



CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA



21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DA FIXAÇÃO HASTE-ANODO EMPREGADO NA CUBA ELETROLÍTICA HALL-HÉROULT

Adriano Mitsuo Goto, gotoadriano8@gmail.com¹

Carlos Alberto Rios Brito Junior, riosbritojunior@yahoo.com.br¹

Cleber Araujo Calvacanti, cleberov@gmail.com¹

Felipe Anderson Silva Aquino, felipe_z_@hotmail.com¹

¹Universidade Federal do Maranhão

Resumo: No processo Hall-Héroult o alumínio é obtido pela redução eletrolítica da alumina dentro de um forno conhecido por cuba eletrolítica. Este processo atinge temperaturas superiores a 900 °C no banho eletrolítico onde se imerge, à medida que é consumido, o ânodo de grafite. O transporte e imersão deste ânodo na cuba é realizada por uma haste metálica por onde se conduz a corrente elétrica necessária ao processo. Comumente, o ânodo é chumbado na haste utilizando ferro fundido. No entanto, a elevada resistência mecânica do ferro fundido pode ser comprometida sob condições severas de temperatura e tensões. Isso pode ocasionar o rompimento da estrutura de conexão do ânodo com a sua subseqüente queda no interior da cuba eletrolítica. As consequências desta falha para o processo Hall-Héroult abrange desde a perda de rendimento energético e a consequente perda de produtividade até a contaminação do alumínio primário. Diante essa observação, nota-se a necessidade de estudos a respeito do processo industrial de redução de alumínio e métodos de avaliação de projetos de modo a minimizar a incidência de falhas durante a operação. O presente trabalho busca analisar por meio de simulações computacionais as possíveis causas de uma falha na fixação haste-ânodo durante o funcionamento da cuba eletrolítica. Modelos parametrizados do chumbamento de ferro fundido são construídos no programa computacional SolidWorks. Estes modelos virtuais de chumbamento são submetidos a simulações computacionais no software ANSYS que emprega o método dos elementos finitos. Neste programa são previamente estabelecidos parâmetros térmicos elétricos e mecânicos pertinentes ao processo Hall-Héroult. Assim, pretende-se localizar as regiões mais suscetíveis a ocorrência de falha nos modelos de chumbamento feito de ferro fundido.

Palavras-chave: Ferro Fundido Cinzento, Elementos Finitos, Hall-Héroult.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Os Desafios e Perspectivas do Processo de Hall-Héroult

A maior parte da produção atual de alumínio é obtida a partir do processo de Hall-Héroult. Em relatório recente (Menzie *et al.*, 2010), estima-se um aumento de 250% na demanda mundial de alumínio até 2025. O que preocupa devido ao alto gasto energético do processo, ainda que tenha apresentado significativa melhora na última década. Chate and Green mostram que o consumo elétrico médio é de 14kWh por quilograma de alumínio enquanto que o gasto teórico é de 6 kWh. Muitos fatores influenciam nesse alto consumo e, entre eles, está a perda da eficiência energética ocasionado pela queda de tensão e pela paralisação da produção devido a falhas de componentes mecânicos da cuba (Martins, 1986). Segundo Fortin *et al.* (2012), há um potencial promissor no aumento da eficiência de produção através da otimização da geometria dos componentes estruturais da cuba eletrolítica.

1.2 Fenômenos Associados ao Processo

O processo de Hall-Héroult consiste na redução eletrolítica da alumina (Al_2O_3) em meio a solução de criolita (Na_3AlF_6) e fluoretos fundidos (Lazarinos *et al.*, 2007). A cuba eletrolítica utilizada no processo apresenta basicamente dois polos: o anódico e o catódico. Na região anódica da cuba, composta de carbono, há a deposição dos íons de oxigênio e a consequente queima do ânodo de carbono, gerando gás carbônico (CO_2). Enquanto que no polo catódico há a

deposição dos íons de alumínio, onde é extraído o alumínio primário (Martins, 1986).

Segundo Fortin *et al.* (2012), a intensidade da corrente elétrica presente no processo é em torno de 300 kA. Tal energia é responsável pelo aumento da temperatura da cuba eletrolítica, pelo efeito *Joule*, e pela redução do alumínio. Assim, os efeitos elétricos presente na operação induzem efeitos térmicos nos componentes mecânicos da cuba. E, por sua vez, induzem os efeitos mecânicos devido à dilatação térmica gerando os contatos e tensões mecânicas dos componentes. A Figura 1 ilustra as relações entre os fenômenos presentes no processo de *Hall-Héroult*.

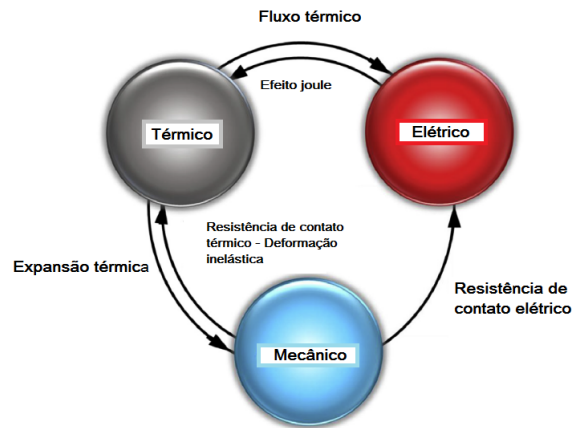


Figura 1: Ilustração dos componentes básicos de uma cuba eletrolítica, (Fortin *et al.*, 2012).

Diversos trabalhos (Fortin *et al.*, 2012; Gunasegaram and Molenaar, 2015 e Richard *et al.*, 2003) levam em consideração os efeitos destes fenômenos na simulação computacional do processo. Nesses trabalhos, a análise foi dividida em dois ciclos: o termoelétrico e termomecânico. Ambos os ciclos estão associados, onde os valores das simulações de um são usados no outro. No ciclo termoelétrico são levados em consideração as relações entre corrente e resistência elétricas e a temperatura associada. Enquanto que no ciclo termomecânico os valores da temperatura obtidas no primeiro ciclo são utilizadas para obter os valores das deformações e tensões vinculadas aos componentes da cuba eletrolítica. Por fim, tais valores de tensão e deformação são novamente utilizados no ciclo termoelétrico para determinar a existência de contato mecânico e a consequente passagem de corrente elétrica.

1.3 Análise da Fixação Haste-Ânodo

Os componentes básicos de uma cuba eletrolítica são apresentados na Fig. 2. Para manter a ligação entre o ânodo de carbono e a haste condutora é inserido ao redor ferro fundido líquido.

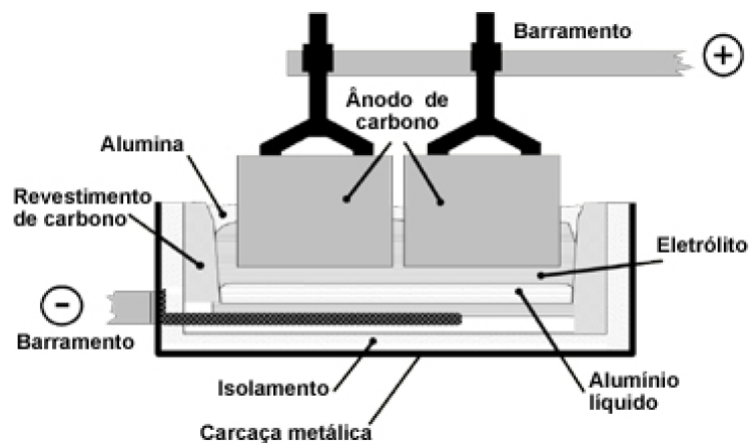


Figura 2: Ilustração dos componentes básicos de uma cuba eletrolítica, (Moura *et al.*, 2008).

A utilização do ferro fundido no chumbamento do ânodo é essencial para manter a fixação dos componentes da cuba e evitar sua queda no banho eletrolítico. É nessa fixação do ânodo onde parte dos efeitos dos campos térmicos, elétricos e mecânicos se concentram (Richard *et al.*, 2003). Assim, o presente trabalho visa fazer um estudo das condições mecânicas a qual o chumbamento está submetido, analisando as possíveis causas das falhas mecânicas deste componente através de simulações computacionais.

1.4 Faixa de Ar Inicial

Na fase de chumbamento, é inserido ao redor da haste condutora e no furo do ânodo de carbono o ferro fundido líquido. Com isso, consegue-se preencher adequadamente todo o espaço vazio entre a superfície do carbono e da haste. Entretanto, ao se solidificar, o ferro fundido sofre uma ligeira contração térmica. Com isso, há a formação de camadas de ar entre as superfícies de contato do carbono/ferro fundido e do ferro fundido/haste condutora, o que segundo Fortin *et al.* (2012) é responsável pela perda do contato mecânico e por boa parte da queda de tensão presente na cuba eletrolítica. Com o início do processo de redução há o aquecimento dos componentes causando a expansão térmica e restaurando parte do contato mecânico, como mostrado na Fig. 3.

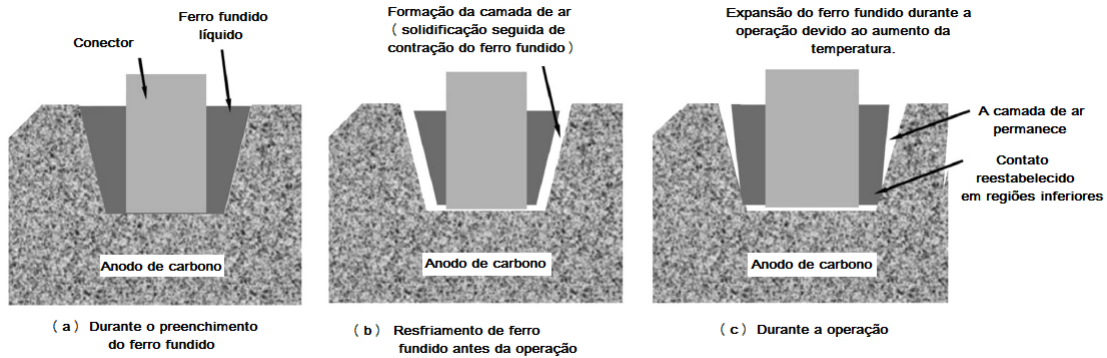


Figura 3: Esquematização da formação da camada de ar na estrutura de fixação do ânodo, (Gunasegaram and Molenaar, 2015).

Os valores das camadas de ar em torno da estrutura de fixação estão na faixa de 0.45 mm na parte superior e 0.30 mm na região inferior da peça de ferro fundido (Fortin *et al.*, 2012; Gunasegaram and Molenaar, 2015 e Ding *et al.*, 2011). Simulações prévias mostram que a expansão livre do ferro fundido ocasionado pelo aumento da temperatura possui valores máximos de 0.81 mm na região superior da peça e 0.52 mm na inferior. O contato não será restabelecido perfeitamente, apresentando pequenas regiões com camadas de ar, o que não terá grandes influências para a simulação do contato mecânico.

1.5 Efeito Toe-In

As tensões desenvolvidas na estrutura de fixação são causadas, predominantemente, por dois fenômenos: dilatação térmica e o efeito *toe-in*. Este último é ocasionado pela expansão térmica da haste condutora com os suportes inferiores mantidos fixados, gerando a pressão de contato na região inferior das faces externas, como ilustrado na Fig. 4.

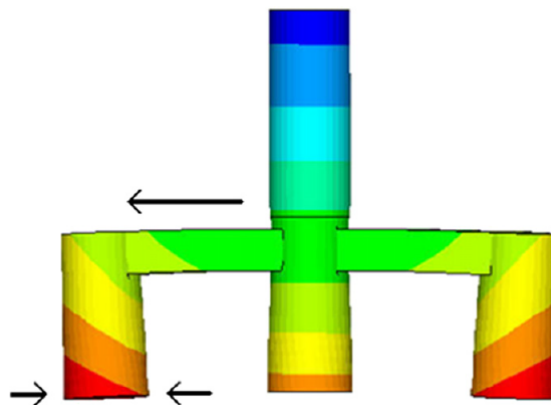


Figura 4: Efeito *toe-in* presente na haste condutora, (Fortin *et al.*, 2012).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Metodologia das Simulações

A metodologia utilizada no presente trabalho é predominantemente teórica auxiliado por simulação computacional. Para a geração da malha e para a realização das simulações, foi utilizado o *software* ANSYS. Este *software* realiza a

análise por meio do Método dos Elementos Finitos, cujo o método consiste na aproximação da geometria do modelo por elementos geométricos relativamente simples, tais como tetraedros e hexaedros. A qualidade dos resultados está intimamente relacionado com a qualidade da malha e com a ordem dos elementos (Rao, 2011). Para a simulação do comportamento da estrutura de fixação do ânodo frente aos efeitos dos fenômenos térmicos, elétricos e mecânicos foram utilizados resultados apresentados por Fortin *et al.* (2012) e Gunasegaram and Molenaar (2015). Estes resultados foram preestabelecidos nas simulações, de forma a possibilitar a análise restrita à estrutura de fixação.

2.2 Geometria do Modelo

A geometria da cuba eletrolítica utilizado neste trabalho foram obtidos da literatura (Gagner *et al.*, 2007; Wilkening and Coté, 2007). A única alteração apresentada na geometria do modelo está no número de conectores da haste condutora. Para a presente análise, será adotada duas conexões da haste condutora com o ânodo de carbono. Para a estrutura de fixação do ânodo as dimensões são de 210 mm do diâmetro externo, 180 mm do interno, altura de 130 mm e as ranhuras com inclinação de 10° em relação ao eixo vertical com faces transversal quadrada, conforme apresentado por Fortin *et al.* (2012). No decorrer deste trabalho, serão adotados filetes ao longo das ranhuras com diferentes valores de raios, de modo a possibilitar o estudo do comportamento da distribuição das tensões ao longo da peça. Todas as geometria foram construídas no *software* SolidWorks. A Figura apresenta a geometria utilizada na modelagem do chumbamento do ânodo.

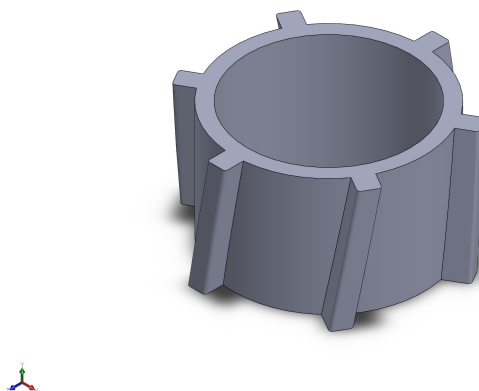


Figura 5: Geometria utilizada para a modelagem do ferro fundido na estrutura de fixação do ânodo.

2.3 Propriedades do Material

Segundo Dorward and Payne (1990), é predominante o uso do ferro fundido cinzento no chumbamento do ânodo. As suas propriedades foram baseadas nas disponíveis na biblioteca do *software* ANSYS e nos trabalhos de Guesser *et al.* (2003). A Tabela 2.3 apresenta os valores das propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento utilizadas na simulação.

Tabela 1: Valores das propriedades do ferro fundido cinzento utilizados nas simulações.

Propriedades do Ferro Fundido Cinzento	
Densidade (kg/m^3)	7200
Módulo de <i>Young</i> (GPa)	110
Coefficiente de <i>Poisson</i>	0.28
Módulo de Elasticidade Transversal (GPa)	42.969
Tensão de Tração Máxima (MPa)	240
Tensão de Compressão Máxima (MPa)	820
Calor Específico ($\text{J kg}^{-1} \text{C}^{-1}$)	447
Condutividade Térmica ($\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}$)	52
Coefficiente de Expansão Térmica (C^{-1})	1.1×10^{-5}

2.4 Malha por Elementos Finitos

A malha utilizada nas simulações possuem predominantemente elementos hexaédricos de ordem três nos seis modelos de chumbamento apresentados. A Tabela 2 apresenta as características das malhas utilizadas em cada modelo.

Tabela 2: Informações sobre as malhas utilizadas nos modelos de chumbamento.

Modelo	Número de Nós	Número de Elementos	Tipos de Elementos
Peça original sem filete	454319	101140	Hexaedros de 20 nós e Tetraedros de 15 nós
Peça com filete de 1 mm	614528	138400	Hexaedros de 20 nós e Tetraedros de 15 nós
Peça com filete de 2 mm	456721	100347	Hexaedros de 20 nós e Tetraedros de 15 nós
Peça com filete de 3 mm	482612	125156	Hexaedros de 20 nós e Tetraedros de 10 e de 15 nós
Peça com filete de 4 mm	459529	116768	Hexaedros de 20 nós e Tetraedros de 10 e de 15 nós
Peça com filete de 5 mm	461923	120133	Hexaedros de 20 nós e Tetraedros de 10 e de 15 nós

2.5 Condições de Contorno

A primeira condição de contorno associado a estrutura de fixação está relacionado as superfícies de apoios a as limitações de movimento. Como citado anteriormente, os valores da expansão térmica da estrutura de fixação são maiores que os valores da largura da camada de ar estipulados na literatura, permitindo o restabelecimento do contato mecânico ainda que não mantenha o contato conferido antes da solidificação do ferro fundido. Para as simulações, será considerado o pleno contato entre os componentes.

A expansão térmica da haste condutora e o efeito *toe-in* provocam, segundo Fortin *et al.* (2012), uma pressão normal de intensidade de 2 MPa na face interior da estrutura de fixação, configurando-se como a segunda condição associada ao problema.

Por fim, os valores da temperatura ao longo da estrutura foram obtidos dos trabalhos de Fortin *et al.* (2012), Gunasegaram and Molenaar (2015) e Ding *et al.* (2011). Os resultados apresentados em tais trabalhos apresentam um campo de temperatura em torno de 530 °C ao longo da fixação do ânodo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores das tensões principais máximas para o modelo sem filetes estão em torno de 516 MPa para tração e 697 MPa para compressão, como mostrado na Fig.6.

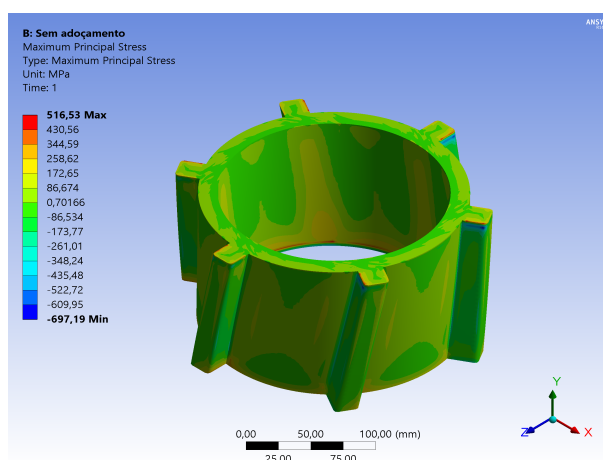


Figura 6: Valores das tensões principais máximas para o modelo sem filetes.

Pela figura é possível notar que boa parte da estrutura sofre uma tensão na faixa de 170 – 260 MPa, tanto para tração quanto para compressão, mantendo conformidade com os resultados apresentados por Gunasegaram and Molenaar (2013). Os valores de máximos da tensão se concentram nas extremidades das ranhuras e na parte inferior da face interna da estrutura. Entretanto, os valores da tensão de tração se localizam sobre regiões pequenas, configurando-se como regiões de singularidade, isto é, locais onde os valores da tensão não correspondem com o real. A Figura 7 destaca as regiões com as tensões de tração máximas na estrutura.

Foi realizado a mesma simulação para diferentes geometrias, variando o valor do raio do filete aplicado na face das ranhuras. Entre os valores obtidos, a geometria com o raio do filete de 2 mm apresentou os menores valores de tensões máximas, comparadas as demais geometrias com filete. Os gráficos das Fig. 8 e 9 apresentam, respectivamente, a comparação entre os valores positivos e negativos das tensões máximas para cada geometria utilizada.

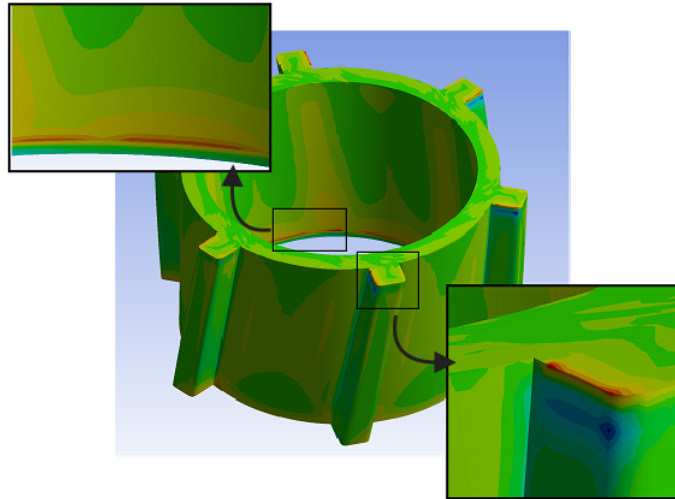


Figura 7: Localizações dos valores de máxima tensão de tração.

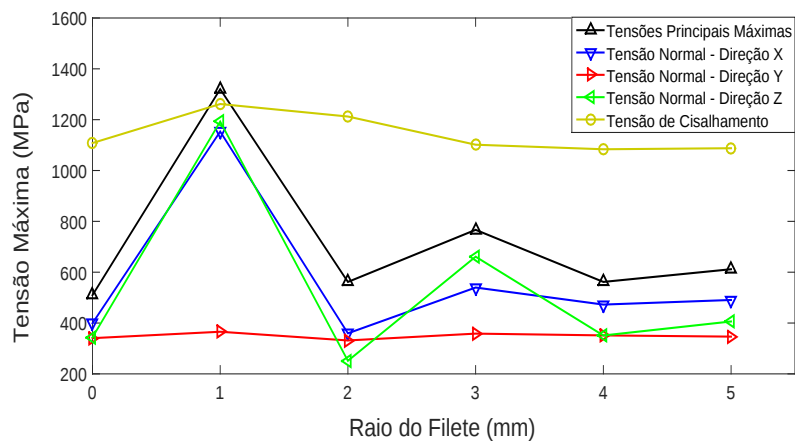


Figura 8: Comparação dos valores positivos das tensões máximas de cada geometria.

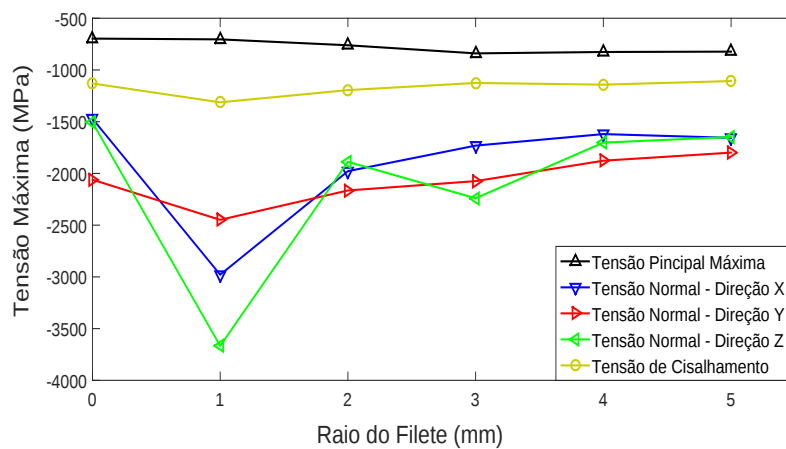


Figura 9: Comparação dos valores negativos das tensões máximas de cada geometria.

Com a utilização do filete de 2 mm de raio, as regiões de maiores valores das tensões principais diminuem significativamente, como apresentado na Fig. 10. Isso ocorre devido a melhor distribuição da tensão ao longo das regiões próximas das ranhuras, local onde se concentra a maior parte da carga sofrida. Apesar de apresentarem regiões propícias a falha,

as ranhuras são importantes para manter a fixação do ânodo de carbono e evitar sua queda no banho eletrolítico. A sua angulatura ao longo em relação ao eixo vertical apresenta o propósito de aumentar o contato com o ânodo.

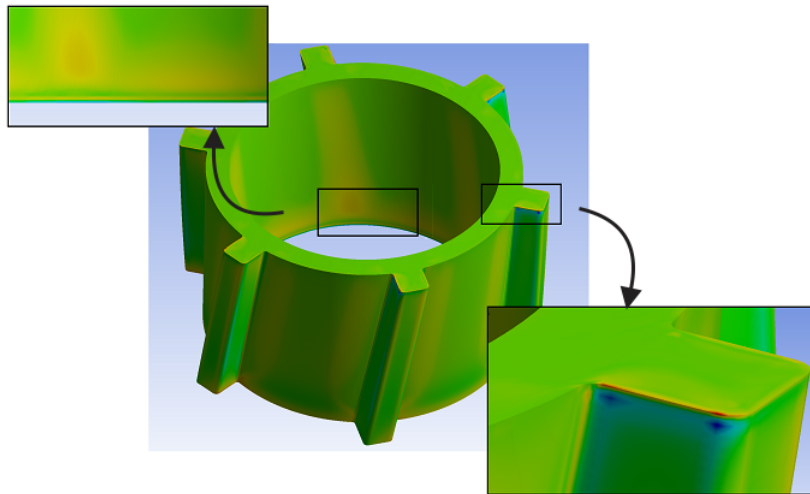


Figura 10: Localização das regiões de maiores valores de tensão para o modelo com filete de raio 2 mm .

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como propósito fazer um estudo a respeito das condições mecânicas que a estrutura de fixação do ânodo está submetido durante o processo de *Hall-Héroult*. Avaliou-se as suas condições e simulou-se seu comportamento frente as condições de operação, de modo a permitir a identificação de possíveis locais de falhas. Também foi realizado a criação de novas geometria da estrutura com o objetivo de estudar-se o seu comportamento nas mesmas condições e relacioná-la com as mudanças nas regiões de maiores probabilidade de falha mecânica. Entre os modelos estudados, a que apresentou resultados mais significativos foi a geometria com o filete de raio de 2 mm. Houve uma diminuição das regiões de singularidade e uma melhor distribuição das tensões ao longo da estrutura.

Para trabalhos futuros, sugere-se um estudo com inclusão de mais condições de operação, como valores de temperaturas variáveis e efeitos da ação da corrosão presente durante o processo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMA pelo apoio, incentivo e pelo financiamento da pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Chate, W.T. and Green, J.A.S., 2003. "U.s. aluminum production energy requirements: Historical perspective, theoretical limits, and new opportunities". *Dept. of Energy, USA*.
- Ding, K., Molenaar, D. and Kapoor, A., 2011. "Prediction of voltage loss on electrical connections for aluminium smelter reduction cells". *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 226, pp. 981–994.
- Dorward, R. and Payne, J., 1990. "Design, operation and electrochemical aspects of hall-héroult cells containing solid wetted cathodes: a 30-year chronicle". In M. Bouchard and P. Tremblay, eds., *Production, Refining, Fabrication and Recycling of Light Metals*, Pergamon, Oxford, Proceedings of Metallurgical Society of Canadian Institute of Mining and Metallurgy, pp. 29 – 40.
- Fortin, H., Kande, N. and Fafard, M., 2012. "Fem analysis of voltage drop in the anode connector induced by steel stub diameter reduction". *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 52, pp. 71–81.
- Gagner, J.P., Thibeault, M.A., Carrier, J.Y., Dufour, G., Gauthier, C. and Rochette, P., 2007. "Anode stub inspection system". In *Proceedings of the TMS Light Metals*. pp. 1021–1024.
- Guesser, W.L., Baumer, I., Tschiptschin, A.P., Cueva, G. and Sinatora, A., 2003. "Ferros fundidos empregados para discos e tambores de freio". In *Brake Colloquium*. Rio grande do Sul, Brazil.
- Gunasegaram, D.R. and Molenaar, D., 2013. "A fully coupled thermal-electrical-mechanical transient fea model for a 3d anode assembly". In *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*. pp. 1341–1346.

- Gunasegaram, D.R. and Molenaar, D., 2015. "Towards improved energy efficiency in the electrical connections of hall-heroult cells through finite element analysis (fea) modeling". *Journal of Cleaner Production*, Vol. 93, pp. 174–192.
- Lazarinos, J.G.C., Moura, F.J. and Cardoso, A.B., 2007. "Caracterização e tratamento de revestimentos gastos de cuba oriundos do processo de obtenção de alumínio". *Tecnologia de Metais e Materiais*, Vol. 5, pp. 127–132.
- Martins, L.C.B., 1986. "Revisão do estágio atual da tecnologia do processo de Hall-Héroult". *Associação Brasileira de Metalurgia*, Vol. 42, pp. 309–314.
- Menzie, W.D., Barry, J.J., Bleiwas, D.I.J., Bray, E.L., Goonam, T.G. and Matos, G., 2010. "The global flow of aluminum from 2006 through 2025". *U.S. Geological Survey*.
- Moura, A.R.S., Ferreira, E.H.F., Fukushima, F.K., Neto, T.M.A., Moutinho, T.M.P. and Costa, T.V., 2008. "Processo de obtenção de alumínio".
- Rao, S.S., 2011. *The Finite Element Method in Engineering*. Ed. Butterworth-heinemann, 5th edition.
- Richard, D., Fafard, M., Lacroix, R., Cléry, P. and Maltais, Y., 2003. "Carbon to cast iron electrical contact resistance constitutive model for finite element analysis". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 132, pp. 119–131.
- Wilkening, S. and Coté, J., 2007. "Problem of the stub-anode connection". In *Proceedings of the TMS Light Metals*. pp. 865–873.

ANALYSIS BY THE METHOD OF FINITE ELEMENT FIXING ROD-ANODE EMPLOYEE IN VAT ELECTROLYTIC HALL-HÉROULT

Adriano Mitsuo Goto, gotoadriano8@gmail.com¹

Carlos Alberto Rios Brito Junior, riosbritojunior@yahoo.com.br¹

Cleber Araujo Calvacanti, cleberov@gmail.com¹

Felipe Anderson Silva Aquino, felipe_z_@hotmail.com¹

¹Universidade Federal do Maranhão

Abstract: In Hall-Héroult process the aluminum is obtained by electrolytic reduction of alumina into an oven known as electrolytic vat. This process reaches temperatures above 900 °C in the electrolytic bath where it merges, as it is consumed, the graphite anode. The transport and immersion of the anode in the vat is performed by a metal rod where it conducts electrical power required by the process. Commonly, the anode is plumbed on the stem using cast iron. However, the high strength cast iron can be compromised under severe conditions of temperature and tension. This can lead to the disruption of the anode connection structure with its subsequent fall within the electrolytic vat. The consequences of this failure to the Hall-Héroult process ranges from loss of energy efficiency and the resulting loss of productivity to the contamination of primary aluminum. Faced with this observation, there is a need for studies of the industrial process of aluminum reduction and assessment methods so projects to minimize the incidence of faults during operation. This study aims to analyze by computer simulations possible causes of a failure in the rod-fixing anode during operation of the electrolytic vat. Parameterized models of cast iron bolting are built in SolidWorks computer program. These virtual models of bolting are subjected to computer simulations in ANSYS software employing the finite element method. In this program are pre-established in the software electrical thermal and mechanical parameters pertinent to the Hall-Héroult process. Thus, it is intended to locate the regions most susceptible to occurrence of failure in bolting designs made of cast iron.

Keywords: Gray Cast Iron, Finite Element, Hall-Héroult.