

# ANÁLISE TERMO-ELÉTRICA DO CONJUNTO HASTE-ANODO UTILIZADO NA INDÚSTRIA DE ALUMÍNIO. PaperCIT04-0402

## **Adriano G. Batista.**

Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará. Rua Augusto Corrêa, Guamá, Belém – PA – Brasil, CEP: 66075-110. e-mail: [agb@ufpa.br](mailto:agb@ufpa.br)

## **Fábio A. Cunha.**

Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará. Rua Augusto Corrêa, Guamá, Belém – PA – Brasil, CEP: 66075-110. e-mail: [alfaia@yahoo.com.br](mailto:alfaia@yahoo.com.br)

## **Manoel J. S. Sena.**

Instituto de Estudos Superiores da Amazônia - Anexo 7, Av .Gov. José Malcher, 1148, Belém – PA – Brasil, CEP 66055-260. e-mail: [mjssena@iesam.com.br](mailto:mjssena@iesam.com.br)

**Resumo.** Neste trabalho é feita uma análise termo-elétrica do conjunto haste-anodo utilizado no processo da produção do alumínio através do método de elementos finitos. O método de acoplamento entre as análises elétrica e térmica é o indireto. Neste método alguns resultados obtidos na análise elétrica são utilizados como carregamento na análise térmica. É dada ênfase ao acoplamento que é a região que uni fisicamente a haste e anodo. As características geométricas e físicas do acoplamento ditam, entre outras coisas, as características de condução de corrente elétrica, transferência e dissipação de calor a entre a haste e o anodo. As simulações realizadas dão como resultados os campos de distribuição de potencial elétrico, perda de calor por efeito joule e distribuição de temperatura. Os resultados encontrados auxiliam na determinação dos locais onde podem ser feitas possíveis modificações no conjunto haste-anodo de modo que se tenha uma diminuição da dissipação de calor. Este trabalho é fruto de uma cooperação UFPA-ALBRAS.

*Palavras-chave:* elementos finitos, acoplamento, haste, anodo, condução de corrente elétrica.

## **1. Introdução**

Neste trabalho será descrito o modelo em elementos finitos tridimensional do acoplamento haste-anodo, sobre o qual serão feitas análises elétricas. Este tipo de problema pode ser resolvido utilizando um procedimento numérico, como o método de elementos finitos. De fato, a análise por elementos finitos é bem sucedida em problemas envolvendo carregamentos e geometrias complexas (Batoz, 1995 e Bathe, 1996).

Dupuis (1998) fez uma revisão das vantagens e desvantagens de modelos 2D e 3D utilizados na modelagem de células de redução eletrolíticas.

Vogelsang et al (1997) discute simulações magneto-hidrodinâmica em células de alumínio usando um modelo tridimensional gerado no ANSYS. Seu propósito era demonstrar melhorias no desempenho e estabilidade das células. Obtido pela modernização da planta de Rheinewerk.

Sherbinin et al (2000) desenvolveu um software utilizando modelos 2D e 3D para otimização de células e desenvolvimento de novos projetos. Eles desenvolveram softwares para vários processos, como: campos termo elétricos; influência dos parâmetros de projeto no regime de energia;

Neste trabalho foi utilizado o software ANSYS para realização das análises por elementos finitos. O modelo gerado pode ser utilizado para prever a distribuição de potencial elétrico e perda de calor por efeito joule.

A ALBRAS – Alumínio Brasileiro S. A., localizada no estado do Pará consome regularmente 615MW de energia elétrica, sendo uma das maiores consumidoras do país. A ALBRAS contribuiu para este trabalho acadêmico permitindo que os autores acessassem dados associados a sua linha de produção.

O conjunto estudado é composto de uma haste de alumínio e um anodo que é constituído de coque e piche que é utilizado como aglutinante.

## 2. Acoplamento Haste-Anodo

A haste possibilita a colocação e retirada do anodo da célula eletrolítica além de conduzir a corrente elétrica até o anodo. A unidade completa consiste da haste, suporte e pino. O acoplamento entre a haste e o anodo é feito através de chumbamento. Na operação de chumbamento o pino é inserido no orifício apropriado do anodo e em seguida é vazado ferro fundido para preencher os espaços vazios existentes. A fig. 1 mostra a vista frontal do conjunto.

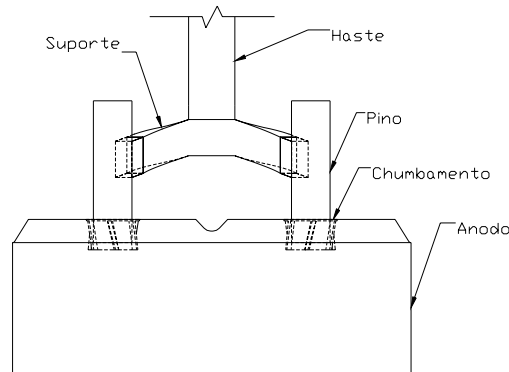


Figura 1. Vista Frontal do conjunto haste-anodo.

## 3. Modelamento Matemático

Nesta parte são mostradas as equações diferenciais que descrevem o fluxo de corrente elétrica e transferência de calor no conjunto haste-anodo. Neste trabalho é utilizado um código comercial que resolve tais equações utilizando o método de elementos finitos.

### 3.1 Distribuição de Potencial Elétrico.

A equação que descreve a distribuição de potencial elétrico, em coordenadas cartesianas, para o caso de regime estacionário, sem termos fontes é dada abaixo:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

Onde:  $\Phi$  é o potencial elétrico (Volts) e  $\rho$  a resistividade elétrica ( $\Omega$  mm).

#### 3.1.1 Geração de Calor Por Efeito Joule

A corrente que passa pelo conjunto haste-anodo, devido à sua resistência elétrica, gera uma certa quantidade de calor conhecida por efeito Joule.

Sabendo-se que a densidade de corrente  $J$  é dada pela lei de Ohm:

$$\{J_{ii}\} = [\rho]^{-1} \{E\} \quad (2)$$

A perda de potência por unidade de volume,  $P$ , é dada por:

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\rho] \{J_{ii}\} \{J_{ii}\} \quad (3)$$

Onde:  $n$  é o número de Pontos de Integração

$[\rho]$  é a matriz de Resistividade

$\{J_{ii}\}$  é a densidade de corrente total no elemento no ponto de integração  $i$

Esta perda de potência é igual ao calor gerado por unidade de volume. O calor gerado é utilizado como dado de entrada na análise térmica.

### 3.2 Distribuição de Temperatura

A eq. 4 é a forma geral da equação da difusão de calor em coordenadas cartesianas assumido propriedades térmicas isotrópicas, condutividade térmica constante e processo em regime permanente.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{Q}{k} \quad (4)$$

Onde: T é a temperatura, Q a taxa de geração de energia por unidade de volume e k é a condutividade térmica.

### 4. Análise Acoplada Indireta

O método de acoplamento entre as análises elétrica e térmica utilizado neste trabalho foi o indireto. Neste método, diferentes bases de dados e arquivos de resultados são construídos para cada análise. As análises são feitas separadamente e os resultados obtidos em uma análise são usados como condições de contorno na próxima análise.

Este tipo de acoplamento é aplicado quando a análise é considerada fracamente acoplada. Para saber se a análise é fracamente acoplada ou não, as relações causa-efeito devem ser analisadas e se os resultados de uma análise não influenciarem consideravelmente na outra, a aproximação indireta pode ser utilizada.

A fig. 2 mostra o fluxograma de dados para uma análise indireta. Cada base de dados contém o modelo de elementos finitos adequado. No caso do software utilizado, as malhas devem ter o mesmo número de nós e elementos.

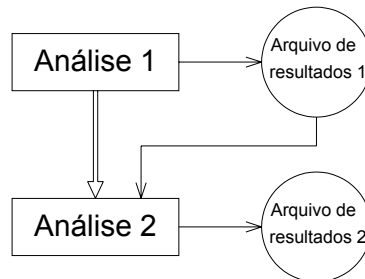


Figura 2. Fluxograma de dados de uma análise acoplada indireta.

### 5. Modelamento Geométrico

#### 5.1 Geometria do Modelo Haste-Anodo

O modelo estudado consiste do conjunto anodo-haste de 4 pinos conforme mostra a figura 2. Como o conjunto haste-anodo apresenta simetria em relação a dois eixos, foi possível utilizar um modelo com apenas um quarto da geometria total (Cook, 1989).

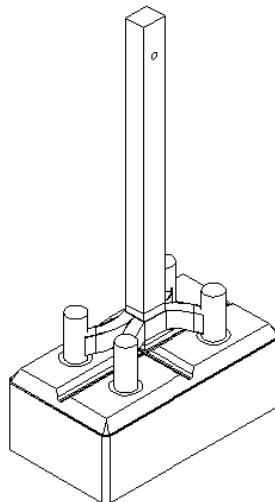


Figura 3. Desenho em 3D do modelo haste-anodo estudado.

## 5.2 Geração da Geometria do Conjunto Haste-Anodo

Neste trabalho, para geração da geometria desejada, foi utilizada a linguagem paramétrica do ANSYS. Para a geração da geometria foi escrito um arquivo onde constavam todos os procedimentos para a geração do modelo geométrico numa seqüência pré-definida. A parametrização do anodo e da haste foi realizada sem grandes dificuldades, com ressalva ao acoplamento (chumbamento) que mostrou um grau de dificuldade considerável. Para geração da geometria do chumbamento foram escritas equações que davam as coordenadas dos pontos que foram utilizados na definição de splines. Essas splines juntamente com perfis feitos de curvas e linhas serviram de base para formação das ranhuras do chumbamento. A partir da estrutura de linhas citada, foram geradas áreas e então volumes (figura 4).

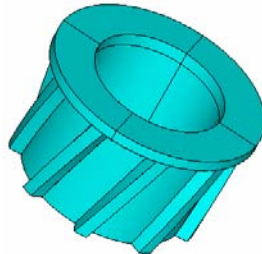


Figura 4. Geometria do chumbamento (acoplamento) entre a haste e o anodo.

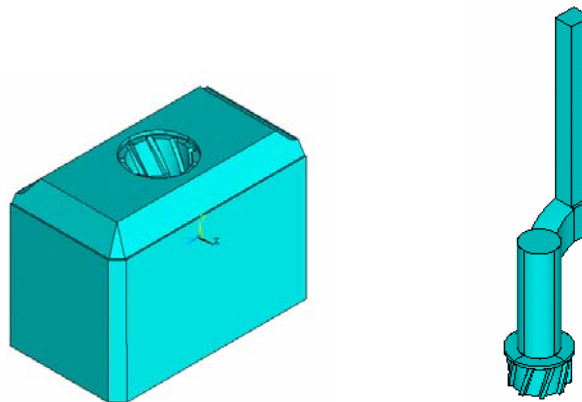


Figura 5. Anodo com orifício (à direita) e Haste com chumbamento (à esquerda).

## 6. Materiais

As propriedades físicas dos materiais da haste, do anodo e do chumbamento são apresentadas na tabela 1 (dados fornecidos pela ALBRAS):

Tabela 1. Propriedades dos Materiais.

Propriedades dos materiais	Haste (Alumínio AA 6106)	Anodo (piche e coque)	Chumbamento (ferro fundido)	Suporte e pino (Aço 1020)
Resistividade Elétrica ( $\Omega$ mm)	3,0E-5	5.13E-2	1.69E-4	1.69E-4
Condutividade Térmica(J/°C)	210	3,54	50	50

## 7. Malhagem do Modelo

A malhagem da geometria do modelo foi realizada com o elemento da biblioteca de elementos do Ansys chamado de *sólido 69* que é um elemento que tem capacidade de condução de corrente elétrica e transferência de calor tridimensional. Calor Joule gerado pelo fluxo de corrente também é incluído no balanço de energia. O elemento tem oito nós com dois graus de liberdade, temperatura e voltagem, com funções de interpolação lineares. A malhagem realizada foi do tipo não estruturada. Procurou-se adequar diferentes tamanhos de elementos de acordo com a

necessidade de cada região do conjunto. O acoplamento foi a região onde a malha foi mais refinada. A fig. 6 mostra o modelo malhado.

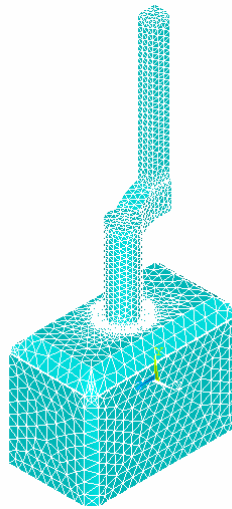


Figura 6. Modelo com a malha utilizada para análise.

## 8. Condições de Contorno

### 8.1 Condição de Contorno da Análise Elétrica

Como foi utilizado um quarto da geometria total, foi aplicado, conseqüentemente, um quarto da corrente elétrica total. Para um quarto do conjunto anodo-haste tem-se uma corrente de 2,1805kA. Para que essa corrente fosse aplicada no modelo foi necessário que os nós tanto da entrada como da saída de corrente elétrica tivessem seus graus de liberdade acoplados (fig. 7). A entrada da corrente se dava pela extremidade da haste e a saída pela parte inferior do anodo (fig. 7). Foi aplicada uma densidade de corrente constante na área da extremidade da haste para indicar que o fluxo corrente era perpendicular à mesma. Com exceção das áreas de entrada e saída, foi considerado que não havia saída, ou entrada, de corrente pelas demais áreas. Essa condição foi assegurada através da imposição de gradientes de potencial elétrico nulo nas superfícies citadas.

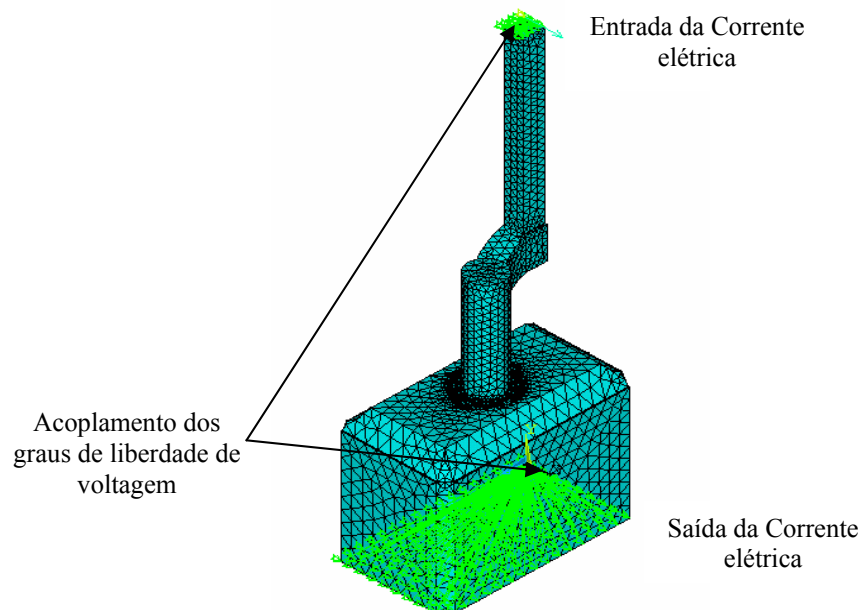


Figura 7. Acoplamento dos graus de liberdade.

## 8.2 Condição de Contorno da Análise Térmica

As condições de contorno neste caso foram o calor gerado por efeito joule calculado na análise elétrica, duas temperaturas de referência aplicadas nas superfícies mostradas na fig. 8, medidas no campo e fornecidas pela ALBRAS. Foram consideradas adiabáticas as demais superfícies do conjunto.

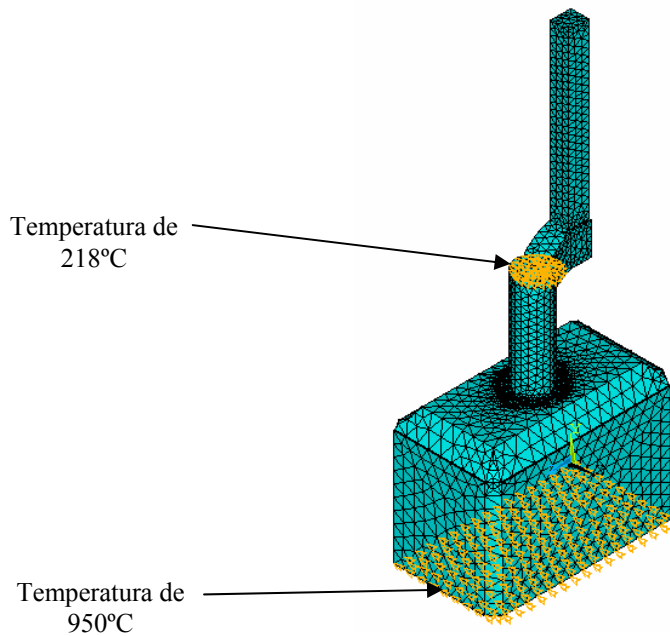


Figura 8. Condições de contorno da análise elétrica

## 9. Resultados

Os resultados da análise por elementos finitos são apresentados na forma de figuras com mapas de cores. As análises mostradas abaixo foram realizadas utilizando um chumbamento com nove ranhuras.

As fig. 9, 10 e 11 mostram a distribuição de potencial elétrico no conjunto haste-anodo em Volts. Pode ser notado que a queda de potencial é mais efetiva no anodo do que na haste. A fig. 12 mostra o calor gerado por efeito joule no orifício do anodo que recebe a haste.

A fig. 13 mostra a distribuição de temperatura no conjunto haste-anodo e a fig. 14 mostra a distribuição de temperatura somente no anodo.

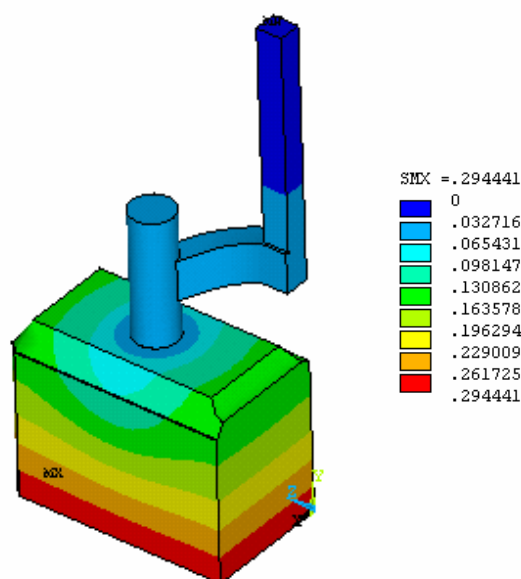


Figura 9. Mapa da distribuição de tensão elétrica em Volts – Vista 3D.

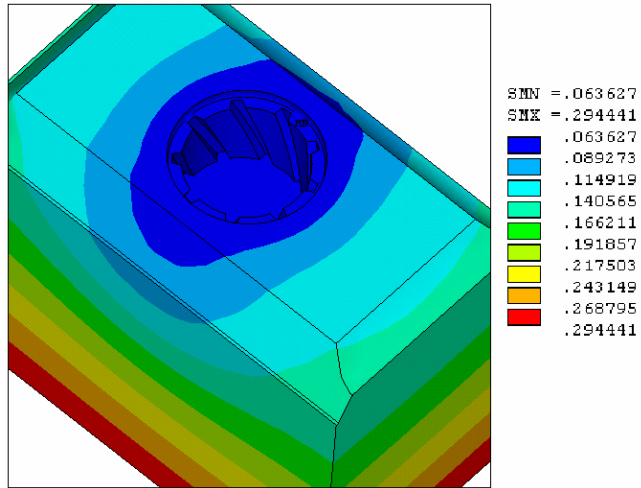


Figura 10. Mapa de distribuição de potencial elétrico no anodo em Volts.

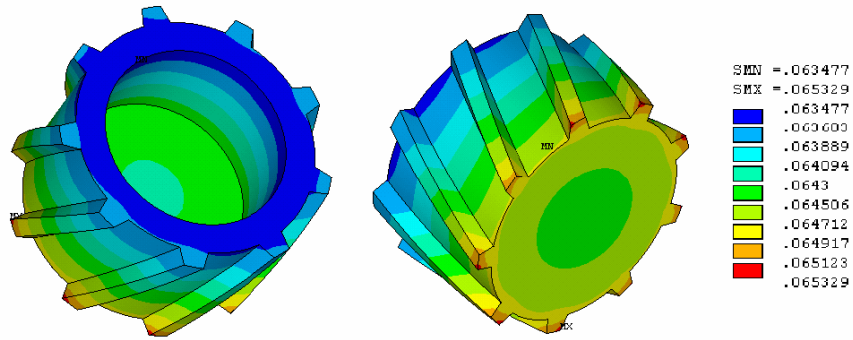


Figura 11. Mapa de distribuição de potencial elétrico no chumbamento em Volts.

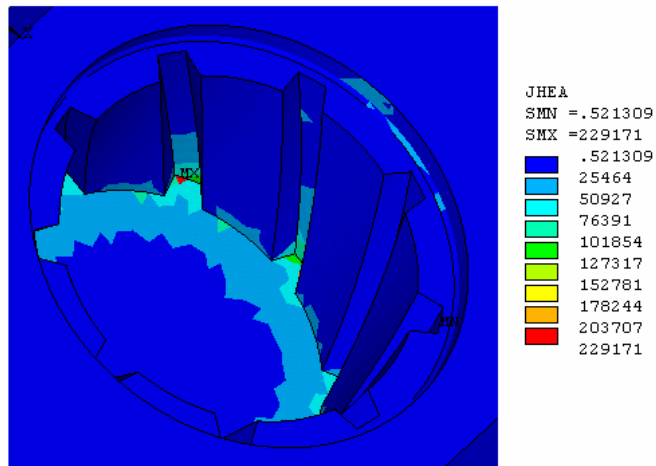


Figura 12. Detalhe do Mapa de distribuição de calor por efeito Joule no orificio do anodo

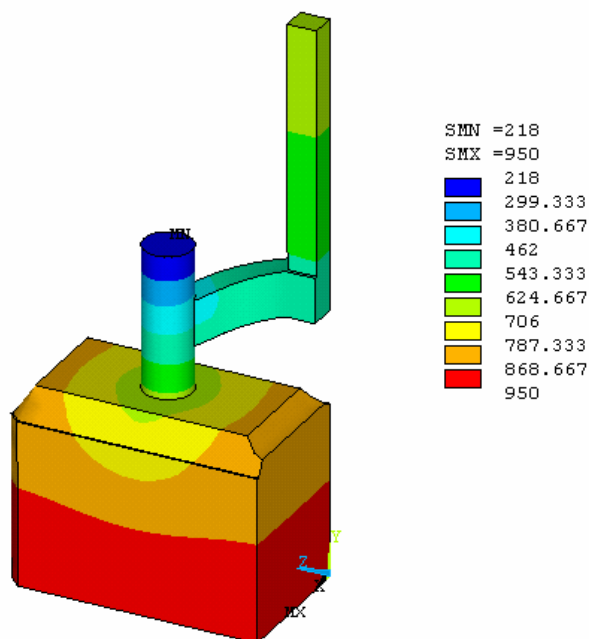


Figura 13. Mapa da distribuição de temperatura em graus Celsius – Vista 3D.

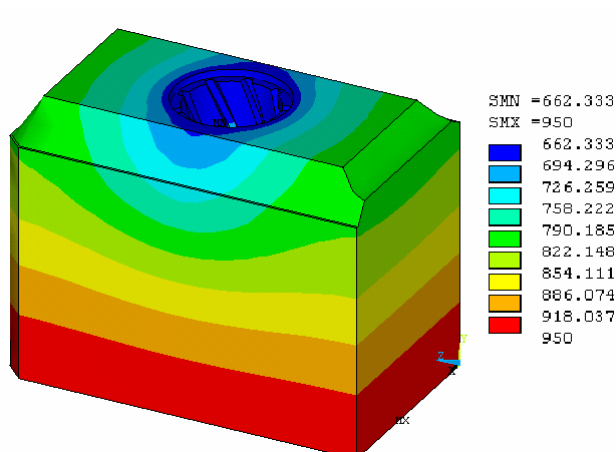


Figura 14. Mapa da distribuição de temperatura no anodo em graus Celsius.

## 10. Conclusões

Os resultados apresentados neste trabalho têm caráter qualitativo e podem ser utilizados para descrever os fenômenos elétricos e térmicos que ocorrem durante o processo de produção de alumínio. Certamente, para obtenção de resultados quantitativos são necessários um modelo mais refinado e um procedimento de calibração.

Através de uma inspeção dos resultados de distribuição de voltagem verifica-se que a queda de voltagem na haste é inferior em relação à queda de voltagem ocorrida no anodo devido ao fato do material do anodo ter a maior resistência elétrica.

A distribuição de temperatura do conjunto haste-anodo é semelhante a distribuição de potencial elétrico. Essa semelhança se dá principalmente devido ao fato do calor devido ao efeito Joule que é carregamento na análise térmica ser encontrado na análise elétrica.

A fig. 12 mostra que nas arestas da região de encaixe existem concentrações de calor. Estas concentrações ocorrem na parte inferior da interface entre o corpo do anodo e o pino da haste. Modificações na geometria desta região podem remover estes pontos fontes de calor e reduzir o consumo de energia no processo. Um procedimento de otimização pode ser utilizado para encontrar a melhor forma das ranhuras do acoplamento.

## 11. Referências

Bathe, K.J. - Finite element procedures, New Jersey: Prentice-Hall, 1996.



- Batoz, J.L., Dhatt, G. Modélisation des structures par éléments finis. Volume 1: Solides Elastiques. Paris: Hermes, 1995
- Cook, R.D., et al - Concepts and Applications of Finite Element Analysis, third edition, New York: John Wiley and Sons, 1989.
- Dupuis, M. Computation of aluminum reduction cell energy balance using Ansys finite element models. Light Metals, 1998, p. 409-417
- Dupuis, M. Tabsh, I. Thermo-electric analysis of aluminum reduction cells. Proceedings of the 31<sup>th</sup> Conference on Light Metal, 1992, p. 55-62
- Mangonon, P.L.- The Principles of Materials Selection for Engineering Design, London: rentice-Hall, 1999.
- Meier, M. W.; Cracking Behaviour of Anodes, edition a la carte sa, Switzerland, 1996.
- Reddy, J. N. An Introduction To The Finite Element Method. McGraw-Hill International Editions, 1984.
- Sherbinin, S. A. et al. 3D thermo-electric field modeling tool and its applications for energy regime simulations in aluminum reduction cells. Light Metals, 2000, p.323-329
- Vogelsang, D et al. From 110 to 175 kA: Retrofit of VAW Rheinwerk. Part I: Modernization Concept. Light Metals, 1997.

## **THERMOELECTRIC ANALYSIS OF THE SHAFT-ANODE SET USED IN THE ALUMINIUM INDUSTRY**

Adriano G. Batista.

Mechanical Engineering Department, Federal University of Pará, Augusto Corrêa Street, Guamá, Belém - PA - Brazil, P. O. Box: 66075-110. e-mail: [agb@ufpa.br](mailto:agb@ufpa.br)

Fábio A. Cunha.

Mechanical Engineering Department, Federal University of Pará, Augusto Corrêa Street, Guamá, Belém - PA - Brazil, P. O. Box: 66075-110. e-mail: [Alfaia@ufpa.br](mailto:Alfaia@ufpa.br)

Manoel J. S. Sena.

Institute of Superior Studies of the Amazonian, Gov. José Malcher Avenue, 1148, Belém – PA – Brazil, P. O. Box: 66055-260. e-mail: [mjssena@iesam.com.br](mailto:mjssena@iesam.com.br)

**Abstract:** *In this paper a thermoelectric analysis is made of the shaft-anode set used in the process of aluminium production through the finite elements methods. The coupling method for the electrical and thermic analysis is the indirect one. In this method some results obtained in the electrical analysis are employed for loading in the thermic analysis. Emphasis is given to coupling, which is the region that physically unites the shaft and the anode. The geometric and physical characteristics of the coupling dictate, among other things, the characteristics of electric current conduction, and heat transference and dissipation between the shaft and the anode. The simulations carried out provide the fields for distribution of electrical potential, loss of heat due to joule effect and distribution of temperature as results. The results found aid in determining places where possible modifications may be made in the shaft-anode set so as to achieve a reduction in heat dissipation. This paper is the result of co-operation between UFPA and ALBRAS.*

*Keywords: finite elements, coupling shaft, anode, electric current conduction.*