

Explicitando os termos à direita da igualdade na equação (4.11), obtêm-se as taxas de energia no corpo, conforme demonstrado pela Eq. (4.12).

$$\rho_d \Delta x A C_d \left(\frac{dT}{dt} \right) = - \frac{k_d A}{\Delta x} \left(4T - \sum_{j=1}^4 T_j \right) - A q_{r,i}'' - \frac{A q_{prescr}''}{(T_{prescr} - T_0)} (T - T_0) \quad (4.12)$$

Na qual T_j (K) é a temperatura nos elementos vizinhos e o termo $q_{prescr}''/(T_{prescr} - T_0)$ representa o coeficiente de perda de calor na superfície de projeto, sendo que uma vez que a temperatura atinge o valor prescrito, as taxas de calor que entram e saem do sistema se igualam.

Para tornar a equação adimensional, tomou-se como parâmetro principal a temperatura prescrita, dessa forma foram obtidas as Eq. (4.13) e Eq. (4.14).

$$T^* = \frac{T}{T_{prescr}} \quad (4.13)$$

$$q^* = \frac{q}{\sigma T_{prescr}^4} \quad (4.14)$$

Outras duas variáveis foram criadas para condensar o número de termos, conforme as equações abaixo:

$$\psi = \frac{\rho_d C_d \Delta x}{\sigma T_{prescr}^3} \quad (4.15)$$

$$C_{cd} = \frac{k_d}{\sigma \Delta x T_{prescr}^3} \quad (4.16)$$

sendo ψ (s) um fator usado para tornar a variável de tempo adimensional, conforme a expressão $t^* = t/\psi$, e C_{cd} uma variável adimensional que condensa os termos envolvidos na condução.

A partir da equação (4.12), pode-se reformulá-la com o auxílio das equações (4.15) e (4.16) para a obtenção da forma adimensional do balanço de energia na superfície de projeto, conforme a expressão abaixo:

$$\frac{dT^*}{dt^*} = -C_{cd} \left(4T^* - \sum_{j=1}^4 T_j^* \right) - q_{r,i}^* - \frac{q_{prescr}^*}{1 - T_0^*} (T^* - T_0^*) \quad (4.17)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a realização das simulações, foi adotada uma temperatura prescrita para a superfície de projeto como sendo $T_{prescr} = 673$ K, e o fluxo de calor do filamento como $q_{prescr} = -3,22 \times 10^3$ W/m², valores típicos de processos de aquecimento. Tais dados foram adimensionalizados em relação à temperatura prescrita, como mostram as equações (4.13) e (4.14); assim, tem-se que $T^* = 1$ e $q^* = -0,277$. Para a superfície de projeto, paredes e aquecedores, foram adotados, respectivamente, os seguintes valores de emissividade, $\epsilon_d = 0,9$, $\epsilon_w = 0,9$, $\epsilon_h = 0,5$.

O valor da irradiação dos aquecedores que compõem o filamento foi obtido multiplicando-se os valores adimensionais do fluxo de calor na superfície de projeto pelo número de bits que ela possui (cento e oito no total) e dividindo entre os vinte elementos aquecedores, resultando assim em um fluxo de -1,4958 por elemento. A temperatura inicial no interior do forno foi definida em $T_0 = 298$ K, correspondente à 25°C, assim, utilizando a equação (4.13), tem-se o valor adimensional de 0,443.

5.1. Novo filamento aquecedor

O filamento inicialmente proposto ($F_{q,e}$) é composto por vinte (20) elementos aquecedores e foi obtido por Lemos, 2015, através de análise inversa, tendo como função objetivo a uniformidade do fluxo de calor na superfície de projeto. Sua disposição pode ser conferida na Figura 5.1, na qual é representado um quarto da cavidade radiante, com a superfície de projeto na base e os elementos aquecedores na parte superior do forno.

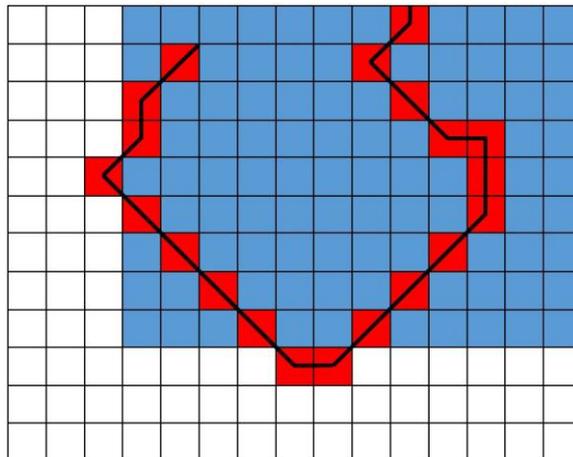


Figura 5.1 – Disposição do filamento $F_{q,e}$. Em azul está representada a superfície de projeto, enquanto os elementos em vermelho representam as posições onde existem aquecedores.

Segundo Lemos *et al.*, 2016, a forma do filamento no interior do elemento de área não é relevante para os resultados. Desse modo, cada elemento é tratado como uma fonte pontual de calor. Entretanto, devido à condição imposta de não haverem aquecedores isolados, é atribuída a característica de filamento.

Tomando-se como base o filamento $F_{q,e}$, foi imposta uma nova função objetivo para nortear o desenvolvimento do aquecedor, sendo ela a redução da maior diferença de temperatura entre dois pontos da superfície de projeto durante o aquecimento, como demonstra a Eq. (5.1).

$$F_{obj} = \sqrt{\sum_{jd} (T_{max,jd}^* - T_{min,jd}^*)^2} \quad (5.1)$$

Assim, por meio da aplicação do algoritmo GEO, foi gerada uma nova disposição dos elementos aquecedores na parte superior cavidade, configurando um filamento aquecedor ($F_{T,t}$) distinto do anterior. A configuração obtida pode ser vista na Figura 5.2, em que os elementos numerados indicam regiões com maior concentração de aquecedores.

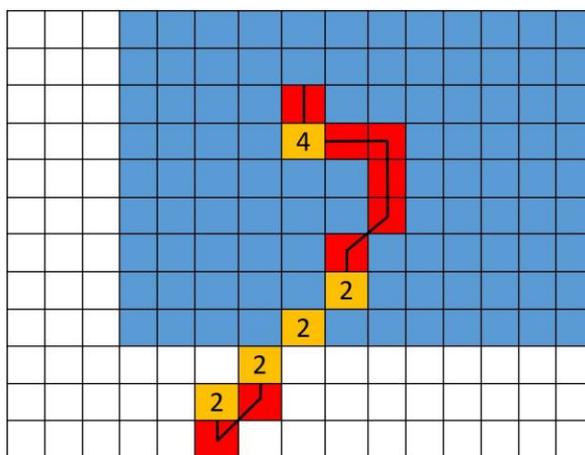


Figura 5.2 – Disposição do filamento $F_{T,t}$, obtido pelo método GEO. A cor azul indica a superfície de projeto, vermelho quando há um elemento aquecedor e amarelo quando há dois ou mais, sendo associado o respectivo número de elementos.

O fluxo de calor total emitido pelos filamentos $F_{q,e}$ e $F_{T,t}$ é um parâmetro constante. Quando um elemento de área apresenta uma concentração de aquecedores n vezes maior do que uma unidade, significa que tal elemento libera um fluxo de calor n vezes superior que o valor de fluxo base ($q^* = -1,4958$ adimensional). Dessa forma, o somatório do calor liberado por todos os elementos é o mesmo para os dois filamentos aquecedores.

De posse dos dois filamentos, foi realizada a comparação entre os mesmos. Para isso, foi proposta uma simulação de aquecimento para cada caso, também em *Fortran*, com as mesmas condições iniciais de temperatura ($T^* = 0,443$) e com o mesmo tempo de processamento ($t^* = 100000$).

O primeiro critério de comparação foi com relação à máxima diferença de temperatura (ΔT^*) atingida na superfície de projeto ao longo das simulações. Nesse sentido, a Figura 5.3 mostra esse comportamento para cada instante de tempo durante o primeiro quinto de simulação, período no qual ocorrem os valores máximos para ambos os filamentos.

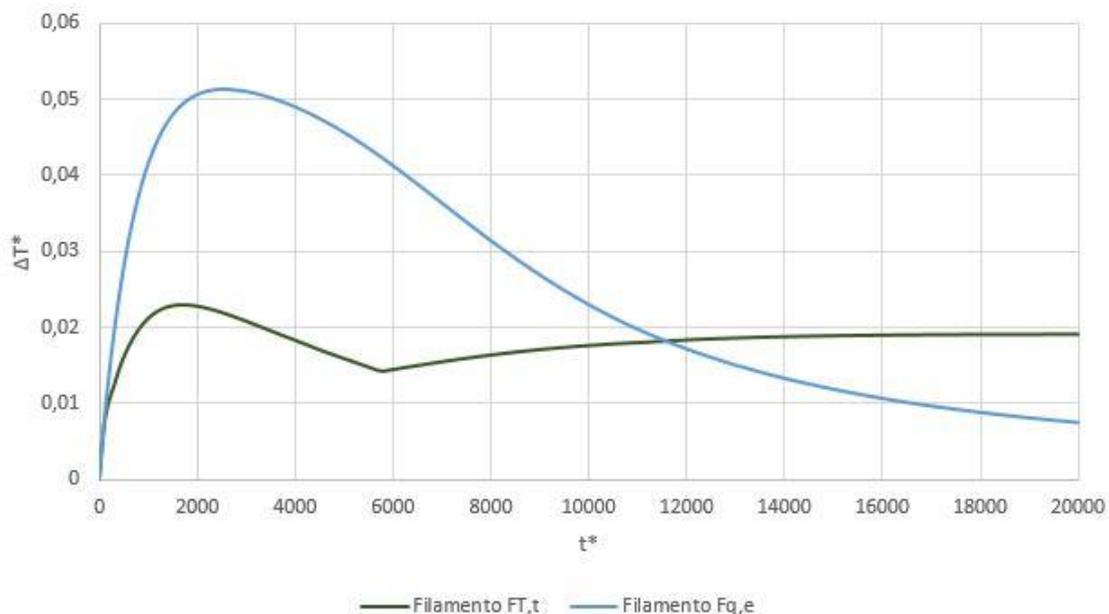


Figura 5.3 – Máximas diferenças de temperatura obtidas pelos filamentos $F_{q,e}$ e $F_{T,t}$ na superfície de projeto.

Pode-se observar que, embora o filamento $F_{T,t}$ apresente uma certa concentração de elementos aquecedores, as simulações mostraram que a amplitude máxima caiu de 0,0512 para 0,0229. Porém, conforme o tempo de simulação avança, nota-se que a diferença de temperatura decresce de maneira mais abrupta no caso do filamento $F_{q,e}$, proporcionando uma temperatura mais homogênea na superfície de projeto ao final da simulação. O comportamento apresentado pela curva de ΔT^* obtida com o filamento $F_{T,t}$ se deve principalmente ao fato de que a função que o originou objetivava a diminuição da amplitude máxima de temperatura, isto é, visava a redução de um único ponto, ao invés da redução da curva como um todo. As Figuras 5.4 e 5.5 mostram as distribuições de temperatura na superfície inferior ao final das simulações.

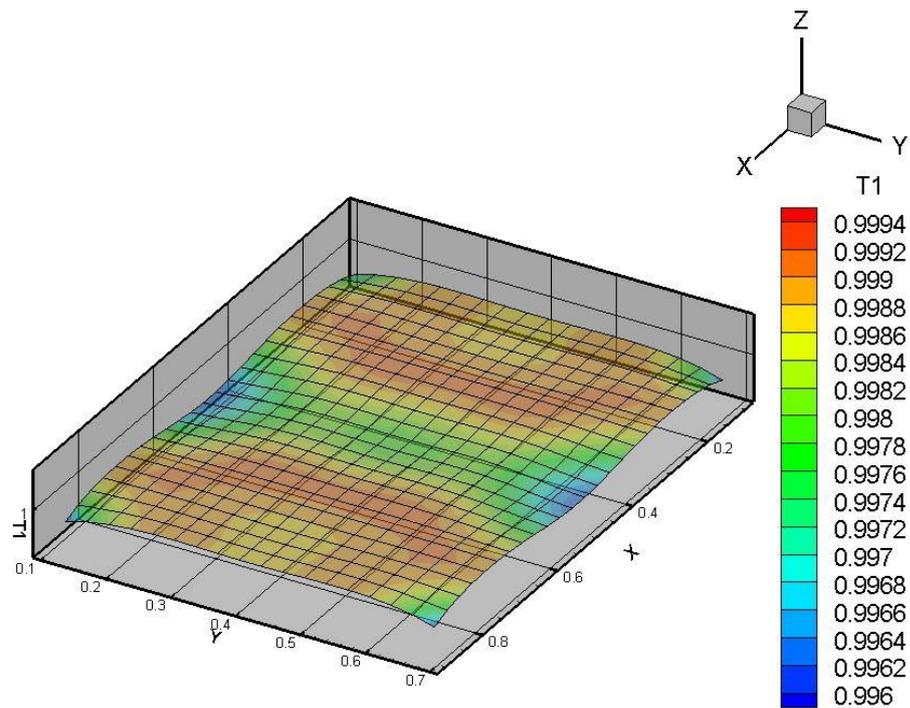


Figura 5.4 – Distribuição da temperatura na superfície de projeto ao final da simulação, obtida com o filamento $F_{q,e}$.

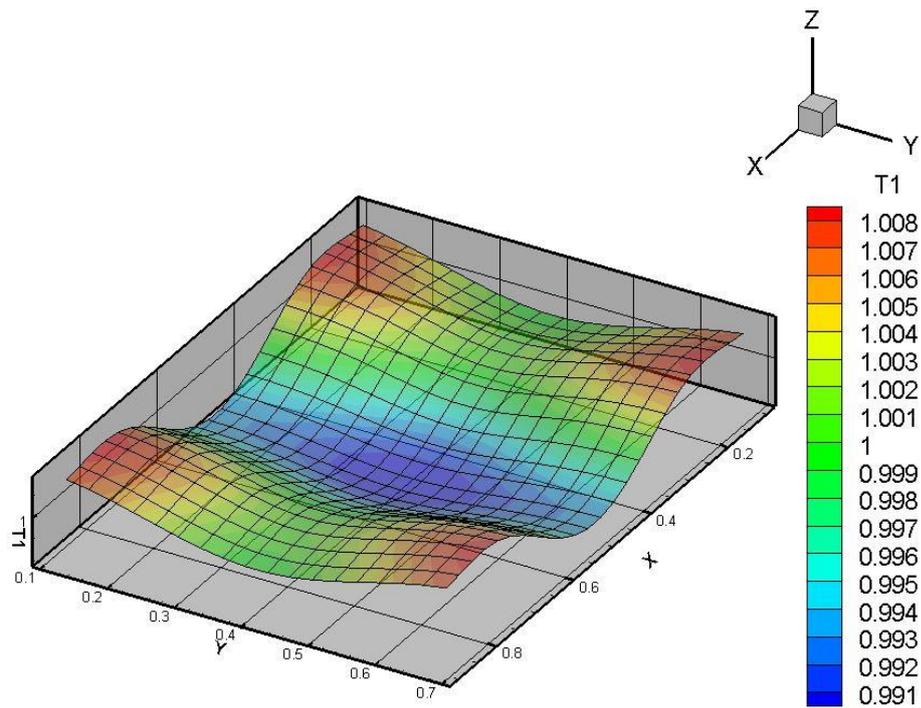


Figura 5.5 – Distribuição da temperatura na superfície de projeto ao final da simulação, obtida com o filamento $F_{T,t}$.

5.2. Forno preaquecido

A primeira análise faz uma comparação entre os dois filamentos aquecedores partindo de uma condição de temperatura ambiente, entretanto, o principal interesse é analisar o perfil do aquecimento proporcionado pelo novo filamento sem preaquecimento frente a um forno preaquecido. Diante disso, foi realizada uma nova simulação com o filamento $F_{q,e}$, desta vez considerando os elementos do interior da cavidade a uma temperatura inicial mais elevada.

A obtenção das novas temperaturas iniciais no interior do forno se deu através da simulação anterior utilizando o filamento $F_{q,e}$. Quando o código atinge o tempo máximo estipulado, isto é, quando a simulação termina, todos os elementos no interior da cavidade já se encontram em uma condição de equilíbrio, não havendo alteração nos parâmetros durante praticamente toda a segunda metade do teste. Dessa forma, pode-se inferir que o sistema atingiu uma condição de regime permanente. Assim, foram obtidas as temperaturas finais das paredes e superfícies superior e inferior (nesse caso, a parte que não corresponde a superfície de projeto), sendo que todas elas apresentaram valores bastante próximos, em média 1,053. Esse valor é ligeiramente superior ao prescrito para a superfície de projeto, $T^* = 1$, o que faz sentido, visto que esta é a única responsável por realizar trocas térmicas no sistema.

Para simular uma situação em que um objeto à temperatura ambiente é posto em um forno preaquecido, especificou-se a temperatura ambiente para a superfície de projeto, no valor adimensional de 0,443.

O forno com preaquecimento, como esperado, proporciona um desenvolvimento da temperatura média na superfície de projeto muito mais rápido, como pode ser visto na Figura 5.6.

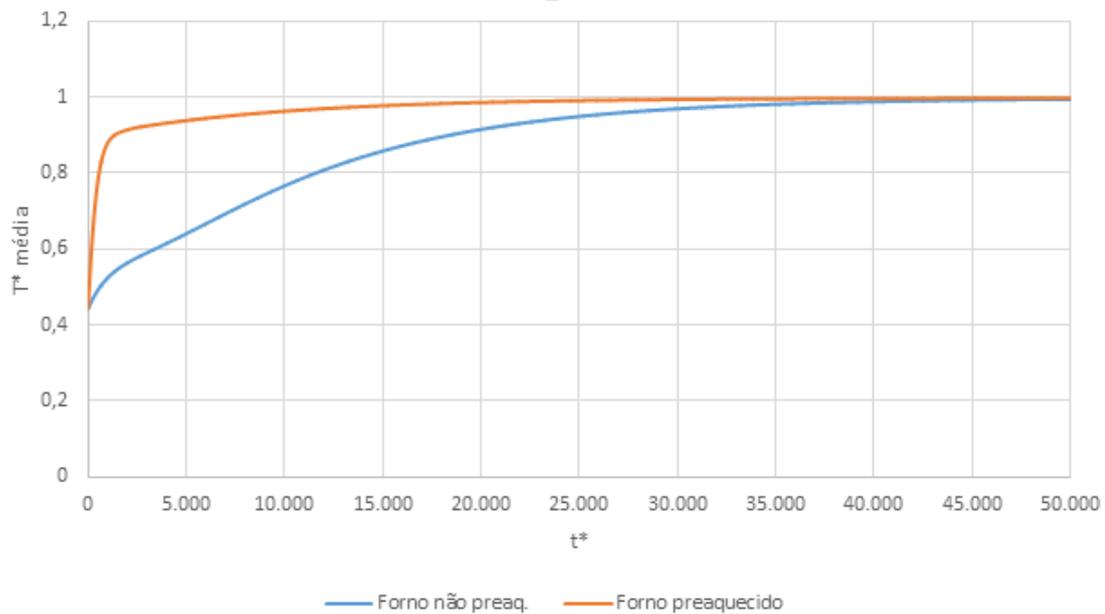


Figura 5.6 – Perfil do desenvolvimento da temperatura média na superfície de projeto com o filamento $F_{q,e}$, para o forno preaquecido e não preaquecido.

Para a simulação do forno não preaquecido, todos os elementos da cavidade apresentam um comportamento semelhante ao apresentado pela curva em azul na Figura 5.6, entretanto, para o caso do forno preaquecido, as paredes que já se encontravam quentes tiveram o comportamento conforme apresentado na Figura 5.7.

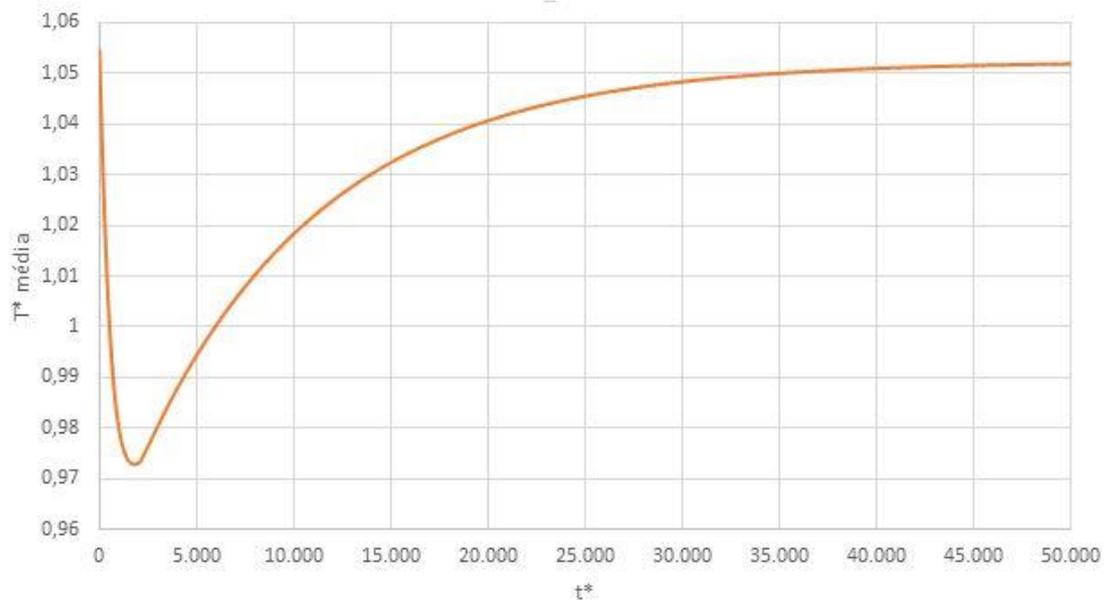


Figura 5.7 – Perfil do desenvolvimento da temperatura média das paredes do forno preaquecido com filamento $F_{q,e}$.

A característica da curva gerada faz sentido, uma vez que a parede quente, ao entrar em contato com um objeto frio, perderá calor para este em um primeiro momento, mas à medida que a peça aquece, com base na fonte de calor provida pelo aquecedor, as paredes gradativamente retornam a condição de temperatura de operação.

O forno com preaquecimento, utilizando o filamento $F_{q,e}$, também foi comparado ao forno com o filamento $F_{T,t}$ e sem preaquecimento. Nessa situação, o parâmetro de maior interesse a ser avaliado é a máxima diferença de temperatura que ocorre na superfície de projeto, que pode ser vista na Figura 5.8. A título de referência, também foi plotada a curva referente ao forno com o filamento $F_{q,e}$ sem preaquecimento.

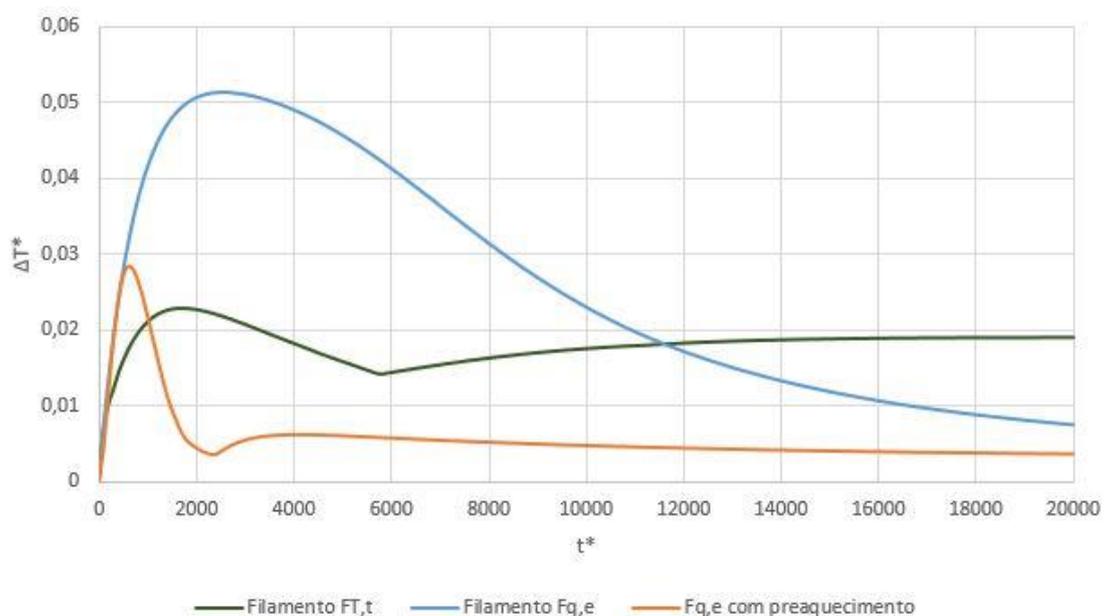


Figura 5.8 – Máximas diferenças de temperaturas atingidas na superfície de projeto pelo filamento $F_{T,t}$ e pelo filamento $F_{q,e}$ sem e com preaquecimento.

Comparando-se as curvas relativas ao forno com o filamento $F_{T,t}$ e ao preaquecido, é possível perceber que o máximo ΔT^* atingido em ambos os casos é próximo, sendo 0,0283 para o preaquecido e, como já mencionado, 0,0229 para o $F_{T,t}$. Entretanto, este último apresenta um ΔT^* menor durante um curto período, sendo que na maior parte da simulação é o forno preaquecido aquele que apresenta menores variações de temperatura.

O fato do forno preaquecido apresentar uma acentuada queda no ΔT^* deve-se justamente à condição dos demais elementos da cavidade já possuírem uma temperatura mais elevada, o que leva a uma evolução de temperatura na superfície de projeto muito mais rápida, contribuindo para que o regime estacionário seja atingido em um menor intervalo de tempo.

5.3. Comparação do fluxo de calor

É pertinente a realização de uma análise do fluxo de calor gerado pelos dois filamentos aquecedores. Assim, fez-se uma comparação entre os fluxos obtidos na superfície de projeto ao final das simulações, sendo suas distribuições mostradas nas Figuras 5.9 e 5.10. Nessa situação, percebe-se que a amplitude entre os fluxos é maior com o filamento $F_{T,t}$, e isso corrobora para que a diferença entre máxima e mínima temperatura no final da simulação também seja maior.

Também é possível destacar a forma como o fluxo se distribui na superfície, nesse sentido, o filamento $F_{q,e}$ proporciona maior uniformidade, visto que essa era justamente a finalidade da função objetivo que o gerou.

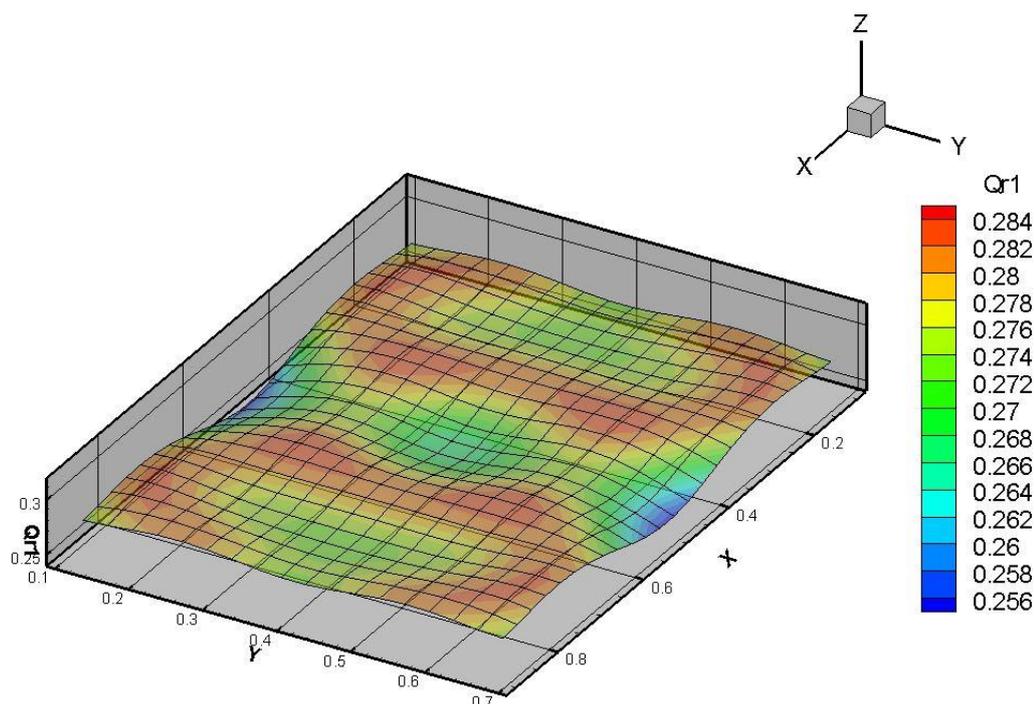


Figura 5.9 – Distribuição do fluxo de calor na superfície de projeto gerado com o filamento $F_{q,e}$.

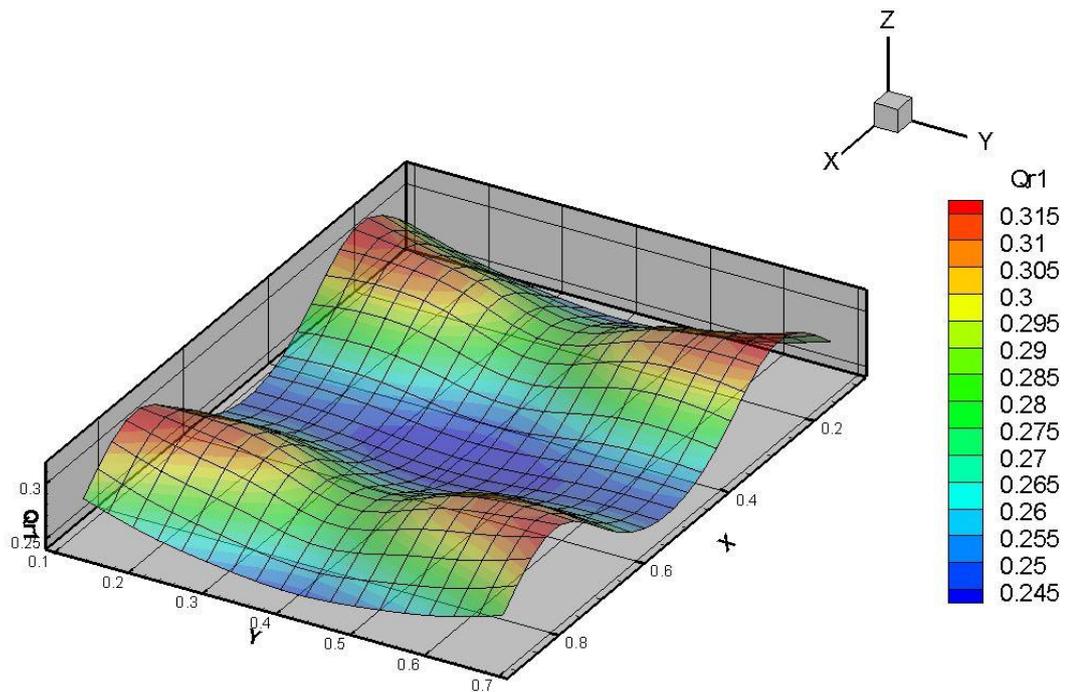


Figura 5.10 – Distribuição do fluxo de calor na superfície de projeto gerado com o filamento $F_{T,t}$.

A uniformidade do fluxo de calor pode ser quantificada ao se comparar os desvios médios e máximos apresentados em ambos os casos. Nesse sentido, a Tabela 5.1 apresenta esses valores.

Tabela 5.1 – Desvios do fluxo radioativo.

	Filamento $F_{q,e}$	Filamento $F_{T,t}$
Desvio médio [%]	1,46	7,12
Desvio máximo [%]	8,69	15,9

É interessante observar que mesmo que o filamento $F_{T,t}$ tenha gerado uma maior amplitude de fluxo e de temperatura ao final da simulação, ainda assim o ΔT^* máximo obtido durante o processo foi menor, evidenciando que há uma diferença significativa entre uma função objetivo que busque um fluxo uniforme e outra que objetive uma menor variação máxima de temperatura.

6. CONCLUSÕES

A proposta do presente trabalho consistiu na aplicação da análise inversa para, a partir de um filamento aquecedor inicialmente proposto, se obter um novo aquecedor que minimize a maior variação de temperatura (ΔT) na superfície de projeto de um forno durante o processo de aquecimento. Nesse sentido, após a realização de algumas simulações, pôde-se observar que houve uma redução significativa entre a variação máxima gerada pelos dois aquecedores, com o ΔT^* máximo passando de 0,0512 com o filamento inicial ($F_{q,e}$), para 0,0229 com o novo filamento ($F_{T,t}$). Porém, tal condição foi obtida ao custo de um aumento global na diferença de temperatura durante a maior parte do aquecimento, isto é, essa redução só ocorreu em um período de tempo próximo ao ΔT^* máximo, sendo que na maior parte da simulação, houve uma maior diferença de temperatura entre pontos da superfície de projeto com o uso do filamento $F_{T,t}$.

A principal motivação que levou à busca de um aquecedor que reduzisse a variação máxima de temperatura durante o aquecimento, tornando-o assim mais

uniforme, foi a intenção de tornar o preaquecimento desnecessário em algumas situações. Assim, fez-se a comparação entre o forno, com o filamento $F_{q,e}$, e todos os elementos de seu interior, com exceção da superfície de projeto, à uma temperatura inicial elevada, e o forno com o filamento $F_{T,t}$ e os elementos de seu interior à temperatura ambiente. Analisando-se os resultados, pôde-se perceber que a adoção do filamento $F_{T,t}$ ainda gerou uma variação máxima de temperatura ($\Delta T^*_{max} = 0,0229$) menor do que o filamento $F_{q,e}$ com preaquecimento, que atingiu um pico de 0,0283. Entretanto, essa diferença foi pouco significativa, e ocorreu em um intervalo de tempo bastante restrito, o que significa que durante a maior parte do processo o filamento $F_{q,e}$ proporciona um aquecimento mais uniforme.

A aplicação da metodologia apresentada resultou, de maneira geral, na diminuição da variação máxima de temperatura na superfície de projeto, cumprindo assim sua premissa básica. Entretanto, a implicação esperada por essa redução, não se mostrou satisfatória, pois os resultados da comparação entre um forno preaquecido e um forno partindo da temperatura ambiente usando o filamento obtido pela análise inversa, não justificam a aplicação deste último em detrimento de um aquecimento prévio, visto que houve apenas um pequeno ganho em relação ao ΔT^* máximo, ao passo que o ΔT^* em condição de regime permanente foi favorável ao forno preaquecido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARKHIPOV, A.; ZAROUNI, A.; JALLAF, M.; BAGGASH, I.; AKHMETOV, S., REVERDY, M.; POTOENIK, V. “**Light Metals 2014**”. The Minerals, Metals & Materials Society, 2014.

CARLOS, M. M. “**Análise do Aquecimento Transiente em Fornos de Filamento**”. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, 2016.

CASSOL, F. “**Aplicação da análise inversa via otimização extrema generalizada em projetos de iluminação**”. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, 2009.

FRANÇA, F. H. R.; HOWELL, J. R. “**Transient inverse design of radiative enclosures for thermal processing of materials**”. Inverse Problems in Science and Engineering, v. 14, n. 4, p. 423-436, 2006.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. “**Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**”. LTC, 6ª Edição, 2008.

LEMOS, L. D. “**Aplicação da análise inversa no projeto de fornos com aquecedores de filamento**”. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, 2015.

LEMOS, L. D.; BRITTES, R.; FRANÇA, F. H. R. “**Application of inverse analysis to determine the geometric configuration of filament heaters for uniform heating**”. International journal of Thermal Sciences, v. 105, p. 1-12, 2016.

NAVANEETHAKRISHNAN, P.; SRINIVASAN, P. S. S.; DHANDAPANI, S. “**Numerical and experimental investigation of temperature distribution inside a heating oven**”. Journal of Food Processing and Preservation, v. 34, p. 275-288, 2009.

SOUSA, F. L.; RAMOS, F. M.; PAGLIONE, P.; GIRARDI, R. M. “**New Stochastic Algorithm for Design Optimization**”. AIAA Journal, v. 41, n. 9, p. 1808-1818, 2003.