

# ANÁLISE ELÉTRICA POR ELEMENTOS FINITOS DO CONJUNTO HASTE-ANODO UTILIZADO NA INDÚSTRIA DE ALUMÍNIO.

**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@ufpa.br](mailto:alfaia@ufpa.br)

**Manoel José dos Santos Sena.**

Instituto de Estudos Superiores da Amazônia - Anexo 7

Av. Gov. J. Malcher, 1148, Belém – PA – Brasil, CEP 66055-260. e-mail: [mjssena@iesam.com.br](mailto:mjssena@iesam.com.br)

**Resumo.** *No processo da produção do alumínio a redução nas células eletrolíticas é a fase que demanda mais energia. Os ânodos destas células são produzidos em serie pela ALBRAS. Para serem transportados, imersos e emersos das células eletrolíticas os anodos são fixados a hastes por meio de um acoplamento. Este acoplamento dita, entre outras coisas, a característica de condução elétrica entre a haste e o anodo. Neste trabalho é feita a modelagem computacional do conjunto haste-anodo utilizando o método de elementos finitos. Um dos objetivos do presente trabalho é a compreensão do fenômeno de condução de corrente elétrica no conjunto haste-anodo, para que se possa modificar a geometria de seu acoplamento de modo que se tenha uma diminuição da dissipação de calor. As simulações realizadas dão como resultados os campos de distribuição de potencial elétrico e perda de calor por efeito joule. 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 615 MW 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.

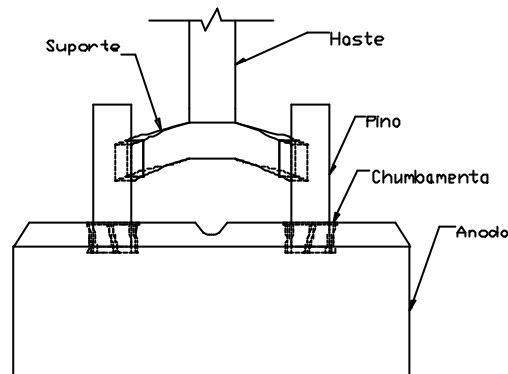


Figura 1. Vista Frontal do conjunto haste-anodo.

## 3. MODELAMENTO MATEMÁTICO

### 3.1 Equação do Potencial Elétrico.

A equação 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).

### 3.2 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:

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

Onde:  $n$  é o número de Pontos de Integração  
 $[\rho]$  é a matriz de Resistividade  
 $\{J_{ti}\}$  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 pode ser usado como dado de entrada em uma análise térmica.

## 4. MODELAMENTO GEOMÉTRICO

### 4.1 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).

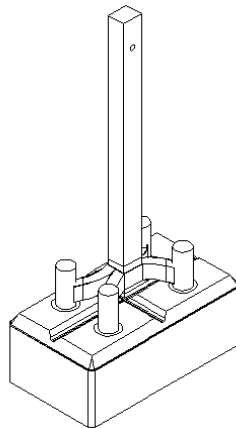


Figura 2. Desenho em 3D do modelo haste-anodo estudado.

### 4.2 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 sequência 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 3).

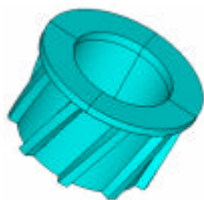


Figura 3. Geometria do chumbamento (acoplamento) entre a haste e o anodo.

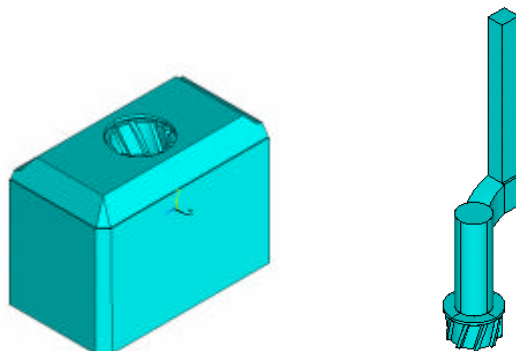


Figura 4. Anodo com orifício (à direita) e Haste com chumbamento (à esquerda).

## 5. 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

## 6.MODELO ELEMENTOS FINITOS

O método de elementos finitos é muito usado para discretização de equações descrevendo meios contínuos como as que são características do problema abordado neste trabalho.

O procedimento básico consiste em dividir o domínio considerado em elementos que são formados por nós e arestas. Em cada nó, são definidas variáveis, ou graus de liberdade. Estas quantidades são interpoladas para os outros pontos do domínio através de funções forma.

Para cada elemento são escritas as equações que regem o problema.

Os elementos são em seguida conectados, obedecendo ao critério de compatibilidade e continuidade em suas fronteiras. As matrizes globais resultantes deste processo representam as equações que regem o problema para a estrutura completa. Após serem resolvidas, estas equações fornecem os valores dos graus de liberdade em cada nó. Em ajuda as funções de forma, os resultados para a estrutura completa são obtidos.

Para que os resultados do modelo sejam válidos, a densidade de malha deve ser adequada e o modelo, devidamente calibrada através da comparação de seus resultados com medidas em campo e ajuste se necessário.

A malhagem da geometria do modelo foi realizada com o elemento *sólido 69* que é um elemento que tem capacidade de condução de corrente elétrica tridimensional. Calor Joule gerado

pelo fluxo de corrente também é incluído no balanço de energia. Para que este efeito seja considerado é necessário uma solução iterativa.

Cabe ressaltar que poderiam ter sido usados elementos que levassem em consideração apenas os efeitos térmicos ou elétricos. Entretanto a análise acoplada mostra-se mais adequada.

O elemento tem oito nós com dois graus de liberdade, temperatura e voltagem. 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. 5 mostra o modelo malhado.



Figura 5. Modelo com a malha utilizada para análise.

## 7. CONDIÇÕES DE CONTORNO

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. 6). A entrada da corrente se dava pela extremidade da haste e a saída pela parte inferior do anodo (fig. 6). 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 das imposições de gradientes de potencial elétrico nulo nas superfícies citadas.

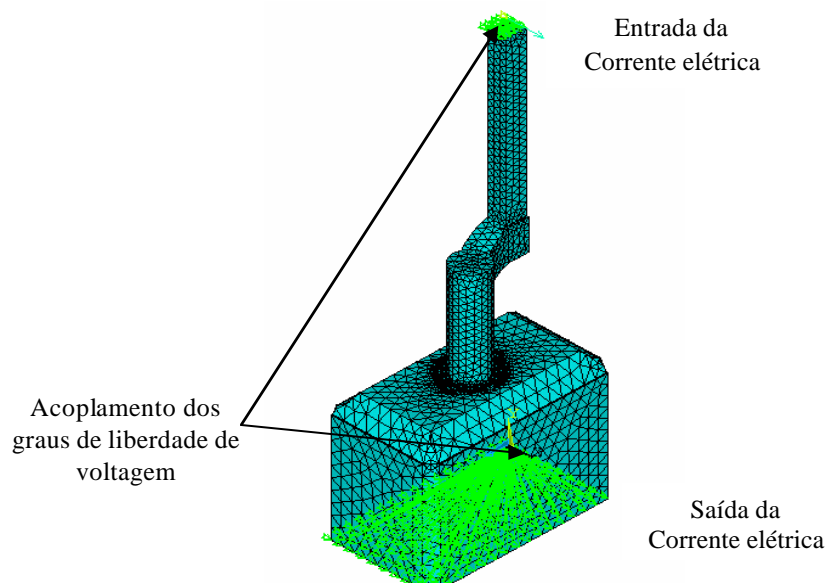


Figura 6. Acoplamento dos graus de liberdade.

## 8. RESULTADOS

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

As figuras 7, 8 e 9 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. 10 mostra o calor gerado por efeito joule no orifício do anodo que recebe a haste.

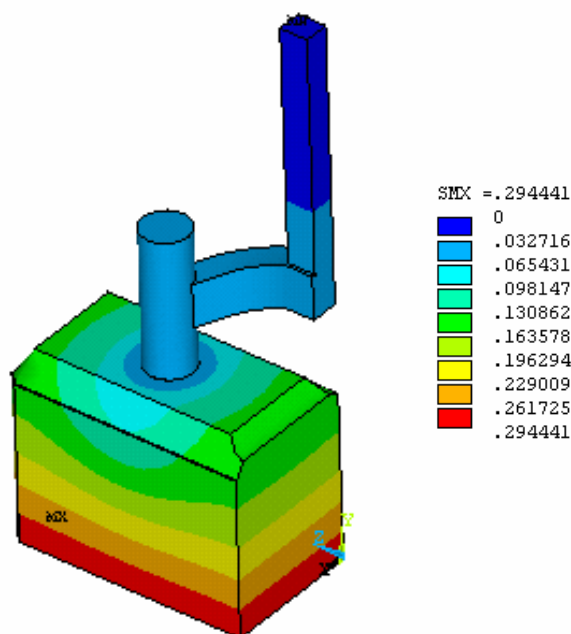


Figura 7. Mapa da distribuição de tensão elétrica em Volts – Vista 3D.

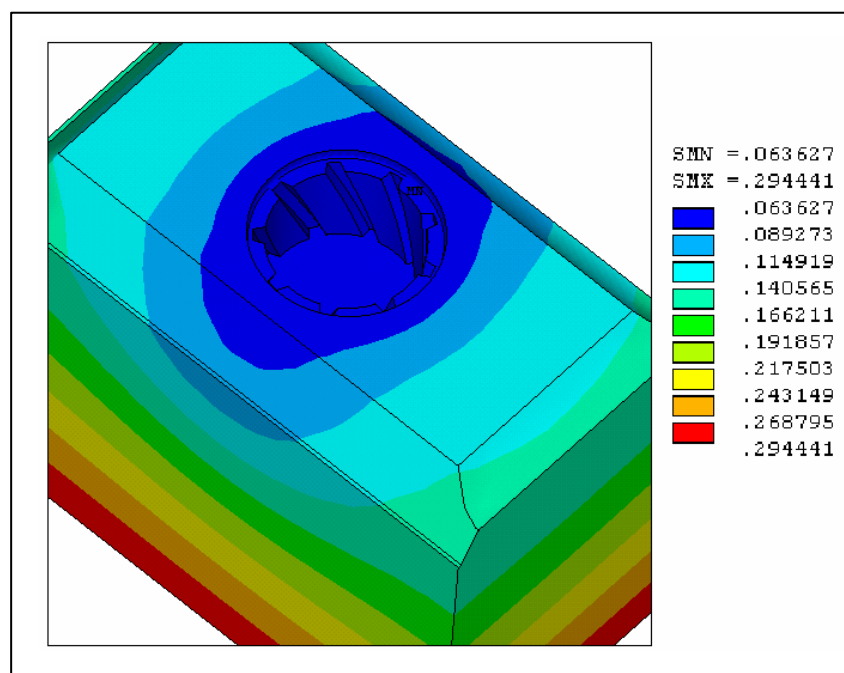


Figura 8. Mapa de distribuição de potencial elétrico no anodo em Volts.

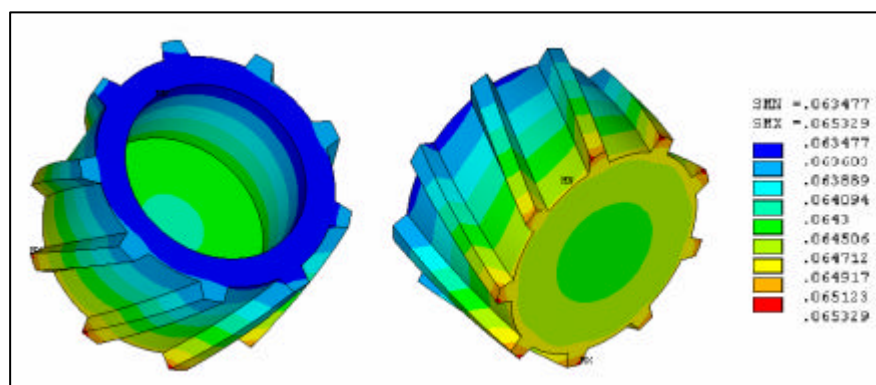


Figura 9. Mapa de distribuição de potencial elétrico no chumbamento em Volts.

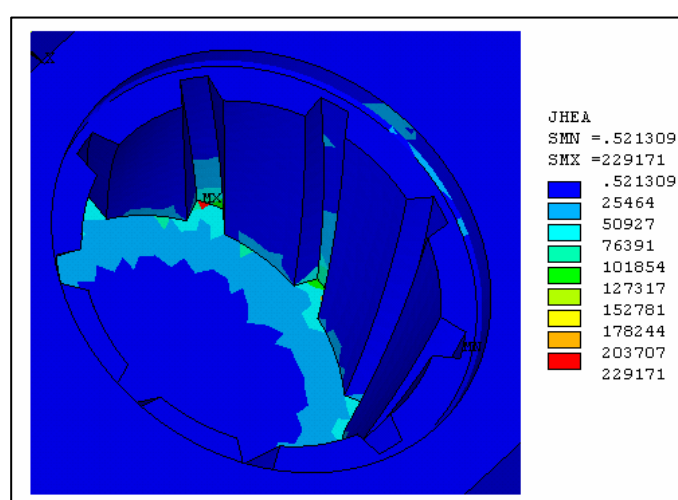


Figura 10. Detalhe do Mapa de distribuição de calor por efeito Joule no orifício do anodo

## 9. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho têm caráter qualitativo e podem ser utilizados para descrever os fenômenos elétricos 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. No que se refere à densidade da malha, uma melhor discretização da região do anodo se faz necessária para a avaliação do efeito Joule. Para a distribuição de potencial elétrico, a configuração usada apresentou convergência numérica.

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

A fig. 10 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.

## 10. 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
- Margonon, P.L.- The Principles of Materials Selection for Engineering Design, London: Prentice-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.

## ELECTRIC ANALYSIS BY FINIT ELEMENTS OF THE SET HASTE-ANODO USED IN THE ALUMINUM INDUSTRY.

**Abstract.** *In the process of production of aluminum, the reduction in the electrolysis cell is the most demanding phase in energy. The anode of this cell is produced in by the Albras. They are composed by coque and pitch that it is used as agglutinate. To be transported and immersed in the cell, they need to be couple to an aluminum rod by a steel yoke. The geometry of the coupling will dictate its electric conduction, dissipation and mechanical strength characteristics. This work describes a finite element model of the anode, including the yoke and the rod. Electric analysis this set is performed. The objective of the cooperation UFPA-ALBRAS is to change the coupling geometry to diminish the heat dissipation in the coupling rod-anode.*

**Keywords:** *finite elements, aluminum, anode, rod, electric analysis*