

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

Modelagem de Fornos com Aquecedores de Filamento para Aquecimento Uniforme
Utilizando o *Software* Fluent

por

Andressa Mendes Rodrigues

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 Engenharia Mecânica.

Porto Alegre, dezembro de 2015.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

Modelagem de Fornos com Aquecedores de Filamento para Aquecimento Uniforme
Utilizando o *Software* Fluent

por

Andressa Mendes Rodrigues

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

Prof. 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. Volnei Borges

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 03 de Dezembro de 2015.

*Dedico este Trabalho de Conclusão de Curso aos meus pais,
Elto Rodrigues e Vania Mendes Rodrigues e minha vó Ordária L. Bolesina Mendes.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e a minha vó, que me ensinaram princípios e valores e que nunca mediram esforços e dedicação em minha educação e formação, dando todo o suporte necessário para que eu pudesse sempre estudar, fatores decisivos para conquistar essa etapa.

Agradeço ao meu namorado Rodrigo Minozzo por todo o apoio, conselhos, dedicação, atenção, preocupação e carinho despendido desde sempre e principalmente durante essa etapa.

Agradeço aos meus amigos Luckas Rossato, Douglas Laufer Schmidt e Rodrigo Nazaroof Saran pelo apoio e conselhos sobre os *softwares* utilizados neste trabalho.

Agradeço ao meu orientador, professor Francis Henrique Ramos França, pela atenção, dedicação, conselhos, por sempre acreditar que eu poderia fazer mais e melhor, por todo tempo empregado durante a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso, enfim por ter exercido de maneira exemplar o papel de um ótimo orientador.

Agradeço à Larissa Domingues Lemos, pelo suporte, dicas, disponibilização de materiais, atenção e pela preocupação demonstrada para a realização de um bom trabalho.

Agradeço de forma geral a todos que contribuíram direta ou indiretamente na minha formação de Engenheira Mecânica.

Rodrigues, M. A. Modelagem de Fornos com Aquecedores de Filamento para Aquecimento Uniforme Utilizando o *Software* Fluent. 2015. 24. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

Fornos são empregados na transformação de materiais e, na indústria metal mecânica são utilizados principalmente em processos de tratamento térmico, fornecendo ao material as propriedades desejadas. Este trabalho faz uso de análise computacional, através do *software* comercial *ANSYS Fluent 14.0*, para simular diversas geometrias e posições de filamentos aquecedores na parede superior de um forno tratado como cavidade radiante com superfícies cinzas e difusas, visando a uniformidade do fluxo de calor radiante na superfície inferior, chamada de superfície de projeto. O objetivo é validar a metodologia, proposta por Lemos, 2015, no qual fez uso de análise inversa e emprego de algoritmo GEO para encontrar a geometria e posição de filamentos aquecedores que fornecem fluxo de calor uniforme na superfície de projeto. Os resultados obtidos foram satisfatórios, mostrando uma diminuição de 92,5% entre o desvio máximo da solução de um filamento com geometria intuitiva e outro obtido através da metodologia proposta.

PALAVRAS-CHAVE: fornos, análise computacional, filamentos aquecedores, cavidade radiante.

Rodrigues, M. A. Ovens modeling with filament heaters for heating Uniform Using Fluent Software. 2015. 24. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

Furnaces are used to process various types of materials and in the mechanical industry are mainly used in the heat treatment process, giving the material the desired properties. This work uses computer analysis applying the commercial software *ANSYS Fluent 14.0* to simulate various geometries and positions of the heater filament in the top wall of an furnace treated as radiant cavity with diffuse-gray surfaces, in order to obtain uniform radiant heat flux at the lower surface, called design surface. The objective is validate the methodology proposed by Lemos, 2015, which made use of inverse analysis and use GEO algorithm to find the geometry and position of the heater filaments that provide uniform heat flux on design surface. The results obtained were satisfactory, showing a decrease of 92.5% between the maximum deviation of the solution of a filament with an intuitive geometry and the one obtained by the proposed method.

KEYWORDS: oven, computer analysis, heating filaments, radiant cavity.

Sumário

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
4.1. A DISTRIBUIÇÃO DE PLANCK E A LEI DE STEFAN-BOLTZMANN	2
4.2. EMISSIVIDADE, ABSORTIVIDADE E REFLETIVIDADE.....	3
4.3. FATOR DE FORMA.....	4
4.4. BALANÇO DE ENERGIA EM UMA SUPERFÍCIE	4
4.5. MÉTODO DA RADIOSIDADE	5
4.6. SOLUÇÃO INVERSA	6
4.7. MÉTODO NUMÉRICO.....	6
4.8. MODELO DE RADIAÇÃO <i>SURFACE TO SURFACE</i>	6
5. METODOLOGIA	7
5.1. GEOMETRIA.....	7
5.2. DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO E SOLUÇÃO NUMÉRICA	8
5.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	10
5.4. CÁLCULO DO DESVIO DA SOLUÇÃO	10
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	10
6.1. FILAMENTO 1	10
6.2. FILAMENTO 2	11
6.3. FILAMENTO 3	13
7. CONCLUSÕES E DISCUSSÕES	14
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 - Processos de absorção, reflexão e transmissão associados a um meio semitransparente. (Fonte: Incropera, F. P.; 2008).....	3
Figura 4.2 - Fator de forma associado à troca de radiação entre elementos de superfícies de áreas A_i e A_j . (Fonte: Incropera, F. P.; 2008).....	4
Figura 4.3 - Balanço de energia em uma superfície considerando a fronteira no interior do volume de controle.	5
Figura 5.1 - Geometrias utilizadas: a) Geometria do primeiro filamento simulado com área superficial de 0,057 m ² ; b) Geometria do segundo filamento simulado com área superficial de 0,081 m ² ; c) Geometria do terceiro filamento simulado com área superficial de 0,058 m ² ; d) Superfície de projeto do forno com área superficial de 0,585 m ²	7
Figura 5.2 - Malhas utilizadas: a) Malha utilizada para simulação do filamento 1 e detalhamento do refinamento no aquecedor e superfície de projeto; b) Malha utilizada para simulação do filamento 2 e detalhamento do refinamento no aquecedor e superfície de projeto; c) Malha utilizada para simulação do filamento 3 e detalhamento do refinamento no aquecedor e superfície de projeto.	8
Figura 5.3 - Análise de convergência de malha para o filamento 1.	9
Figura 6.1 – Geometria do filamento 1.	10
Figura 6.2 – Distribuição de fluxo de calor radiante na superfície de projeto do forno aquecido com o filamento 1.	11
Figura 6.3 – Geometria do filamento 2.	11
Figura 6.4 - Distribuição de fluxo de calor radiante na superfície de projeto do forno aquecido com o filamento 2.	12
Figura 6.5 – Distribuição de fluxo de calor radiante, obtida por Lemos, 2015, no <i>software Fortran</i> referente à mesma geometria de filamento. (Fonte: Lemos, 2015).	12
Figura 6.6 – Geometria do filamento 3.	13
Figura 6.7 - Distribuição de fluxo de calor radiante na superfície de projeto do forno aquecido com o filamento 3.	13
Figura 6.8 - Distribuição de fluxo de calor radiante, obtida por Lemos, 2015, no <i>software Fortran</i> referente à mesma geometria de filamento. (Fonte: Lemos, 2015).	14

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Desvios relacionados à solução do filamento 1.	11
Tabela 2 - Desvios relacionados à solução do filamento 2.	12
Tabela 3 - Desvios relacionados à solução do filamento 3.	13

1. INTRODUÇÃO

Fornos são sistemas que fornecem calor gerando altas temperaturas visando a transformação de materiais, sendo amplamente utilizado em diversas aplicações, como assar, secar, cozer ou em tratamentos térmicos na indústria mecânica. Nos metais, as aplicações envolvem desde melhorar resistência, usinabilidade, soldabilidade até aliviar tensões internas. Outras aplicações bastante comuns são empregadas na cura e secagem de resinas, além de cozimentos na indústria alimentícia.

Processos de tratamento térmico modificam a estrutura dos materiais, alterando as propriedades de acordo com a finalidade desejada. Em escalas industriais, essas operações necessitam de condições altamente controladas para garantir produtos padronizados. Como exemplo, pode-se citar fornos de tratamento térmico de recozimento que necessitam temperatura e fluxos de calor com maior uniformidade possível visando o alívio homogêneo de tensões e consequente qualidade do produto final.

Desde o século XIX, com o início da construção de fornos comerciais, a tecnologia avançou muito e diversos modelos foram desenvolvidos. O constante aumento de competição na indústria cria a necessidade por produtos melhores, de menor custo, que sejam produzidos e utilizem menos energia.

Devido a evolução das técnicas de projeto e modelagem desses equipamentos, combinados ao aumento da capacidade computacional, os efeitos termodinâmicos podem ser simulados para otimização de projetos. O emprego das modernas ferramentas computacionais torna-se quase obrigatório para com relativo baixo custo fornecer bons resultados na busca pela melhoria de projeto.

2. OBJETIVOS

Fazendo uso de simulação computacional em um *software* comercial, o objetivo do presente trabalho é a validação da metodologia proposta por Lemos, 2015, que utiliza análise inversa e emprego de algoritmo GEO, um método estocástico e global, para obter a geometria e posição otimizados de filamentos aquecedores na superfície superior de um forno que forneça uniformidade de fluxo de calor na superfície inferior, chamada de superfície de projeto.

Seguindo o modelo proposto por Lemos, 2015, o forno será representado por uma cavidade retangular tridimensional, com superfícies cinzas e difusas. O meio contido no forno será considerado não participante, a exemplo do ar, e o único mecanismo de transferência de calor será a radiação térmica. Assim, as trocas radiantes ocorrem diretamente entre as superfícies. O filamento aquecedor, posicionado na superfície superior, deve fornecer fluxo de calor uniforme na superfície de projeto.

A condição de contorno imposta na superfície de projeto será de temperatura uniforme. Na superfície aquecedora, o fluxo de calor constante que sai do filamento aquecedor é prescrito, enquanto a posição dos filamentos é determinada para atender às condições na superfície de projeto.

A metodologia empregada no *software* comercial precisará reproduzir as condições e parâmetros propostos acima, verificando a qualidade da solução obtida em tal análise frente a uma ferramenta mais completa e realística.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O método tradicional para resolver o problema de um forno tratado como cavidade radiante assume uma entrada para os aquecedores usados no sistema e, em seguida, usa modelos matemáticos para verificar se as condições desejadas estão sendo aplicadas corretamente na superfície do projeto. Se se as geometrias dos aquecedores não satisfizerem os requisitos do problema, o projeto é modificado de acordo com a experiência e intuição do projetista e então a análise é repetida. Uma compreensão intuitiva de como cada aquecedor individual afeta as condições de superfície de projeto é elusivo devido à natureza complexa da troca radiante. Assim, este procedimento requer uma grande quantidade de tempo e esforço.

Além disso, enquanto a solução final pode ser aceitável, é tipicamente longe de ser ideal. Para superar esses inconvenientes, recentemente projetistas aplicaram regularização e otimização de métodos para resolver esses problemas de projeto [Safavinejad *et al.*, 2008].

Navaneethakrishnan, *et al.*, 2008 utilizaram fornos comerciais de padaria usados principalmente para manter produtos alimentícios quentes e analisaram, através de experimentos e simulação computacional, uma distribuição uniforme de temperatura e fluxo de calor. Os alimentos foram aquecidos em um forno de filamentos elétricos e as posições dos mesmos foram dispostas de maneira a reduzir a variação na distribuição de fluxo de calor e, conseqüentemente também reduzir o consumo de energia. Os resultados foram utilizados na fabricação de fornos para conservação de alimentos.

Diversos trabalhos utilizando a análise inversa na modelagem de fornos elétricos têm sido realizados pelo Laboratório de Radiação Térmica (LRT) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A exemplo de Brittes *et al.*, 2013 que utilizaram essa metodologia para obter a potência e a posição de aquecedores que fornecem temperatura e fluxo de calor constante na superfície de projeto, otimizando assim o projeto de uma cavidade radiante formada por superfícies cinzas. Os resultados obtidos mostraram que esse tipo de solução foi mais flexível e precisa do que os resultados obtidos apenas usando uma solução baseada na regularização, e menos demorado do que a solução implícita baseada unicamente em otimização.

Cassol *et al.*, 2011, realizaram o projeto de iluminação de interiores, a determinação do poder luminoso e posição das lâmpadas considerando um problema de cavidade radiante. A solução foi obtida através da aplicação da análise inversa, do método de otimização GEO e a melhor solução foi obtida com a condição de posicionamento e potência de lâmpadas variáveis.

Mossi *et al.*, 2008 consideraram um problema de fronteira inverso que envolveu transferência de calor por radiação e convecção para encontrar a distribuição de fluxo de calor necessário nos aquecedores que fornecesse distribuição de temperatura e fluxo de calor prescritos na superfície de projeto da cavidade. Diferentes casos foram apresentados, o primeiro caso apenas com transferência de calor por radiação e após foi combinado radiação e convecção.

No trabalho de Lemos *et al.*, 2015, um forno foi modelado como uma cavidade tridimensional preenchida com meio transparente, foram assumidos paredes cinzas e difusas e radiação térmica como único mecanismo de transferência de calor. A solução foi obtida através do método de solução inversa, Otimização Extrema Generalizada (GEO), um método de otimização estocástico e global, utilizado para encontrar as posições para os aquecedores respeitando a condição de formar um filamento. A metodologia foi aplicada para se obter a configuração geométrica e posição do filamento aquecedor, uma abordagem até então inédita na literatura, que levou a resultados com desvio máximo inferior a 2%. A validade desse trabalho será avaliada por meio de simulações computacionais em um *software* comercial.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Serão abordados alguns fundamentos da radiação térmica a fim de facilitar o método da radiosidade, que será usado através de um modelo numérico de radiação para solução de um forno elétrico com ar no seu interior. O forno foi aproximado como sendo uma cavidade radiante e considerada apenas a troca de calor por radiação entre as superfícies.

4.1. A DISTRIBUIÇÃO DE PLANCK E A LEI DE STEFAN-BOLTZMANN

A Distribuição de Planck estabelece através das Equações (4.1) e (4.2) a intensidade espectral e o poder emissivo espectral de um corpo negro (material idealizado com propriedades emissivas perfeitas), respectivamente.

$$I_{\lambda, cn}(\lambda, T) = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5 [\exp(\frac{hc_0}{\lambda kT}) - 1]} \quad (4.1)$$

$$E_{\lambda, cn} = \pi I_{\lambda, cn}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1]} \quad (4.2)$$

Onde $h = 6,626 \times 10^{-34}$ J.s e $k = 1,381 \times 10^{-23}$ J/K são as constantes universais de Planck e Boltzmann, respectivamente, $c_o = 2,998 \times 10^8$ m/s é a velocidade da luz no vácuo, e T é a temperatura absoluta do corpo negro (K), $C_1 = 2\pi h C_o^2 = 3,742 \times 10^8$ W. $\mu\text{m}^4/\text{m}^2$ e $C_2 = h C_o/k = 1,439 \times 10^4$ $\mu\text{m} \cdot \text{K}$.

Integrando-se a Equação (4.1) em todos os comprimentos de onda obtém-se a equação (4.3), conhecida Lei de Stefan-Boltzmann, que estabelece o poder emissivo total de um corpo negro, mostrando que ele é proporcional à quarta potência da sua temperatura.

$$E_{cn} = \sigma T^4 \quad (4.3)$$

Onde a constante de Stefan-Boltzmann, que depende de C_1 e C_2 possui valor numérico de $\sigma = 5,670 \times 10^{-8}$ W/(m².K⁴) e T (K) é a temperatura do corpo.

4.2. EMISSIVIDADE, ABSORTIVIDADE E REFLETIVIDADE

Uma das propriedades radiantes da superfície, a emissividade pode ser definida como a razão entre a radiação emitida por uma superfície real e a radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura. A emissividade pode assumir diferentes valores de acordo com o fato de se estar interessado na emissão em um dado comprimento de onda ou em uma dada direção, ou então em médias integradas ao longo de comprimento de onda e direções. Essa propriedade, para superfícies reais, depende do comprimento de onda, dos ângulos de emissão e da temperatura.

A irradiação total engloba todas as contribuições espectrais e, para uma componente espectral da irradiação, parcelas dessa radiação podem ser refletidas, absorvidas e transmitidas, como mostra a Figura 4.1.

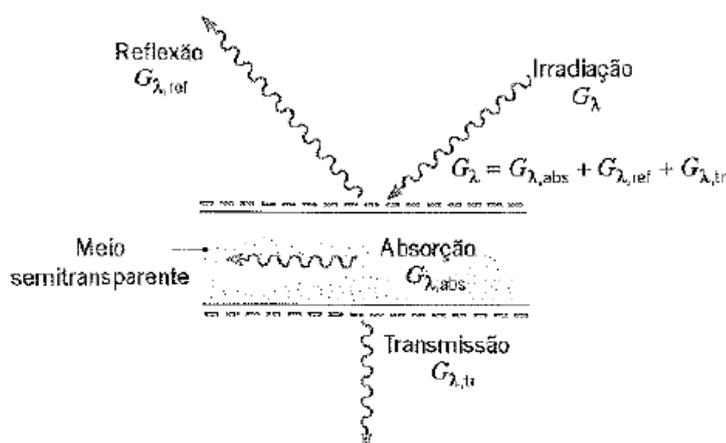


Figura 4.1 - Processos de absorção, reflexão e transmissão associados a um meio semitransparente. (Fonte: Incropera, F. P.; 2008).

Essas parcelas são definidas respectivamente pela refletividade ρ , pela absorptividade α e pela transmissividade τ . A absorptividade depende do comprimento de onda e da direção da radiação incidente e a refletividade além de depender da direção da radiação incidente, depende também da direção da radiação refletida. Já a transmissividade está fortemente relacionada com o espectro de cada material.

Como simplificação do problema, todas as superfícies são consideradas cinzas e difusas, fazendo com que essas propriedades sejam independentes dos ângulos e dos comprimentos de onda. Todas as superfícies são opacas, então a transmissividade é igual a zero.

Aplicando um balanço de energia tem-se a Equação (4.4):

$$\alpha + \rho = 1 \quad (4.4)$$

Pela Lei de Kirchoff estendida a superfícies cinzas e difusas tem-se:

$$\varepsilon = \alpha \quad (4.5)$$

4.3. FATOR DE FORMA

O fator de forma F_{i-j} é necessário para o cálculo da transferência de calor radiante entre superfícies e é definido como a fração de energia radiativa que deixa a superfície i e chega à superfície j , conforme Equação (4.6).

$$F_{i-j} = \frac{Q_{i-j}}{A_i q_{o,i}} \quad (4.6)$$

Na qual Q_{i-j} (W) é a taxa de calor que deixa i e chega diretamente a j , A_i (m²) é a área da superfície i e $q_{o,i}$ (W/m²) é a radiosidade da superfície i . Para superfícies difusas, a equação (4.7) fornece a expressão para o fator de forma:

$$F_{i-j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_j dA_i \quad (4.7)$$

Analogamente, o fator F_{j-i} é definido como a fração da radiação que deixa A_j e é interceptada por A_i . Sendo que θ_i , θ_j , R , A_i e A_j podem ser vistos na figura 4.2.

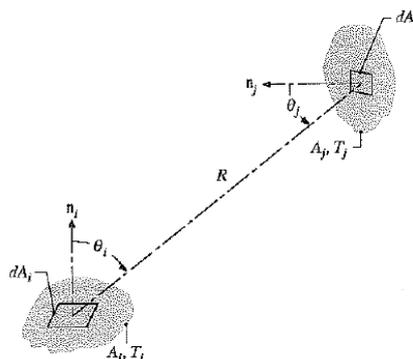


Figura 4.2 - Fator de forma associado à troca de radiação entre elementos de superfícies de áreas A_i e A_j . (Fonte: Incropera, F. P.; 2008).

Uma equação relevante para o cálculo do fator de forma é dada pela relação da reciprocidade:

$$A_i F_{i-j} = A_j F_{j-i} \quad (4.8)$$

Já pela regra da soma sabe-se que o somatório de uma superfície para todas as outras dentro de uma cavidade deve ser igual a um, conforme equação (4.9) abaixo.

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

4.4. BALANÇO DE ENERGIA EM UMA SUPERFÍCIE

Para a resolução do problema em questão deve-se considerar um balanço de energia que depende do volume de controle.

Assumindo regime estacionário e posicionando primeiramente a fronteira no interior da superfície, conforme Figura 4.3, tem-se que o fluxo de calor radiante na superfície j , $q_{r,j}$ (W/m²) é a diferença entre a emissão e_j (W/m²) e a absorção $q_{i,a,j}$.

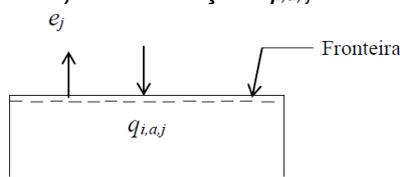


Figura 4.3 - Balanço de energia em uma superfície considerando a fronteira no interior do volume de controle.

Considerando ainda superfície cinza e difusa, obtém-se a equação (4.10).

$$q_{r,j} = \varepsilon_j e_{b,j} - \varepsilon_j q_{i,j} \quad (4.10)$$

Assumindo agora que a posição da fronteira esteja acima da superfície, conforme figura 4.4 e utilizando o conceito de radiosidade que leva em conta toda a energia radiante que deixa a superfície (emissão e reflexão).

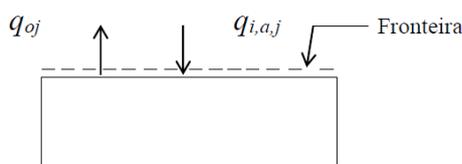


Figura 4.4 - Balanço de energia em uma superfície considerando a fronteira fora do volume de controle.

Nesse caso o fluxo de calor radiante, $q_{r,j}$ dada pela equação (4.11) será a diferença entre a radiosidade e a radiação incidente, $q_{i,j}$.

$$q_{r,j} = q_{o,j} - q_{i,j} \quad (4.11)$$

4.5. MÉTODO DA RADIOSIDADE

Combinando as equações (4.10) e (4.11) obtém-se uma relação que explicita a definição de radiosidade, uma vez que uma parcela da radiação é emitida e outra parcela é refletida. A radiosidade q_o (W/m²) é definida como o fluxo radiativo que engloba toda a energia radiante que deixa uma superfície e está diretamente relacionada com a emissão e reflexão.

$$q_{o,j} = \varepsilon_j e_{b,j} - (1 - \varepsilon_j) q_{i,j} \quad (4.12)$$

A transferência de radiação entre duas superfícies depende fortemente das geometrias das superfícies, assim como de suas propriedades radiantes e temperaturas. A equação da radiosidade para superfícies com fluxo prescrito pode ser escrita da seguinte forma:

$$q_{o,i} = q_{r,i} + \sum_{j=1}^n F_{i-j} q_{o,j} \quad (4.13)$$

Na qual $q_{r,i}$ (W/m²) é o fluxo de calor na superfície i , e o somatório representa a irradiação na mesma superfície.

Para superfícies com temperaturas prescritas tem-se a equação (4.14)

$$q_{o,i} = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=1}^n F_{i-j} q_{o,j} \quad (4.14)$$

O método das radiosidades propõe solução simples para calcular os fluxos de calor e temperaturas dentro de uma cavidade que consiste no seguinte procedimento:

- 1) Especificar uma condição de contorno para cada superfície, podendo ser temperatura ou fluxo de calor constante;
- 2) Estabelecer equação da radiosidade para cada superfície, no caso de temperatura prescrita deve-se utilizar a equação (4.14) e para fluxo prescrito deve-se utilizar a equação (4.13);
- 3) Determinar os fatores de forma em todas as superfícies;
- 4) Resolver a matriz das radiosidades, que possui o mesmo número de equações lineares e incógnitas;
- 5) Obter o fluxo em uma superfície com temperatura prescrita com o uso da equação (4.15) ou a temperatura em uma superfície com o fluxo de calor prescrito, com e_b (W/m²) definido, utilizando a equação (4.16).

$$q_{r,i} = q_{o,i} - \sum_{j=1}^n F_{i-j} q_{o,j} \quad (4.15)$$

$$e_b = \frac{1}{\varepsilon_i} q_{o,i} - \frac{(1-\varepsilon_i)}{\varepsilon_i} \sum_{j=1}^n F_{i-j} q_{o,j} \quad (4.16)$$

4.6. SOLUÇÃO INVERSA

A solução direta de um problema utiliza uma causa e encontra o efeito que ela produz. A solução inversa, por sua vez, consiste em, a partir do efeito conhecido, buscar a causa que o produz.

A solução inversa foi utilizada para a determinação da posição dos filamentos aquecedores do forno a partir do fluxo conhecido na superfície de projeto. O valor do fluxo de calor nos filamentos aquecedores deve ser o mesmo prescrito na superfície de projeto.

A vantagem de usar a análise inversa é a obtenção de uma solução satisfatória para o problema, com baixos desvios. Para obter a solução na abordagem direta usa-se tentativa e erro e pode-se levar muito tempo para encontrar uma solução satisfatória, ou até mesmo não encontrar.

4.7. MÉTODO NUMÉRICO

Foi utilizado o *software* ANSYS – *Fluent* 14.0, disponibilizado pelo Laboratório de Radiação Térmica (LRT) da UFRGS. Esse código resolve problemas de engenharia a partir do método de volumes finitos, que se baseia na discretização do domínio global em pequenos volumes de controle. Assim, de forma iterativa, as equações diferenciais governantes são substituídas e resolvidas por equações algébricas em cada volume.

Por se tratar somente de troca de calor radiante, uma análise criteriosa dos modelos de radiação apresentados no *software* se fez necessária, objetivando a convergência da solução numérica e a obtenção de resultados coerentes e mais próximos da realidade.

4.8. MODELO DE RADIAÇÃO SURFACE TO SURFACE

O modelo de radiação utilizado para a simulação foi o *Surface-to-Surface (S2S)*, utilizado para contabilizar a troca de calor por radiação numa cavidade de superfícies de cinzas e difusas sem meio participante. Em casos como este, os outros métodos oferecidos pelo *Fluent* nem sempre são eficientes. O modelo utilizado neste estudo utiliza menos tempo computacional por iteração, embora o cálculo do fator de forma necessite de uso intenso da CPU.

A principal hipótese do modelo S2S é que qualquer absorção, emissão ou espalhamento de radiação pode ser ignorada, portanto, apenas a radiação "superfície-superfície" é considerada para análise.

Para o cálculo do fator de forma de geometrias complexas e com muitas superfícies o uso da CPU é muito grande, então, para agilizar o processo e não sobrecarregar a máquina, o modelo oferece a opção de agrupar vários elementos em superfícies maiores nos chamados *clusters*. Esse agrupamento é feito a partir de um elemento adicionando a ele os seus vizinhos até o número especificado de elementos por superfície. Como a geometria em questão é relativamente simples essa opção foi desativada do modelo.

5. METODOLOGIA

Neste capítulo, o problema será descrito, com suas peculiaridades geométricas, discretização do domínio e condições de contorno.

5.1. GEOMETRIA

A cavidade retangular, representada pela Figura 5.1, formada por superfícies cinzas e difusas, possui as seguintes dimensões: comprimento L igual a 1,00 m, largura W igual a 0,80 m e altura H igual a 0,20 m. A superfície de projeto, onde o fluxo de calor é prescrito, está localizada na superfície inferior da cavidade. Os três tipos de aquecedores são posicionados no topo, formando os filamentos, e as superfícies laterais são consideradas isoladas.

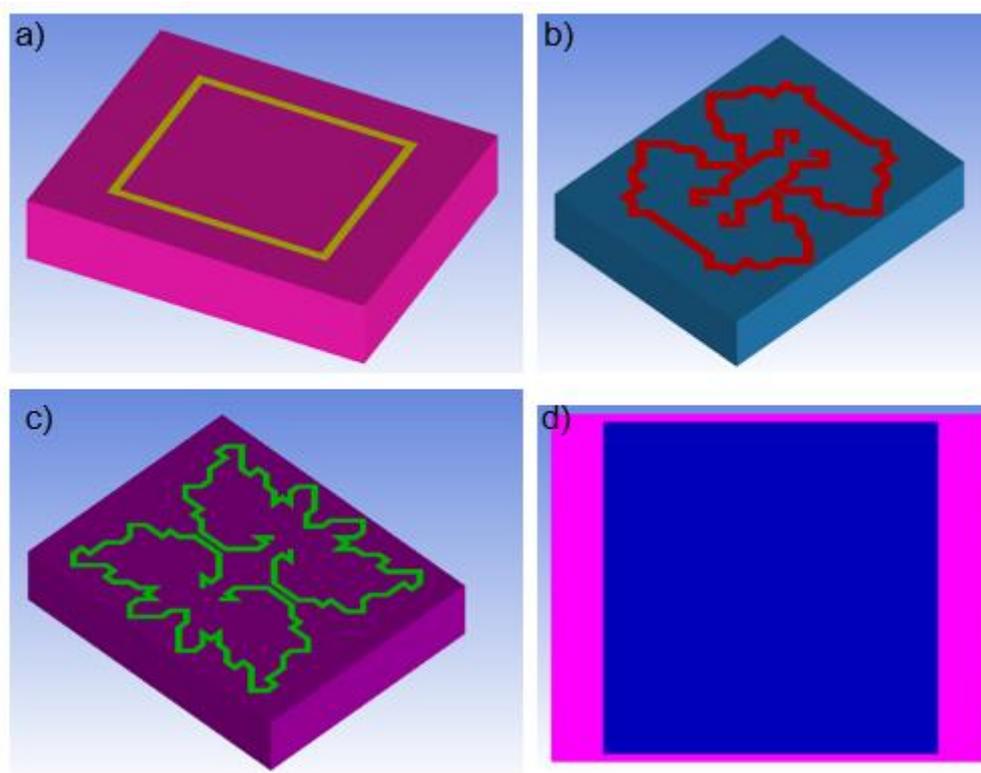


Figura 5.1 - Geometrias utilizadas: a) Geometria do primeiro filamento simulado com área superficial de 0,057 m²; b) Geometria do segundo filamento simulado com área superficial de 0,081 m²; c) Geometria do terceiro filamento simulado com área superficial de 0,058 m²; d) Superfície de projeto do forno com área superficial de 0,585 m².

A geometria e posição dos aquecedores mostrados na Figura 5.1.b e 5.1.c foram obtidas por Lemos, 2015. Na bibliografia citada um fluxo de calor adimensional e constante de 0,277, que equivale a 3.222 W/m² e uma temperatura adimensional igual a 1, equivalente a 673 K foram prescritos na superfície de projeto e com isso encontrou-se a melhor geometria e posição de

cada configuração de filamento para fornecer a distribuição de calor mais uniforme possível na superfície de projeto.

Pode-se perceber que a superfície de projeto não ocupa toda a superfície inferior, isso ocorre pelo fato das regiões próximas aos cantos serem afetadas principalmente por reflexões das paredes laterais e não pela radiação térmica proveniente do aquecedor na superfície superior. Conforme discutido em Brittes e França, 2010, essa situação dificulta e pode até impossibilitar que se alcance a configuração que atenda adequadamente o problema.

5.2. DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO E SOLUÇÃO NUMÉRICA

A malha utilizada possui, em sua grande maioria, volumes do tipo tetraédrico e sua geração foi realizada utilizando o *software ICEM CFD 14.0*. Como houve muita dificuldade de se utilizar volumes do tipo hexaédrico o uso deste volume foi descartado.

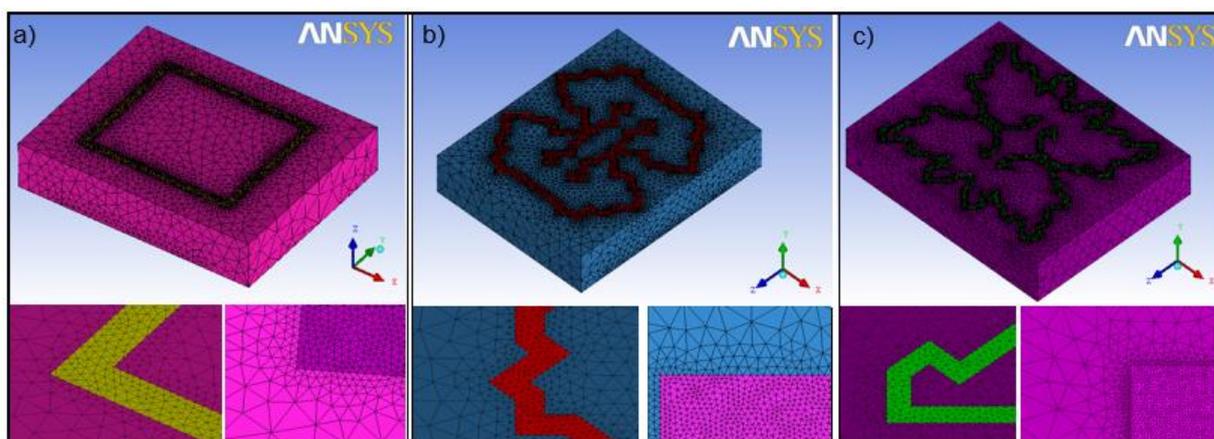


Figura 5.2 - Malhas utilizadas: a) Malha utilizada para simulação do filamento 1 e detalhamento do refinamento no aquecedor e superfície de projeto; b) Malha utilizada para simulação do filamento 2 e detalhamento do refinamento no aquecedor e superfície de projeto; c) Malha utilizada para simulação do filamento 3 e detalhamento do refinamento no aquecedor e superfície de projeto.

As malhas escolhidas nas simulações possuem 88.932 elementos para o filamento 1, 73.166 para o filamento 2 e 75.502 para o filamento 3. Esses números foram obtidos realizando o teste de independência de malha. O teste foi realizado com quatro malhas distintas, sendo que o mesmo caso foi simulado para cada malha. Cinco pontos equidistantes foram plotados a partir da borda da superfície de projeto para ser possível analisar o comportamento do fluxo de calor radiante. As Figura 5.3, 5.4 e 5.5 mostram o estudo realizado.

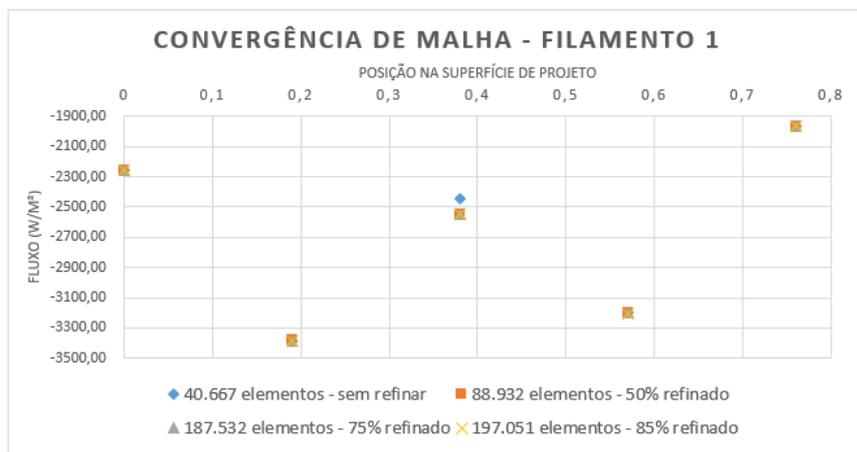


Figura 5.3 - Análise de convergência de malha para o filamento 1.

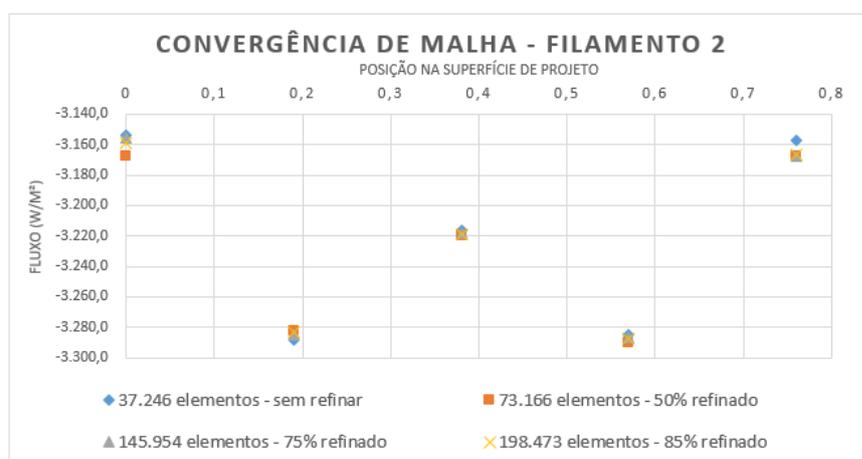


Figura 5.4 – Análise de convergência de malha para o filamento 2.

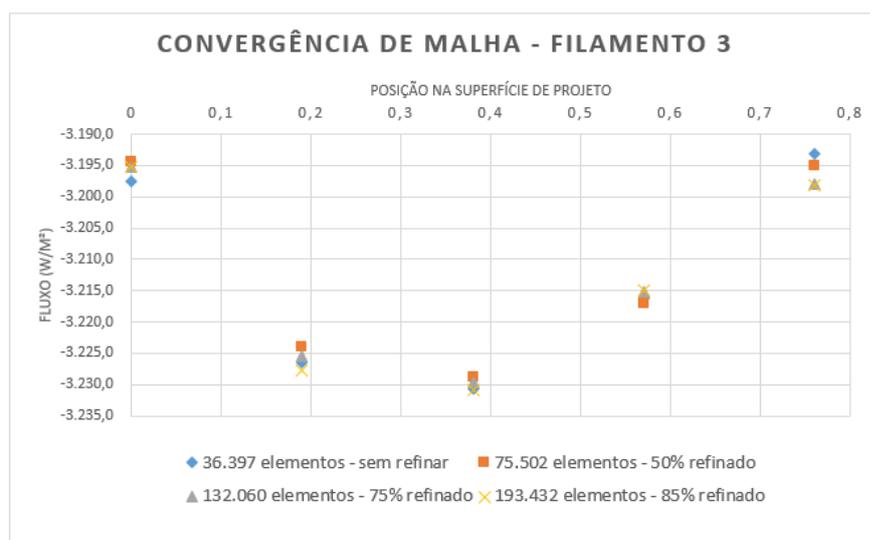


Figura 5.5 – Análise de convergência de malha para o filamento 3.

Pode-se observar que não há variação significativa nos resultados mensurados. Optou-se por utilizar o refinamento de 50% nos filamentos e superfície de projeto para extração dos

resultados, diminuindo a carga computacional. Todos os resultados apresentados atingiram convergência absoluta de $1E-14$, com pequenas variações desse valor, dependendo da malha utilizada.

5.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno são as mesmas utilizadas no estudo de Lemos, 2015, sendo assim possível a comparação direta entre os resultados para validação.

As superfícies que compõem a cavidade radiante são consideradas cinzas e difusas. As emissividades da superfície de projeto, paredes e aquecedor são $\varepsilon_d = 0,9$, $\varepsilon_w = 0,9$ e $\varepsilon_h = 0,5$, respectivamente. As paredes que não fazem parte dos aquecedores e da superfície de projeto são consideradas perfeitamente isoladas termicamente, ou seja $q_r = 0$. Na superfície de projeto foi utilizado temperatura prescrita de 673 K.

Para o filamento 1 foi prescrito um fluxo de calor constante de $16.561,05 \text{ W/m}^2$ em uma área superficial de $0,045 \text{ m}^2$, para o filamento 2 foi prescrito um fluxo de calor constante de 11.599 W/m^2 em uma área superficial de $0,081 \text{ m}^2$ e, No filamento 3 o fluxo de calor constante prescrito foi de $16.187,7 \text{ W/m}^2$ em uma área superficial de $0,058 \text{ m}^2$. Todos os filamentos possuem a mesma taxa de calor de $1.887,9 \text{ W}$.

5.4. CÁLCULO DO DESVIO DA SOLUÇÃO

A avaliação da solução é realizada em termos do desvio no cálculo do fluxo de calor em um ponto da superfície de projeto ($Q_{r,jd}$). O desvio é calculado através da equação (5.1).

$$\gamma_{jd} = \left| \frac{Q_{r,prescrito} - Q_{r,jd}}{Q_{r,prescrito}} \right| \quad (5.1)$$

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados para a análise do fluxo de calor radiante incidente na superfície de projeto para as três configurações de aquecedores propostas.

6.1. FILAMENTO 1

Por ser uma solução bastante intuitiva, o primeiro filamento simulado, mostrado na Figura 6.1 possui geometria retangular, que aparentemente seria capaz de distribuir o calor de modo uniforme.

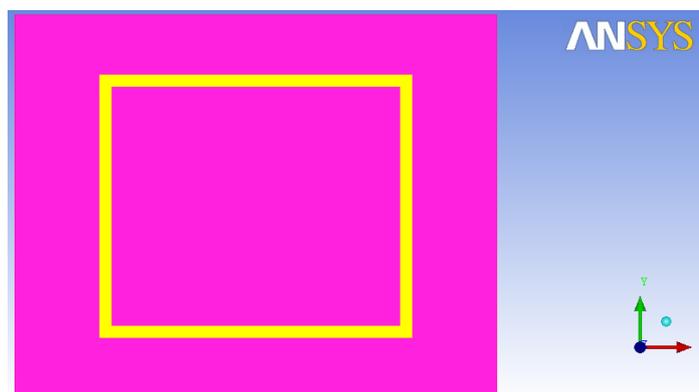


Figura 6.1– Geometria do filamento 1.

Pode-se observar o resultado da distribuição de fluxo dessa configuração de filamento na Figura 6.2. A distribuição do fluxo de calor radiante na superfície de projeto não se mostrou constante, apresentando valores entre $1.153,7 \text{ W/m}^2$ e $4.001,6 \text{ W/m}^2$, uma diferença de $246,8\%$

entre o maior e o menor fluxo de calor, enquanto o desvio máximo relacionado à solução foi de 64% conforme Tabela 1.

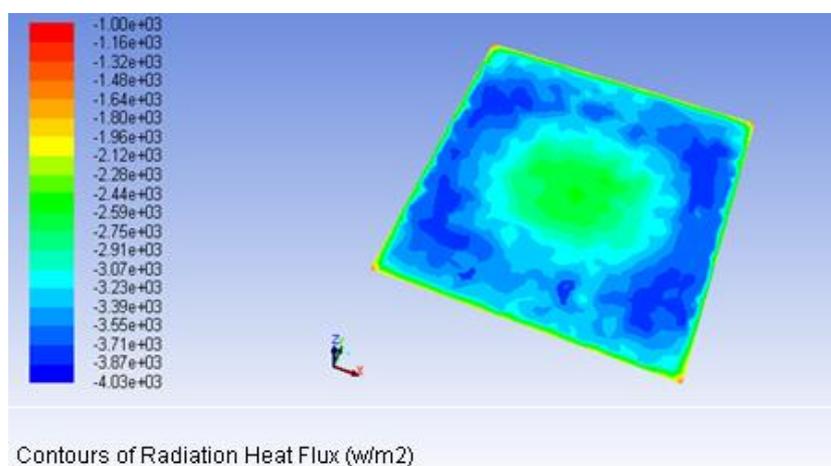


Figura 6.2 – Distribuição de fluxo de calor radiante na superfície de projeto do forno aquecido com o filamento 1.

Tabela 1 – Desvios relacionados à solução do filamento 1.

Filamento 1	
Desvio médio	20%
Desvio máximo	64%

6.2. FILAMENTO 2

O filamento 2, mostrado na Figura 6.3 foi simulado tomando como base uma das geometrias obtidas por Lemos, 2015.

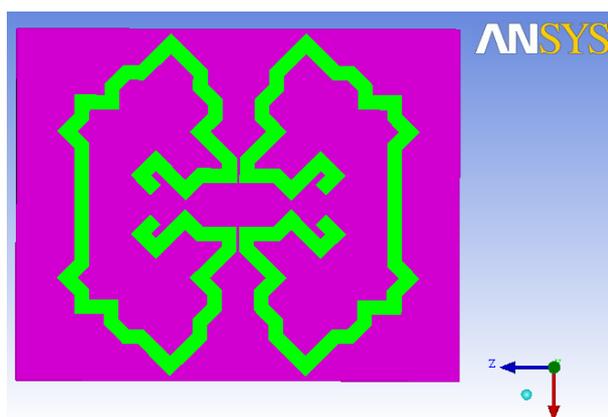


Figura 6.3 – Geometria do filamento 2.

Pode-se observar pela Figura 6.4 que para essa configuração de filamento a distribuição do fluxo de calor radiante incidindo na superfície de projeto mostrou-se muito mais homogênea do que a obtida no filamento 1.

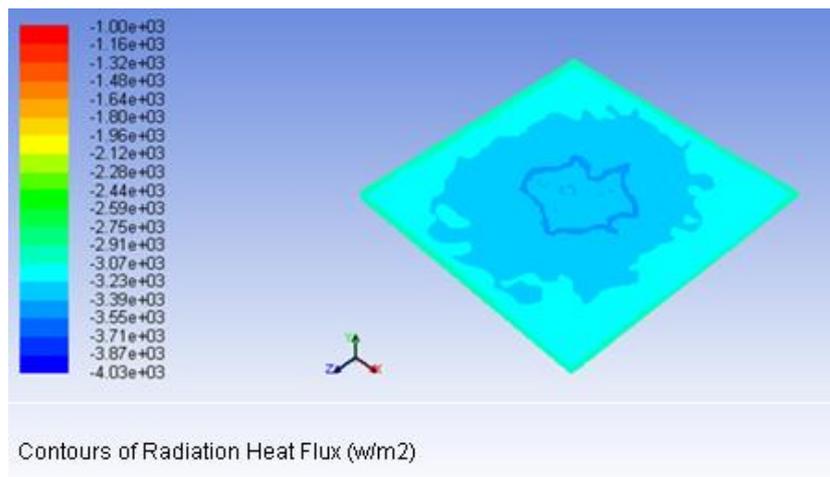


Figura 6.4 - Distribuição de fluxo de calor radiante na superfície de projeto do forno aquecido com o filamento 2.

Com valores entre $3.177,7 \text{ W/m}^2$ e $3.317,3 \text{ W/m}^2$, a variação de fluxo ficou em apenas 4,4% e o desvio máximo relacionado à solução, conforme Tabela 2 foi de 2,96%.

Tabela 2 - Desvios relacionados à solução do filamento 2.

Filamento 2	
Desvio médio	0,79%
Desvio máximo	2,96%

O filamento 2 gerou fluxo de calor mais uniforme na superfície de projeto, levando à diminuição do desvio máximo. Ao analisar o fluxo de calor na superfície de projeto, nota-se boa correlação em relação aos resultados obtidos anteriormente mostrados na Figura 6.5, os quais variam entre um valor de fluxo adimensional de 0,266 e 0,282 que equivalem a $3.094,03 \text{ W/m}^2$ e $3.280,14 \text{ W/m}^2$, uma variação de 5,5% e desvio máximo de 4,6%. O que é positivo no sentido de validação da aplicabilidade da solução.

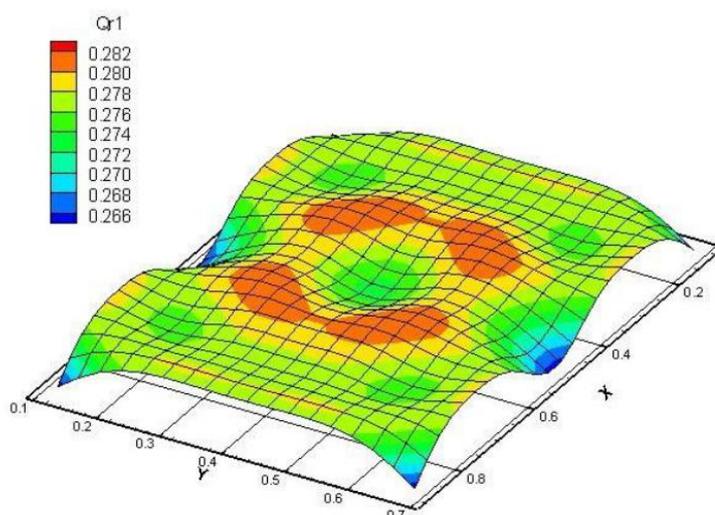


Figura 6.5 – Distribuição de fluxo de calor radiante, obtida por Lemos, 2015, no *software Fortran* referente à mesma geometria de filamento. (Fonte: Lemos, 2015).

6.3. FILAMENTO 3

O filamento 3, mostrado na Figura 6.6 também foi simulado a partir de uma das geometrias obtida por Lemos, 2015.

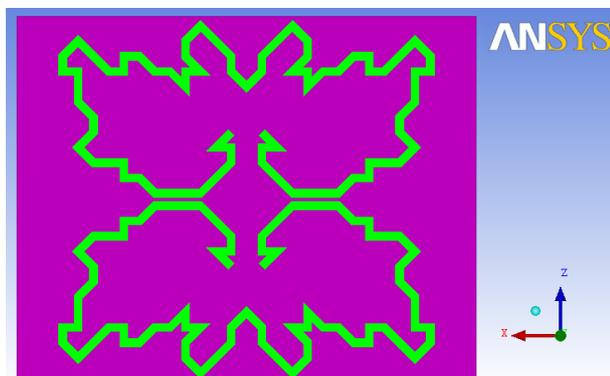


Figura 6.6 – Geometria do filamento 3.

Pode-se observar pela Figura 6.7 que para essa configuração de filamento a distribuição do fluxo de calor radiante na superfície de projeto mostrou-se com melhor uniformidade quando comparada aos filamentos 1 e 2.

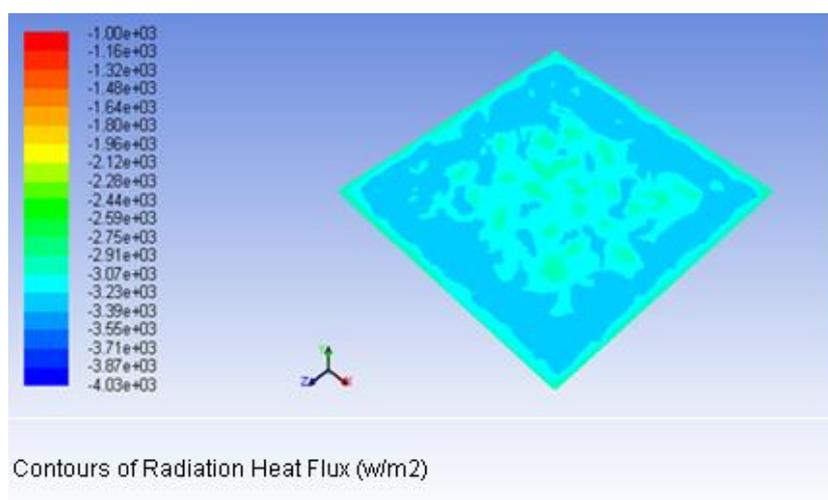


Figura 6.7 - Distribuição de fluxo de calor radiante na superfície de projeto do forno aquecido com o filamento 3.

Os valores de fluxo de calor radiante encontram-se entre 3.194,3 W/m² e 3.286,5 W/m², uma diferença de apenas 2,88% entre o maior e o menor valor obtido. O desvio máximo relacionado à solução, conforme Tabela 3 foi de 1,80%.

Tabela 3 - Desvios relacionados à solução do filamento 3.

Filamento 3	
Desvio médio	0,57%
Desvio máximo	1,80%

Analisando a Figura 6.6 e a Tabela 3 pode-se perceber que o filamento 3 gerou um fluxo de calor bastante homogêneo, o que levou essa solução a desvios ainda mais baixos. Ao

analisar, novamente o fluxo de calor na superfície de projeto pode-se notar que a distribuição se comporta de maneira muito similar aos resultados obtidos para o mesmo filamento em Lemos 2015, mostrados na Figura 6.8, uma vez que ele varia entre um fluxo adimensional de 0,270 e 0,282 que equivale a 3.140,55 W/m² e 3.280,14 W/m², uma variação de 4,2% e desvio máximo de 1,87%, o que corrobora a aplicabilidade da solução.

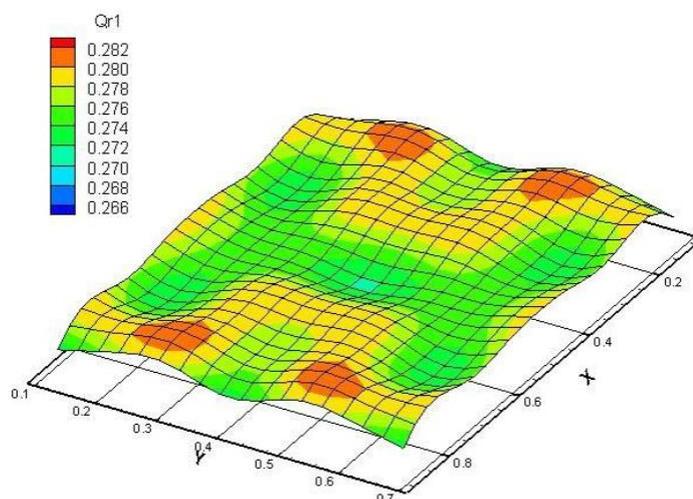


Figura 6.8 - Distribuição de fluxo de calor radiante, obtida por Lemos, 2015, no *software Fortran* referente à mesma geometria de filamento. (Fonte: Lemos, 2015).

7. CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

Fazendo uso de modelagem computacional através dos *softwares* comerciais *ICEM CFD 14.0* e *ANSYS Fluent 14.0*, reproduziu-se a geometria e condições de contorno do forno proposto por Lemos 2015. O modelo de radiação assumido (*Surface to Surface*) permitiu o uso da mesma simplificação da bibliografia ao tratar o forno como uma cavidade radiante, em regime permanente, com o meio não participante a exemplo do ar, e dotado de paredes cinzas e difusas.

A geometria foi reproduzida em 4 malhas diferentes para cada filamento, com diferentes graus de refinamento, evidenciando-se a convergência de malhas. Optou-se por utilizar o refinamento de 50% para extração dos resultados, diminuindo o tempo e esforço computacional.

Foram analisados três filamentos distintos. O filamento 1 foi sugerido apenas para comparação entre uma geometria intuitiva com as geometrias 2 e 3 obtidas da bibliografia com o emprego da análise inversa e algoritmo GEO. O fluxo de calor nos filamentos foi prescrito e considerado constante. Os três filamentos diferenciam-se entre si nas áreas e fluxos de calor obedecendo o balanço de energia de acordo com a taxa de calor entrando na superfície de projeto.

O filamento 1, com área superficial de 0,057 m², e fluxo de calor constante prescrito de 16.561,05 W/m², não se mostrou uma solução eficaz, apresentando diferença de aproximadamente 246% entre o maior e o menor fluxo e obteve desvio máximo da solução de 64%.

O filamento 2, com área superficial de 0,081 m², e fluxo de calor constante prescrito de 11.599,0 W/m², apresentou distribuição de fluxo mais uniforme, com uma diferença de 4,4% entre o fluxo máximo e o fluxo mínimo incidente. A redução entre os desvios máximos da solução foi de 95,3% quando comparado ao primeiro filamento simulado.

O filamento 3, com área superficial de 0,058 m², e fluxo de calor constante prescrito de 16.187,7 W/m², apresentou distribuição ainda melhor de fluxo de calor, com apenas 2,8% de diferença entre o fluxo máximo e o fluxo mínimo incidente na superfície. O desvio máximo foi de 1,80% uma redução de 39% comparado ao segundo filamento e de 97,18% quando comparado ao primeiro filamento.

A partir dos resultados da modelagem e simulação computacional no *software* comercial é possível validar a metodologia proposta por Lemos 2015, tanto em termos de parâmetros, condições de contorno quanto nos resultados obtidos. A evolução da distribuição dos fluxos incidentes na superfície de projeto, com a otimização da geometria e posição dos filamentos deixa claro que um formato intuitivo de filamento não é adequado para gerar distribuições uniformes de fluxo.

A metodologia inversa e algoritmo GEO mostraram-se bastante relevantes, sendo uma ferramenta válida para auxiliar na melhoria dos projetos de fornos de aquecimento elétrico por filamento. Assim, pode ser empregada nas mais diversas aplicações de fornos elétricos de filamento. Para realização de futuros estudos na área, fornos com radiação juntamente com convecção podem ser considerados, para que os resultados sejam ainda mais próximos da realidade da atmosfera de um forno com aquecimento por filamento.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS Inc., “ANSYS Fluent Theory Guide”, Release 14.0, 2013.

ANSYS Inc., “ANSYS Fluent User’s Guide”, Release 14.0, 2013.

ANSYS Inc., “ANSYS ICEM CFD User’s Guide”, Release 14.0, 2013.

Brittes, R.; França, F.H.R. **A hybrid inverse method for the thermal design of radiative heating systems**, International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 57, p.48-57, 2013.

Cassol, F.; Schneider, P.S.; França, F.H.R.; Sousa, F.L.; Neto, A.J.S. **Multi-objective optimization as a new approach to illumination design of interior spaces**, Building and Environment, v.46, p. 331-338, 2011.

Incropera, F. P.; Dewitt D.P., **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, LTC, 2008.

LEMOS, L. D. Aplicação da Análise Inversa no Projeto de Fornos com Aquecedores de Filamento. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, 2015.

Mossi, A.C.; Vielmo, H.A.; França, F.H.R.; Howell, J.R. **Inverse design involving combined radiative and turbulent convective heat transfer**, International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 51, p. 3217-3226, 2008.

Navaneethkrishnan, P.; Srinivasan, P. S. S.; Dhandapani, S. **Numerical and experimental investigation of temperature distribution inside a heating oven**, Journal of food processing and preserving, v. 34, p. 275-288, 2008.

Safavinejad, A.; Maruyama, S.; Mansouri, S. H.; Sakurai, A. **Optimal Boundary Design of Radiant Enclosures Using Micro-Genetic Algorithm (Effects of Refractory Properties and Aspect Ratio of Enclosure on Heaters Setting)**, Journal Of Thermal Science and Technology, v. 3, p. 179-194, 2008.