

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

Estudo numérico-computacional de fenômenos térmicos em sistemas industriais de redução de
alumínio

por

Mauro Jaeger Moreira

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 2013



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

Estudo numérico-computacional de fenômenos térmicos em sistemas industriais de redução de alumínio

por

Mauro Jaeger Moreira

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.
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Ciências Térmicas

Orientador: Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey

Prof. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi

Prof. Dr. Horácio A. Vielmo

Porto Alegre, 12 de Julho de 2013

Aos meus pais, Iara Beatriz Jaeger Moreira e Luiz Miguel Gomes Moreira, que sempre me apoiaram, de todas as formas possíveis, me incentivaram e tornaram tudo possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus amigos e familiares, que me deram suporte e ajuda sempre que precisei.
Ao professor Dr. Francis Henrique Ramos França, pela orientação e colaboração para a realização deste trabalho.
Aos profissionais da CAETE Engenharia, que proporcionaram os materiais e incentivos, além da convivência e amizade.

Moreira, M. J. Estudo numérico-computacional de fenômenos térmicos em sistemas industriais de redução de alumínio. 2013. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

No processo de extração de alumínio, para obtenção de alumínio primário, é necessária a redução eletroquímica da alumina, realizada em sistemas denominados cubas Hall-Héroult. Para tanto, cubas são conectadas em série e uma corrente elétrica é transmitida através destas. Devido à resistência elétrica dos componentes que transmitem a corrente, calor é gerado por efeito Joule, o que representa uma fonte de calor considerável no interior do sistema. Para manter o processo de maneira eficiente, é necessário controlar as temperaturas no interior do sistema, mantendo um calor dissipado em valores que ao mesmo tempo favorecem o processo eletrolítico e não causam danos aos materiais da estrutura. É importante ressaltar que não basta empregar o material com as características mais isolantes, porque, apesar de aumentar a capacidade produtiva, temperaturas muito elevadas podem danificar os materiais internos. O estudo apresentado teve por objetivo modelar, utilizando programa de análise numérica por elementos finitos, o sistema de redução e estudar a influência de diferentes materiais isolantes no campo de temperaturas no interior de uma cuba.

PALAVRAS-CHAVE: redução de alumínio, corrente elétrica, calor, temperaturas, isolamento

Moreira, M. J. Numeric-computational study of thermal phenomena in industrial aluminium reduction systems. 2013. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

In the aluminium extraction process, to obtain primary aluminium, the electrochemical reduction of alumina is necessary, which can be accomplished in systems called Hall-Héroult cells. In these systems, cells are connected in series and current is transmitted through them. Due to the electrical resistance of the components, heat is generated by Joule effect, that represents a considerable heat source at the interior of the system. In order to maintain the process at a efficient way, it is necessary to control the temperatures in the interior of the system, keeping the dissipated heat at values that at the same time allows the electrolytic process and avoid damages in the structural materials. It is important to highlight that it is not enough to apply the material with the most insulating characteristics, because, despite increasing productive capacity, temperatures too high may damage the materials within. The presented study had the objective of modeling, using software of finite element numerical analysis the reduction system and study the influence of different insulation materials in the temperatures field in the interior of a cell.

KEYWORDS: aluminium reduction, electric current, heat, temperatures, insulation

ÍNDICE

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
3.1 Produção de alumínio	1
3.2 Estudos anteriores	2
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	3
4.1 Considerações e simplificações.....	3
4.2 Construção do modelo.....	4
4.3 Elemento utilizado	5
4.4 Modelo termo-elétrico	5
4.4.1 Trocas térmicas por condução.....	5
4.4.2 Trocas térmicas por convecção.....	6
4.4.3 Trocas térmicas por radiação.....	6
4.4.3 Campos elétricos.....	7
4.4.4 Geração de calor por efeito joule.....	7
4.5 Condições de contorno	7
4.6 Propriedades dos materiais empregados	8
4.7 Estudo de independência de malha	10
4.8 Critérios de convergência e estimativa dos resíduos	11
4.9 Medições em sistemas reais	12
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	12
5.1 Resultados termo-elétricos obtidos	12
5.2 Discussão dos resultados.....	12
5.3 Análise de custos	13
6. CONCLUSÕES.....	13
APÊNDICE	16

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Cuba de redução de alumínio – reproduzido de [Grjotheim e Welch, 1988] .	2
Figura 4.2: Localização do sistema modelado	3
Figura 4.3: Geometria do sistema, como montada no programa SolidWorks, com as cotas mais relevantes.....	4
Figura 4.4: Materiais e suas respectivas posições no modelo.....	8
Figura 4.5: Gráfico de convergência representando os resíduos e critérios calculados	11
Figura A.1: Comparação de campos de temperatura das malhas estudadas	16
Figura A.2: Campos de temperaturas obtidos para isolante 20%	17
Figura A.3: Campos de temperaturas obtidos para isolante 40%	18
Figura A.4: Campos de temperaturas obtidos para isolante 90%	19

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

Al_2O_3	alumina
CO_2	dióxido de carbono
C	carbono
Al	alumínio
Na_3AlF_6	criolita
DC	corrente contínua
h	coeficiente convectivo
k	condutividade térmica do meio
q'''	geração de calor em um volume
ρ	densidade
$\frac{\partial T}{\partial \bar{x}}$	derivada parcial da temperatura em relação a uma coordenada espacial
q''	fluxo térmico
\bar{h}_L	coeficiente convectivo médio
L	dimensão característica
T_s	temperatura de superfície
T_∞	temperatura do fluido
q''_{rad}	fluxo térmico devido à radiação
T_{viz}	temperatura da vizinhança
σ	constante de Boltzmann
∇	operador gradiente
Φ	potencial elétrico
I	corrente elétrica
R_e	resistividade elétrica
V	volume

1. INTRODUÇÃO

O alumínio, elemento de extrema abundância na crosta terrestre, é extraído na forma de aluminatos, silicatos e óxidos. Para a fabricação de produtos cuja aplicação se estende desde utensílios domésticos até componentes aeroespaciais, é necessário que o alumínio seja trabalhado em sua forma metálica.

O alumínio metálico, como material de construção mecânica, começou a ser utilizado já na primeira metade do século XIX. Um metal bastante leve e resistente aos danos causados pela oxidação natural, o alumínio sempre foi visto como um material prático, mas os custos de produção inicialmente eram muito elevados.

Somente em 1886 o processo de redução eletrolítica foi desenvolvido por Hall e Heróult, que, com o advento da geração de energia elétrica e o desenvolvimento do processo Bayer de extração da alumina a partir da bauxita, permitiu a obtenção de alumínio metálico com pureza superior a 95% de forma mais viável.

2. OBJETIVOS

Os principais objetivos deste trabalho consistem em modelar numericamente, pelo método dos elementos finitos, um sistema de redução de alumínio, caracterizando os materiais empregados quanto às propriedades termoelétricas e correlacionar os diferentes materiais empregados com os campos de distribuição de temperaturas. Com isso, espera-se concluir qual dos materiais estudados propicia uma distribuição de temperaturas mais adequada, que ao mesmo tempo não representa riscos para a integridade estrutural do modelo estudado e não interfere nos parâmetros de operação.

Para tanto, foram utilizadas ferramentas computacionais como o pacote comercial ANSYS 14.0. A verificação da validade de tal modelo foi feita comparando-se os resultados obtidos com medições realizadas em sistemas reais equivalentes.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Produção de alumínio

O alumínio metálico, como material de construção mecânica, começou a ser utilizado já na primeira metade do século XIX. Um metal bastante leve e resistente aos danos causados pela oxidação natural, o alumínio sempre foi visto como um material prático, mas os custos de produção inicialmente eram muito elevados.

Somente em 1886 o processo de redução eletrolítica foi desenvolvido por Hall e Heróult, que, com o advento da geração de energia elétrica e o desenvolvimento do processo Bayer de extração da alumina a partir da bauxita, permitiu a obtenção de alumínio metálico com pureza superior a 95% de forma mais viável.

A reação eletrolítica, com a qual se obtém o alumínio metálico, ocorre quando a alumina (Al_2O_3), retirada da bauxita, reage com o carbono e forma dióxido de carbono (CO_2) na presença de corrente elétrica, conforme a equação a seguir [Grjotheim e Welch, 1998]:



onde a alumina é reduzida em seu estado sólido, juntamente com carbono sólido, produzindo alumínio líquido e dióxido de carbono em forma gasosa.

Para que a alumina seja dissolvida em meio líquido, é necessário usar um material com características adequadas ao processo. O material mais utilizado em sistemas industriais é a

criolita (Na_3AlF_6). Este material forma uma camada sólida que ajuda a proteger o alumínio líquido e o banho de criolita no interior do sistema. Essa camada é comumente chamada de “ledge”. Os sistemas de redução individuais, também chamados de cubas eletrolíticas, cubas de redução de alumínio ou simplesmente cubas, são dispostos em série na planta e alimentados com corrente contínua (DC). As cubas funcionam com valores constantes de corrente. A Figura 3.1 exemplifica um destes sistemas em uma planta de redução de alumínio.

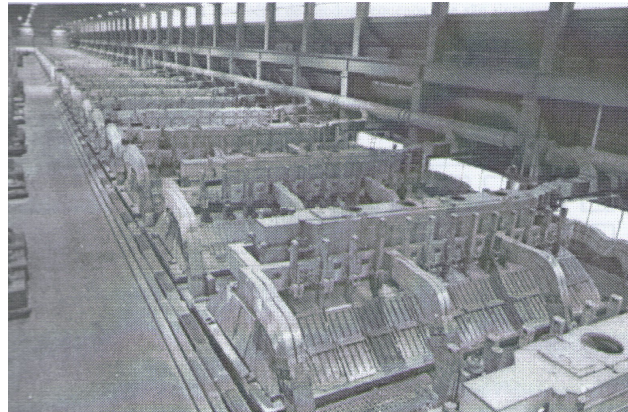


Figura 3.1: Cuba de redução de alumínio – reproduzido de [Grjotheim e Welch, 1988]

Os principais componentes de uma cuba deste tipo são:

- estrutura externa de aço (também chamada de casco);
- isolantes térmicos e refratários;
- ânodos de carbono consumíveis (também chamados simplesmente de anodos);
- banho eletrolítico de criolita;
- alumínio líquido;
- banho solidificado, ou congelado, de criolita;
- blocos catódicos de material gráfitico ou grafitizado (também chamados de catodos);
- barras de aço que conduzem a corrente aplicada a sistemas subsequentes.

3.2 Estudos anteriores

Devido à importância econômica da produção industrial de alumínio, muitos trabalhos já foram conduzidos no âmbito da análise numérica dos fenômenos que ocorrem em sistemas de redução.

Destacam-se os estudos realizados quanto aos fenômenos de escoamento do alumínio líquido na porção superior dos catodos nas cubas de redução, caracterizados pela chamada Magneto-Hidrodinâmica [Schneider, 2006; Gusberti, 2007]. Esses estudos demonstram o comportamento do metal fluido devido à presença de um forte campo magnético induzido e seus resultados forneceram alguns dos parâmetros utilizados neste trabalho.

Quanto à análise térmica, como a efetuada neste estudo, alguns trabalhos forneceram resultados e discussões muito interessantes, principalmente quanto a propriedades e comportamentos dos materiais presentes no sistema [Severo e Gusberti, 2009]. Os coeficientes de transferência de calor por convecção foram obtidos correlacionando as distribuições de temperaturas no sistema com as interfaces entre os materiais e diferentes densidades de corrente. Chegou-se, então a valores médios de h , que são utilizados neste trabalho.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Considerações e simplificações

Para tornar viável a análise computacional do modelo apresentado, algumas simplificações serão feitas. Tais simplificações não devem alterar significativamente os resultados obtidos, em comparação com medições realizadas em sistemas reais equivalentes [Grjotheim e Welch, 1998; Sørli e Øye, 1994].

São estas as considerações e simplificações:

- a geometria foi modelada de forma simplificada, i.e. componentes que apresentavam uma geometria que dificultava a geração de malha foram redesenhados de forma a facilitá-la;
- as trocas térmicas na interface catodo-alumínio não foram obtidas com a modelagem de elementos fluidos, mas modeladas com correlações obtidas por outros autores;
- assumiu-se diferença de potencial igual a zero no topo dos catodos;
- o sistema foi modelado de forma a aproveitar sua simetria e analisar apenas uma fração da cuba, observando as condições de contorno e de simetria;
- a corrente aplicada é contínua (DC);
- o regime é considerado permanente;
- não há variação na temperatura do banho e alumínio na parte superior do catodo com a mudança de corrente aplicada.

Conforme explicado, o modelo foi construído de forma a aproveitar a simetria de sua geometria.

Devido à grande complexidade do sistema inteiro, somente os componentes inferiores, ou catódicos, foram modelados, deixando os barramentos externos e anodos de fora da análise. A Figura 4.1 mostra como o sistema modelado se encaixa na cuba de redução em um desenho representativo de uma cuba em vista acumulada superior.

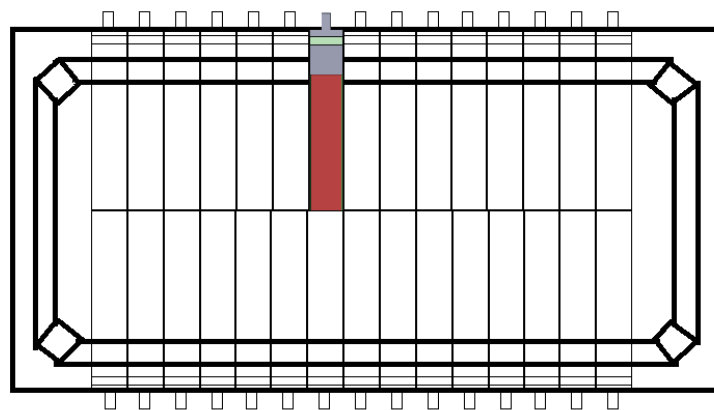


Figura 4.2: Localização do sistema modelado

Devido a possíveis efeitos de borda na cuba completa, o sistema modelado representa os catodos mais internos, o que é bastante satisfatório, tendo em vista a quantidade elevada dessas unidades mesmo em cubas de pequeno porte.

4.2 Construção do modelo

Decidiu-se, por questões de simplicidade, acessibilidade e familiaridade, construir a geometria do modelo por meio do programa SolidWorks 2010, que consiste de um pacote comercial para projeto e desenho de geometrias bidimensionais e tridimensionais. O sistema, com as devidas simplificações, foi construído como um conjunto, ou montagem, de partes tridimensionais sólidas. Na etapa de desenho, apenas a geometria foi criada, permanecendo outros processos em etapas posteriores.

A geometria foi desenhada de forma a representar um sistema genérico, sem especificações de fabricação, mas que ainda assim possui características representativas de sistemas reais. Devido à grande diversidade de dimensões, foram usados valores para as cotas que ficassem dentro dos valores mais usuais. A Figura 4.2 mostra o sistema, como desenhado e montado no programa, além das principais cotas, em milímetros, relevantes para a montagem.

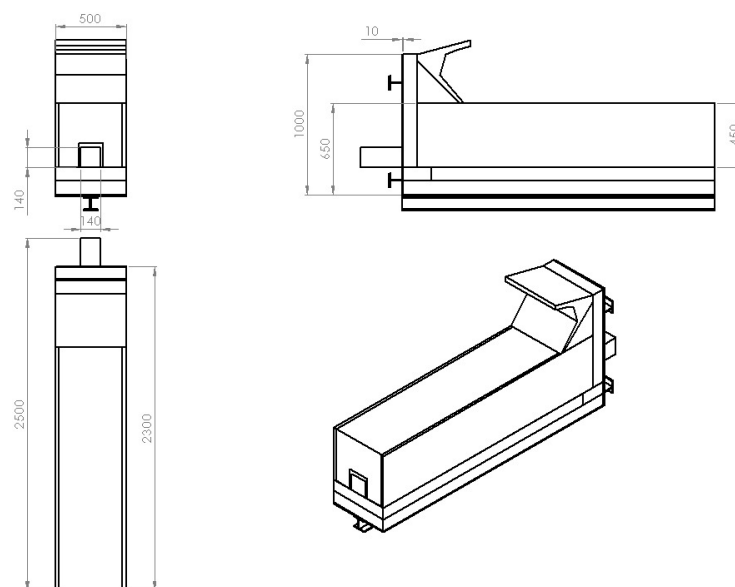


Figura 4.3: Geometria do sistema, como montada no programa SolidWorks, com as cotas mais relevantes

É importante observar que alguns volumes, apesar de representarem um material contínuo, apresentam subdivisões. Isso foi feito porque, ainda que a malha numérica tenha sido deixada para ser gerada posteriormente, já na etapa de construção foi necessário criar um modelo que permitisse uma malha com o mínimo possível de elementos deformados, que poderiam prejudicar a convergência dos cálculos ou, ainda, gerar respostas não representativas.

Após a construção do modelo geométrico, prosseguiu-se para a etapa de importação da geometria. Novamente, por razões de simplicidade, acessibilidade e familiaridade, optou-se por utilizar o pacote comercial ANSYS 14.0 de análise numérica. Este programa possui algumas particularidades que provaram ser grandes dificuldades no processo de análise, ainda que passíveis de resolução.

As etapas a seguir descritas, ao contrário das anteriores, que foram feitas apenas uma vez, foram realizadas individualmente para cada um dos modelos construídos, que totalizaram, ao fim do estudo, cinco sistemas individuais.

Importado o modelo e, após uma série de operações que tornavam o modelo coerente e trabalhável, os materiais foram atribuídos a cada um dos volumes que compõem o sistema. Atenção especial foi dada para esta etapa, pois as propriedades físicas, que mais tarde vieram a ser atribuídas, precisavam ser precisamente relacionadas aos seus devidos volumes.

A geração de malha, que a seguir é descrita, foi a etapa subsequente.

4.3 Elemento utilizado

O elemento escolhido foi o Solid226, por razões a seguir listadas:

- devido à complexidade da geometria do sistema, bem como a grandeza de suas dimensões, uma malha de elementos sólidos foi utilizada;
- muitas vezes, os volumes são gerados como elementos tetraédricos próximo a volumes com malha hexaédrica, e o elemento Solid226 possui propriedades numéricas que suavizam tal transição;
- por se tratar de um elemento de alta ordem, o Solid226 não necessita de uma malha muito refinada, devido a nós internos;

Essas características de solução podem ser encontradas em [Spyrakos e Raftoyannis, 1997; ANSYS, 1996].

A malha foi gerada dando preferência para elementos hexaédricos, pois estes resultam em malhas mais compactas e confiáveis [ANSYS, 1996], em termos de geometria dos elementos.

Atenção especial foi dada para avisos de violação de geometria e presença de elementos degenerados que pudessem comprometer a convergência ou até mesmo a geração de resultados. Foram evitadas práticas que pudessem levar a elementos degenerados, como divisão inadequada dos domínios.

Elementos degenerados e que violam as condições de geometria foram o motivo pelo qual o sistema foi modelado da maneira descrita. Considerou-se ainda aproveitar a simetria do sistema e modelar apenas metade dos volumes, em um corte longitudinal do sistema completo. Tal simplificação não foi feita, pois alguns volumes poderiam apresentar elementos degenerados na etapa de geração de malha.

4.4 Modelo termo-elétrico

Para a construção do modelo termo-elétrico, é necessário, primeiramente, compreender os fenômenos de troca térmica que ocorrem no sistema, o que será descrito a seguir. As equações e considerações teóricas aqui descritas foram retiradas de [Incropera, 2008].

4.4.1 Trocas térmicas por condução

As trocas térmicas por condução ocorrem devido às interações diretas entre as partículas que constituem o meio. Em nível macroscópico esse processo é descrito pela Lei de Fourier, a partir da qual se obtém a equação da difusão térmica. Essa equação descreve como as temperaturas são distribuídas em um sistema físico em que o calor é transferido via condução, indicando assim as trocas térmicas por condução que ocorrem dentro de um volume.

Considera-se, para efeitos de simplificação, que o corpo descrito é homogêneo e que não há movimentos macroscópicos em seu interior. A equação da difusão térmica, em coordenadas retangulares é apresentada da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q''' = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

onde k é a condutividade térmica do meio, q''' a taxa de geração de energia térmica no volume, ρ a densidade do meio, C o calor específico do meio e $\frac{\partial T}{\partial \bar{x}}$ as derivadas parciais da temperatura em função das coordenadas x , y e z e do tempo t .

Como o modelo estudado é assumido como permanente, a derivada parcial em relação ao tempo deve ser excluída, tornando a equação da difusão do calor um pouco mais simples:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q''' = 0 \quad (3)$$

4.4.2 Trocas térmicas por convecção

A convecção pode ser definida como a soma das trocas térmicas devido ao movimento molecular aleatório (difusão) e macroscópico (advecção), de um fluido. De grande interesse para a resolução do problema apresentado é a troca térmica por convecção natural, que representa o escoamento de um fluido, no caso o ar atmosférico, induzido por forças de empuxo oriundas das diferenças de densidade causadas pelas variações de temperatura do fluido. A equação que descreve a convecção é representada por:

$$q'' = \bar{h}_L \cdot (T_s - T_\infty) \quad (4)$$

onde q'' é o fluxo térmico, \bar{h}_L o coeficiente médio de troca de calor por convecção, definido a partir das condições de escoamento e da dimensão característica L , geometria da superfície em contato com o fluido e outras propriedades termodinâmicas do sistema, T_s a temperatura da superfície sólida em contato com o fluido e T_∞ a temperatura do fluido.

4.4.3 Trocas térmicas por radiação

A radiação engloba emissões de fótons em variadas frequências e comprimentos de onda. De interesse especial é a troca térmica devido a tais emissões, que existem a partir de qualquer corpo com temperatura não nula. Além disso, considera-se a absorção de calor devido às emissões de corpos na vizinhança.

O fluxo térmico que existe devido a diferenças de temperaturas entre um corpo e uma grande vizinhança é dado por:

$$q''_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (5)$$

onde q''_{rad} é o fluxo térmico devido a radiação, ε a emissividade da superfície radiante, σ a constante de Steffan-Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$), T_s a temperatura da superfície e T_{viz} a temperatura da vizinhança, em K.

Nas condições de trocas térmicas entre uma superfície pequena e uma vizinhança muito maior, isotérmica, que a envolve, a irradiação é considerada igual à emissão. Além disso, as superfícies são consideradas cinzas, ou seja, a absorptividade é igual à emissividade.

4.4.3 Campos elétricos

Devido às condições de operação do sistema, campos elétricos são gerados no interior dos domínios.

Estes campos, dados pelo gradiente de potencial elétrico, são descritos pela Equação de Laplace:

$$-\nabla \cdot \sigma(\nabla\Phi) = 0 \quad (6)$$

onde ∇ é o operador gradiente, σ a condutividade elétrica do meio, em Ωm^{-1} e Φ o potencial elétrico, em V .

4.4.4 Geração de calor por efeito joule

Muitas vezes, como no caso estudado, as condições de contorno não são as únicas responsáveis pelo estabelecimento da troca térmica no sistema. Existem casos em que há geração interna de energia térmica, seja pela conversão de energia elétrica por efeito Joule em um condutor com propriedades resistivas ou outro fenômeno.

Como no caso analisado há uma corrente sendo conduzida por uma barra de aço, ocorre geração de calor interna, que pode ser descrita pela equação:

$$q''' = \frac{I^2 \cdot R_e}{V} \quad (7)$$

onde q''' é taxa de geração de calor no meio condutor, em W/m^3 , I a corrente que passa por esse meio, R_e a resistência elétrica deste meio e V o volume total por onde a corrente é conduzida.

4.5 Condições de contorno

As condições de contorno utilizadas foram definidas a partir de modelos realizados por outros autores ou medições feitas em sistemas semelhantes.

Conforme estudado por Schneider, 2006, e Gusberti e Severo, 2009, existem perturbações no escoamento de alumínio líquido causadas por campos magnéticos induzidos de grande intensidade. Esses campos magnéticos são induzidos pelas altas correntes conduzidas pelas barras coletoras dos sistemas de redução de alumínio. Os estudos realizados apontaram para coeficientes de troca térmica convectiva para as condições de operação do sistema, e, devido à complexidade de tais fenômenos, suas particularidades fogem ao escopo deste trabalho.

Ainda, conforme Grjotheim e Welch, 1988, a reação de eletrólise é um processo endotérmico, que consome energia para manter-se. No entanto, este processo não foi considerado no modelo estudado, pois em condições normais de operação, a temperatura no topo dos blocos catódicos é regulada e mantida constante, sendo necessário apenas aplicar estas temperaturas como condições de contorno.

Utilizados como condições de contorno, os coeficientes de troca convectiva são utilizados com o valor de $800W/(m^2K)$ na interface do catodo e o alumínio líquido (não modelado devido à complexidade dos fenômenos já citados), $670W/(m^2K)$ na interface do ledge (banho de criolita congelado) e o banho líquido (também não modelado) e $600W/(m^2K)$ na interface do ledge com o alumínio líquido. As temperaturas aplicadas, para o

cálculo das trocas térmicas por convecção, são de 960°C para o alumínio líquido e o banho de sais [Severo e Gusberti, 2009].

A partir de medições feitas em indústrias de redução de alumínio nas proximidades e interior de sistemas redutores, os coeficientes convectivos na superfície superior do ledge e nas faces expostas ao ar do casco de aço estrutural são, respectivamente, $130W/(m^2K)$ e $10W/(m^2K)$. As temperaturas medidas nessas regiões são de 700°C para a superfície superior do ledge e 40°C nas faces do casco expostas ao ar atmosférico.

Os estudos realizados por Schneider e Gusberti e as medições realizadas em sistemas equivalentes apontaram para uma diferença de potencial elétrico igual a zero nas faces superiores dos catodos.

Quanto à corrente aplicada na barra coletora, os valores mais utilizados em cubas de redução ficam entre 100 kA e 400 kA, e adotou-se o valor representativo de 180 kA para este trabalho. Como a corrente medida é referente a uma cuba inteira, foi necessário dividir esse valor por 28, pois o sistema modelado representa 1/28 da cuba inteira.

Para considerações das trocas térmicas devidas à radiação de calor para o ambiente, assumiu-se uma emissividade de 0.8 para o aço exposto e uma temperatura de 40°C para o ambiente no entorno do sistema [Sun, 2004].

É importante observar, para efeitos de modelagem no programa ANSYS, que as condições de troca térmica convectiva e diferença de potencial são aplicadas nas áreas externas dos volumes do sistema, enquanto que as correntes foram aplicadas individualmente nos nós da face mais externa da barra coletora. No caso da aplicação das condições de radiação, foi necessário ainda criar uma malha com elementos externos que compartilham nós com os elementos mais externos dos volumes expostos ao ambiente do sistema. Após a criação da malha de elementos de radiação, um nó foi posicionado próximo aos volumes do sistema, com a temperatura de 40°C, com o qual as trocas térmicas por radiação são realizadas.

4.6 Propriedades dos materiais empregados

As propriedades termo-elétricas dos materiais empregados no modelo foram retiradas de [Gusberti, 2007; Severo e Gusberti, 2009; Sun, 2004; e Schacht, 2004] e possuem valores representativos dos materiais empregados em sistemas reais. As emissividades são atribuídas somente a materiais expostos ao ambiente. A Figura 4.3 mostra a posição dos materiais na geometria do modelo.

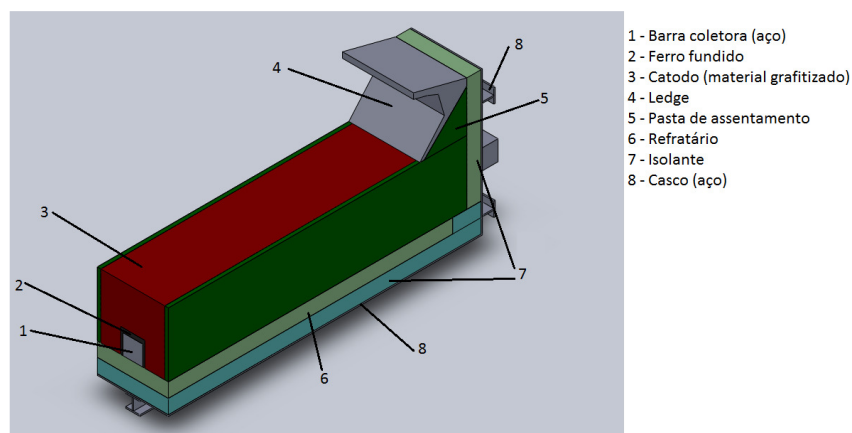


Figura 4.4: Materiais e suas respectivas posições no modelo

Devido à não-linearidade do problema, algumas propriedades são utilizadas com variações de acordo com a temperatura. A Tabela 4.1 mostra as propriedades utilizadas comuns a todos os modelos rodados. Apenas as propriedades dos isolantes térmicos foram modificadas conforme o modelo analisado. O isolante aqui apresentado foi utilizado somente para verificar a independência de malha

Tabela 4.1: Propriedades dos materiais comuns a todos os modelos

Material	Temperatura (°C)	Emissividade	Densidade (kg/m ³)	Resistividade (Ωm)	Condutividade térmica (W/mK)
Aço (barras e casco)	100	0.8	7800		44.3
	200			2.3E-7	41.4
	300				38.5
	400				35.6
	600			7.4E-7	
	900			1.1E-7	
	1000			1.23E-6	35.6
Ferro Fundido	0	0.8	7000	1.64E-6	63.9
	27				63.9
	127				58.7
	327				48.8
	527				39.2
	727				31.3
	5000				31.3
Catodo	30	-	1930		9.5
	200			16E-6	
	600			15E-6	
	1000			16E-6	12
Refratários	300	-	2150	1E7	1.23
	600				1.49
	900				1.5
	5000				1.5
Pasta de assentamento	30	-	1500	7E-4	6
	5000				6
Isolante	200	-	1050	1E7	200
	400				400
	600				600
Ledge	300	-		1E7	1.36
	500				1.5
	700				2.03
	900				2.94
	5000				2.94

Os materiais isolantes aplicados em cada um dos modelos estudados são classificados conforme o teor de alumina e possuem valores próprios de condutividade térmica. Estes materiais foram escolhidos porque são bastante representativos quanto às propriedades termofísicas, proporcionando um estudo das características de distribuição de temperaturas e corrente no sistema de forma abrangente. A Tabela 4.2 mostra as propriedades dos materiais empregados.

Tabela 4.2: Propriedades dos diferentes isolantes estudados

Isolante (teor de Al_2O_3)	Temperatura	Emissividade	Densidade (kg/m^3)	Resistividade (Ωm)	Condutividade térmica (W/mK)
20%	200	-	400	1E7	0.15
	400				0.16
	600				0.17
	800				0.18
40%	200	-	800	1E7	0.38
	400				0.4
	600				0.42
	800				0.5
90%	200	-	1200	1E7	1.2
	400				1.0
	600				0.8
	800				0.7

É interessante notar que o isolante com 90% de teor de alumina apresenta uma condutividade térmica crescente com a temperatura, um comportamento inverso ao dos outros dois materiais analisados.

4.7 Estudo de independência de malha

Para verificar a independência do refinamento de malha, dois modelos foram feitos, cada qual com um tamanho de elemento pré-determinado: o primeiro, de malha mais grosseira, com elemento de tamanho 50mm e o segundo, de malha mais refinada, com elemento de tamanho 30mm. Esses valores foram escolhidos por representar bem a diferença de refino de malha, dadas as dimensões do modelo, da ordem de 1,0 m.

Quanto ao número de nós e elementos, o primeiro possui aproximadamente 40000 nós e 14000 elementos e o segundo, aproximadamente 180000 nós e 57000 elementos. É importante observar que o número de equações a ser resolvido pelo computador é proporcional ao número de nós e graus de liberdade por nó, que no modelo estudado são dois: fluxo de calor e fluxo de corrente. Como os dois modelos foram rodados em análise acoplada termo-elétrica, ambos possuíam 2 graus de liberdade por nó: temperatura e corrente. Tais valores levam a 80000 equações para o primeiro modelo e 360000 para o segundo, aproximadamente. Essa diferença reflete-se no custo computacional e tempo de processamento: enquanto que o primeiro modelo obteve resultados em minutos, o segundo necessitou de horas.

Após a resolução dos dois modelos, a etapa de pós-processamento gráfico foi iniciada e os resultados foram analisados. Para representar bem a diferença de resultados obtidos, escolheu-se analisar o campo de temperaturas, além de tratar-se de resultados cruciais para obter conclusões corretas quanto ao tema abordado. Especificamente, a distribuição de temperaturas e valores mínimos.

Ao analisar os campos de temperaturas dos dois modelos, observou-se que as diferenças são insignificantes. As isotermas são praticamente coincidentes e os valores mínimos de temperatura apresentam uma discrepância de aproximadamente $1^{\circ}C$, um valor em torno de 0.1% dos valores observados.

Seria possível, inclusive, utilizar uma malha ainda menos refinada, de elemento maior, e ainda assim observar resultados muito semelhantes, mas optou-se por não fazê-lo porque uma malha muito grosseira poderia gerar elementos muito distorcidos, tendo em vista que alguns volumes têm dimensões bastante reduzidas e a geometria é complexa em algumas regiões.

A Figura A.1, presente no apêndice deste trabalho, demonstra os campos de temperaturas dos dois modelos, lado a lado, para efeitos de comparação.

4.8 Critérios de convergência e estimativa dos resíduos

Para avaliar se os cálculos numéricos realizados finalmente convergiram para um valor aceitável, o programa ANSYS possui uma série de critérios, que podem inclusive ser modificados pelo operador [ANSYS, 1996].

Assim que o processo de cálculo numérico se inicia, o programa faz uma estimativa de valores críticos de, no caso estudado, fluxo de calor e fluxo de corrente, indicados pelas unidades $W/(m^2K)$ e A/m^2 , respectivamente. Esses valores críticos são estimados a partir do somatório de todas as forças aplicadas inicialmente, multiplicado por um valor de tolerância, que por definição no programa é igual a 1×10^{-5} .

Iniciados os cálculos iterativos, o programa calcula a soma RMS de todos imbalanços do sistema. A soma RMS é realizada extraindo a raiz quadrada da soma dos quadrados de cada imbalanço. Isso é feito analisando os fluxos térmicos e elétricos em cada um dos nós do sistema e fazendo a raiz quadrada da soma dos quadrados dos imbalanços, que são a diferença de fluxo na entrada e saída de cada nó.

Ao fim de cada iteração, o programa compara o somatório dos imbalanços, ou resíduos, com o critério de convergência, calculado a partir das condições iniciais. Quando os resíduos ficam abaixo do valor crítico, o programa considera que a solução convergiu e termina o processo de cálculo numérico.

A Figura 4.4 mostra o gráfico de convergência para um dos casos analisados. Como se pode observar, as curvas de resíduo cruzam seus respectivos critérios de convergência, caracterizando o fim da etapa de processamento.

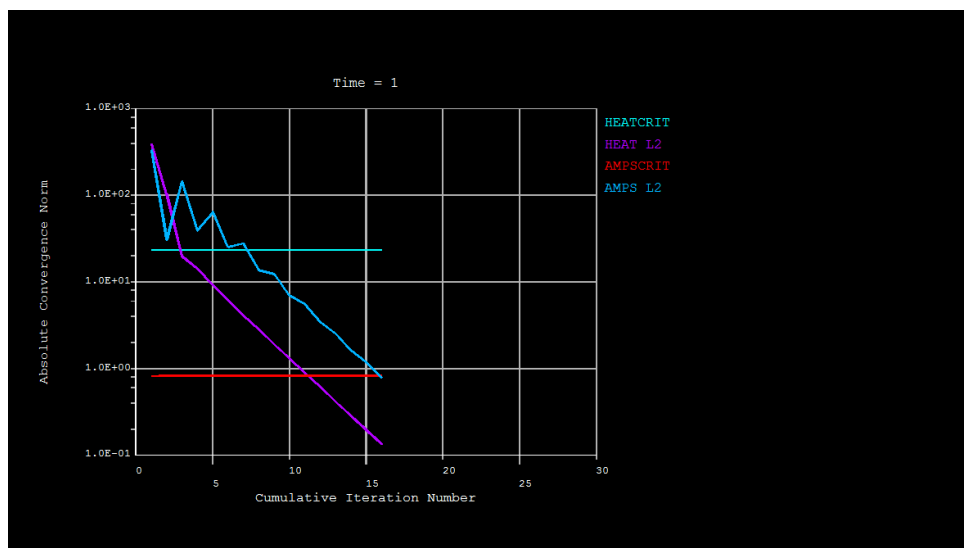


Figura 4.5: Gráfico de convergência representando os resíduos e critérios calculados

As estimativas de erro total ficam então em torno de 1×10^{-1} para o somatório dos imbalanços de fluxo térmico e em aproximadamente 1×10^0 para o somatório dos imbalanços de fluxo elétrico. É necessário lembrar que esses valores são calculados a partir do somatório de todos os imbalanços, definidos individualmente em cada nó do modelo.

A convergência foi atingida, conforme critérios já explicados, em 16 iterações, o que representa um número razoável de iterações.

Todas as etapas descritas que envolvem o uso de ferramenta computacional foram realizadas em um microcomputador com processador quad-core, 3.6 GHz, 4 GB RAM, HD 1TB.

4.9 Medições em sistemas reais

De acordo com Sørli e Øye, os valores de temperatura ficam em torno de 900°C nos materiais mais internos do sistema de redução e aproximadamente 300°C para os materiais de revestimento em contato com o casco de aço. As temperaturas mais externas no casco estrutural também não devem passar dos 150°C para materiais usuais de isolamento.

Medições realizadas em fornos reais [Sørli e Øye, 1994] apontam para os mesmos valores: temperaturas em torno de 100°C para o casco externo estrutural, 900°C para os materiais mais internos, como porção superior dos catodos, pasta e barra condutora e 300°C para os refratários.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resultados termo-elétricos obtidos

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos utilizando materiais e métodos já explicados.

A prioridade de análise foi o campo de temperaturas resultante, pois este determinaria os efeitos de cada um dos diferentes isolantes de maneira mais representativa. As temperaturas obtidas foram analisadas com o intuito de determinar o material isolante mais efetivo para a geometria e finalidades estudadas.

O primeiro modelo, simulado com o material mais isolante dentre os estudados, com teor de 20% de alumina em sua composição, resultou no campo de temperaturas observado na Figura A.2, que mostra as distribuições no casco estrutural, barra condutora e sistema completo. Os resultados são discutidos na seção 5.2 Discussão dos resultados.

O segundo modelo, com isolante de 40% de teor de alumina, obteve as temperaturas demonstradas na Figura A.3. O terceiro modelo, por sua vez, constituído de isolante com 90% de alumina na composição, resultou nas temperaturas apresentadas na Figura A.4.

5.2 Discussão dos resultados

De acordo com os resultados aplicados, algumas conclusões podem ser obtidas referentes ao comportamento térmico do sistema analisado.

As distribuições de campo elétrico e corrente não são discutidas em detalhes neste trabalho, pois o objetivo principal era analisar os campos de distribuição de temperaturas, mas pode-se dizer que os resultados elétricos obtidos correspondem ao esperado conforme apresentado na literatura. As intensidades de corrente se distribuíram ao longo do sistema de maneira a se concentrar na barra de aço condutora, pois os materiais no entorno possuem valores elevados de resistividade elétrica. Valores obtidos quanto ao potencial elétrico também correspondem às expectativas iniciais.

Quanto ao campo de temperaturas, é possível observar que quanto menor a condutividade térmica do material, ou seja, quanto mais isolante o material, menores as temperaturas no exterior do casco estrutural e maiores as temperaturas na porção interior da barra de aço condutora.

Para o modelo com isolante de 20% de alumina, os valores de temperatura no casco externo ficaram entre 100°C e 150°C, enquanto que as temperaturas na barra condutora variaram de 200°C a 900°C, aproximadamente.

No modelo com isolante de 40% de alumina, as temperaturas do casco apresentaram valores entre 130°C e 220°C e a barra, entre 220°C e 880°C, aproximadamente.

Com o uso do material isolante com 90% de alumina na composição, as temperaturas externas do casco estrutural ficaram entre 180°C e 290°C e a barra, entre 220°C e 840°C.

Em primeira análise, é tentador concluir que o isolamento menor é mais eficiente, tendo em vista que a dissipação de calor na barra é melhor e, portanto, suas temperaturas mais baixas, o que ocasiona uma perda menor de potencial elétrico devido a valores mais reduzidos de resistividade. Se a barra fosse analisada isoladamente, de fato, concluir-se-ia que o material menos isolante é melhor por razões de eficiência elétrica.

Uma observação mais cuidadosa, porém, aponta para uma conclusão contrária. Embora as temperaturas na barra sejam menores para materiais menos isolantes de calor, essa diferença é muito pequena. Além disso, as temperaturas externas do casco apresentam valores muito elevados para os materiais menos isolantes de calor, o que pode apresentar riscos de operação e para a integridade estrutural do sistema.

Seria possível estabelecer uma relação de isolamento e temperaturas ótima para o sistema estudado, mas os materiais aqui apresentados sugerem apenas uma solução viável: o uso do material com teor de 20% de alumina. É preciso, no entanto, tomar cuidado. Não necessariamente materiais com altos valores de isolamento são os mais indicados para este tipo de problema, pois, como já dito, os materiais interiores do sistema podem ser comprometidos por temperaturas muito elevadas. Como no caso estudado, as temperaturas internas não ultrapassaram os limites estabelecidos pela literatura [Grjotheim e Welch, 1998; Sørli e Øye, 1994], o material mais isolante é o mais efetivo.

5.3 Análise de custos

Primeiramente, foi considerada a possibilidade de alterar a corrente fornecida ao sistema em virtude da variação de isolamento térmico fornecido pelos diferentes materiais empregados. No entanto, constatou-se que a variação de corrente, no sentido de diminuir sua intensidade quanto maior a capacidade de isolamento, não seria uma prática recomendável, pois isso diminuiria a produção de alumínio, prejudicando a reação de eletrólise descrita pela equação (1). Além disso, a geração de calor no banho devido a tal corrente é considerada no trabalho como independente da corrente aplicada [Grjotheim e Welch, 1988].

Com isso, não foi analisada a variação de custos operacionais devido a um isolamento térmico maior e a análise de efetividade restringiu-se às características termofísicas dos materiais utilizados. Seria possível realizar um estudo de balanço térmico e encontrar a relação de intensidade de corrente por temperaturas, variando a corrente aplicada ao sistema. Essa prática, porém, não apresentaria resultados factíveis, tendo em vista que um aumento da corrente pode ocasionar uma distribuição de temperaturas danosa aos materiais construtivos enquanto que uma redução induziria a uma produção menor de alumínio. Dada a geometria e propriedades analisadas, não é vantajoso variar a corrente aplicada.

6. CONCLUSÕES

Observou-se que as temperaturas externas do casco estrutural variam bastante conforme o isolamento térmico utilizado, devendo haver um cuidado especial para que a estabilidade estrutural não seja comprometida por temperaturas muito elevadas. Viu-se também que as temperaturas da barra condutora variaram, ainda que em um intervalo pequeno. É notável que os valores de resistividade elétrica, dependentes da temperatura, aumentam as perdas energéticas do sistema conforme aumenta a temperatura: a barra torna-se menos eficiente em temperaturas mais elevadas.

Devido a esse comportamento observado, é necessário tomar cuidado na escolha do isolante empregado. Ainda que neste estudo tenha ficado claro que o material mais efetivo é o

mais isolante, também ficou evidente a importância de um estudo criterioso quanto aos efeitos térmicos ocasionados pela presença de diferentes materiais no sistema. É razoável supor que, em uma situação semelhante, o uso de materiais com isolamento muito elevado podem vir a causar danos ao sistema e reduzir seu rendimento elétrico, sem necessariamente garantir uma maior segurança estrutural.

Para futuros trabalhos, poderia ser considerada a análise de outros materiais isolantes, com propriedades diferentes dos já estudados. Seria possível, inclusive, estabelecer qual material, dentre outras categorias, é ainda mais adequado à operação do sistema. Uma análise de custos de instalação e operação é também recomendável.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Incropera, F. P. “Fundamentos de Transferência de Calor e Massa”, LTC, 6ª Edição, 2008

Grjotheim, K., Welch, B. J. “Aluminium Smelter Technology”, 2nd Edition, 1988

Gusberti, V. “Modelamento Matemático da Instabilidade Magnetohidrodinâmica em Cubas de Redução de Alumínio”, Porto Alegre, 2007

Schacht, C. A., “Refractory Handbook”, Marcel Dekker, 2004

Schneider, A. F. “Desenvolvimento e Validação de uma Metodologia de Análise Eletromagnética de Cubas de Alumínio Utilizando os Pacotes Comerciais ANSYS 9.0 e Algor 12.28”, Porto Alegre, 2006

Severo, D. S. e Gusberti, V., “A modeling approach to estimate bath and metal heat transfer coefficients”, Porto Alegre, 2009

Spyrakos, C. C., Raftoyannis, J. “Linear and Nonlinear Finite Element Analysis in Engineering Practice”, Algor Inc., 1997

Sun, Y. “3D Modeling of Thermal and Sodium Expansion in Soderberg Aluminium Reduction Cells”, TMS Light Metals, 2004

Sørli, M., Øye, H. A., “Cathodes in Aluminium Electrolysis”, Aluminium-Verlag 2nd Edition, 1994

Expanded ANSYS Workbook, ANSYS Inc., 1996

APÊNDICE

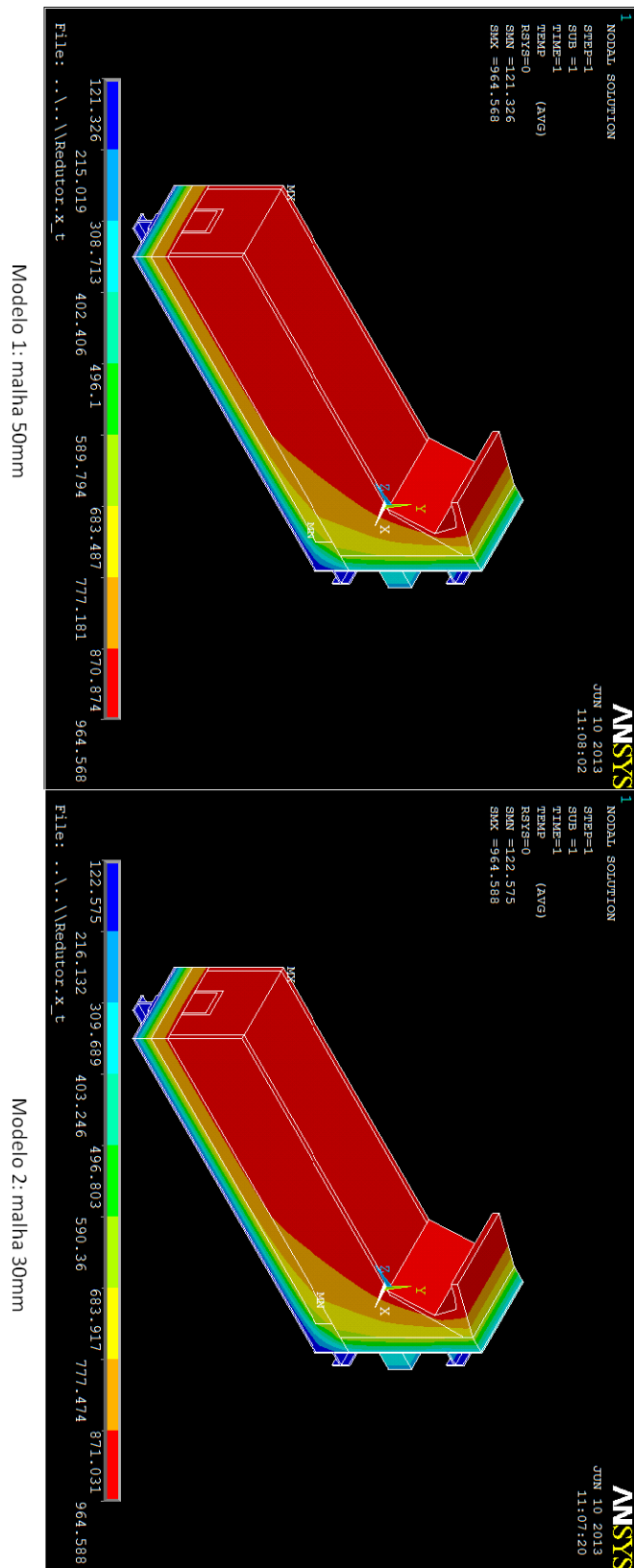


Figura A.1: Comparação de campos de temperatura das malhas estudadas

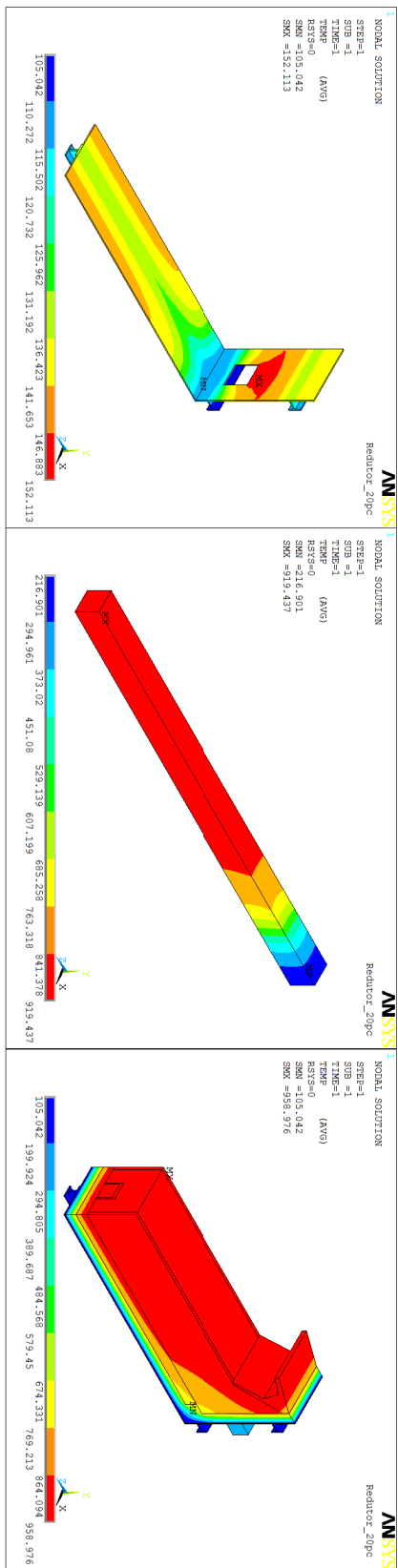


Figura A.2: Campos de temperaturas obtidos para isolante 20%

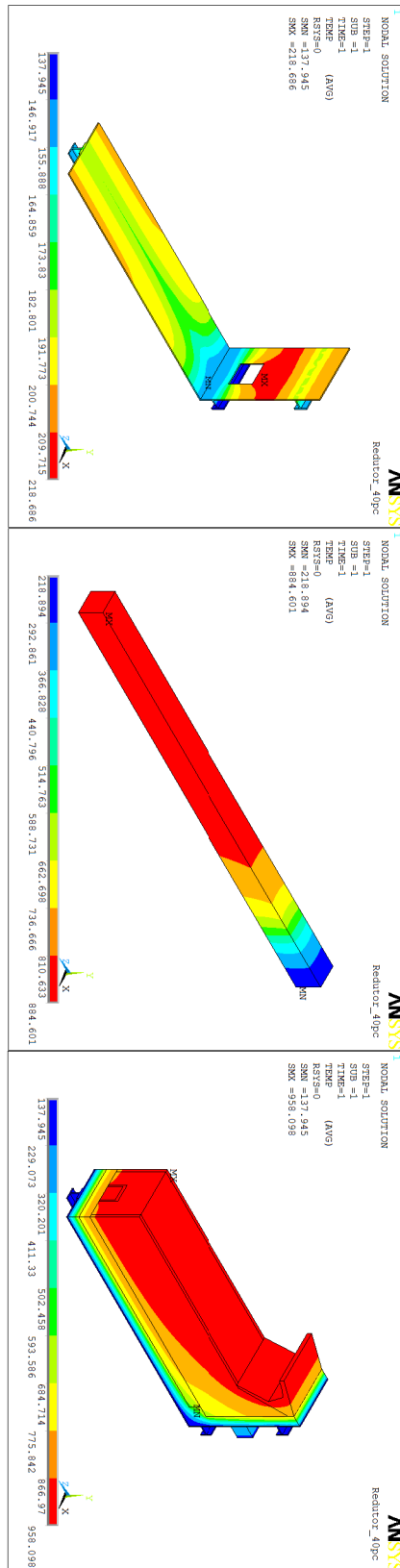


Figura A.3: Campos de temperaturas obtidos para isolante 40%

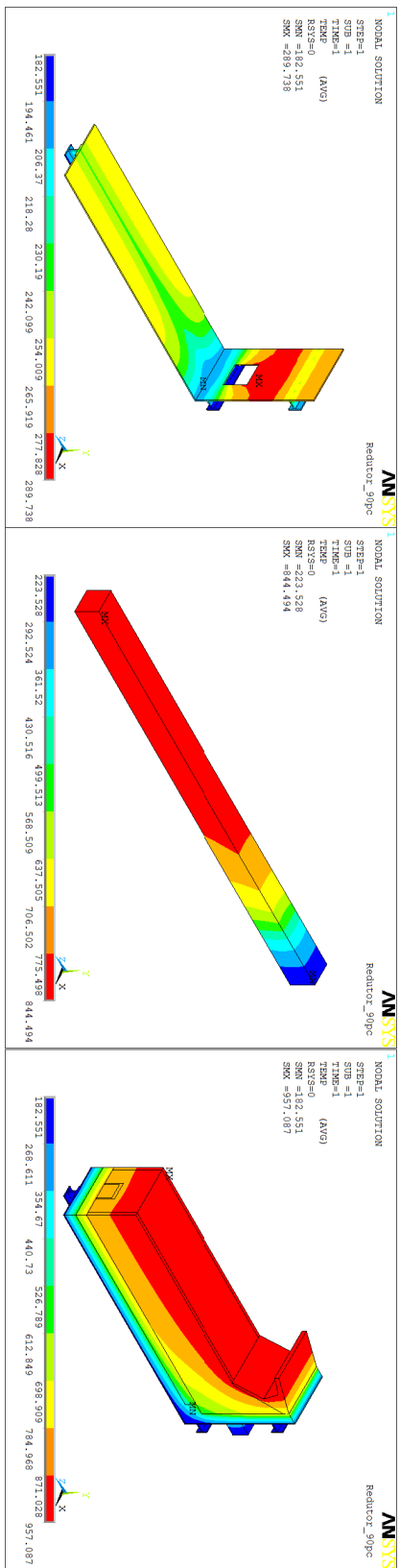


Figura A.4: Campos de temperaturas obtidos para isolante 90%