

VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM MODELO ELETROMAGNÉTICO DE CUBAS DE REDUÇÃO DESENVOLVIDO COM O PACOTE ANSYS 9.0

Eng. André F. Schneider¹, Eng. Dagoberto S. Severo², Eng. Elton C. V. Pinto², Eng. Vanderlei Gusberti², Prof. Dr-Ing. Antônio Cezar Faria Vilela¹.

Palavras Chave: modelo numérico, medições de campo magnético, validação experimental.

Resumo

A fabricação primária de alumínio dá-se em fornos onde banho e metal líquidos são movimentados a partir de Forças de Lorentz. Este artigo apresenta a validação experimental em cubas reais de uma metodologia 3-D de análise eletromagnética de cubas eletrolíticas previamente desenvolvida com o pacote comercial de Elementos Finitos ANSYS 9.0. Um gaussímetro tridimensional, desenvolvido pela PCE Ltda. e pelo Laboratório de Magnetismo do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), foi utilizado na medição da densidade de fluxo magnético \vec{B} interna (no nível do metal) de cubas *side-by-side* de ânodos pré-cozidos. Os resultados numéricos representam adequadamente a forma das componentes mais importantes de \vec{B} para a tecnologia ensaiada (B_x e B_z), observando-se a incerteza de medição ϵ . Foram observadas correlações de 98,8% para B_x e 93,5% para B_z entre dados medidos e calculados.

Introdução

O alumínio primário é obtido através da redução eletroquímica da alumina, dito processo Hall-Héroult. Uma linha de redução contém um grande número de fornos (100 a 200) ligados em série. As cubas são alimentadas com corrente elétrica direta (DC) e constante. Dentro de cada cuba (Figura 1), a corrente flui através dos ânodos, banho, metal líquido e blocos catódicos. Barras coletoras de aço extraem a corrente da cuba, a qual é conduzida até os ânodos do próximo forno através de barramentos de alumínio. A distribuição de tensão elétrica é obtida através da Equação de Laplace, $-\nabla^2\sigma(\nabla\Phi)=0$. A distribuição de densidade de corrente é obtida através de $\vec{J} = -\sigma(\nabla\Phi)$.

As correntes geram campos magnéticos intensos a partir da Lei de Ampère, os quais são modificados pela presença de um casco de aço. Da interação entre

¹ LASID / PPGEM – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalurgia, Minas e Materiais / UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500 Porto Alegre RS - Brasil

² PCE Engenharia S/S Ltda., Rua Caeté, 162 Porto Alegre RS - Brasil

correntes e campos magnéticos no banho e no metal líquido surgem Forças de Lorentz, $\vec{F}_{em} = \vec{J} \times \vec{B}$, que são o princípio motor do escoamento destes dois líquidos imiscíveis. A Magnetohidrodinâmica (MHD) é a ciência que estuda escoamentos sob a ação de forças eletromagnéticas. Os efeitos de MHD na cuba têm impacto na eficiência de corrente e eficiência energética da redução.

Três grandes grupos de modelos magnéticos com aplicação em cubas podem ser definidos: modelos com Fator de Atenuação ou Blindagem [1], Métodos Integrais [2] e Métodos Diferenciais.

Os modelos baseados em Métodos Diferenciais [3] assumem que o campo magnético estático total possa ser modelado como a soma de um campo magnético preliminar e de um secundário – vide Equação (1). Este último é assumido como não rotacional e, assim, pode ser representado como o gradiente de um potencial escalar magnético.

$$\vec{H} = \vec{H}_i - \nabla\Psi \quad (1)$$

onde \vec{H} é o campo magnético total, [A/m]; \vec{H}_i é o campo magnético preliminar, [A/m]; e Ψ o potencial escalar magnético, [A].

A permeabilidade μ do casco é encontrada de modo iterativo. Ao se substituir a relação constitutiva do campo magnético $\vec{B} = \mu\vec{H}$ e a Equação da Continuidade da densidade de fluxo magnético $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ na Equação (1), obtém-se a Equação de Poisson (2) para a difusão do campo magnético a ser resolvida. O campo magnético preliminar é dado pela Lei de Biot-Savart, Equação (3).

$$\nabla \cdot \mu(\nabla\Psi) - \nabla \cdot \mu\vec{H}_i = 0 \quad (2)$$

onde μ é a permeabilidade magnética, [H/m].

$$\vec{H}_i = \frac{1}{4\pi} \iiint \frac{\vec{J} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3} d(volC) \quad (3)$$

onde \vec{r} é o vetor posição entre o centróide de um elemento condutor de corrente e um ponto onde deseja-se determinar \vec{B} , [m].

Tanto regiões de materiais magnetizáveis quanto não permeáveis precisam ser modeladas para que se possa calcular $\nabla\Psi$. A aplicabilidade do método é restrita às situações em o campo magnético primário é muito maior que o gradiente de Ψ , *i.e.*, $|\vec{H}_i| \gg |\nabla\Psi|$.

Uma metodologia para análise 3-D de campos magnéticos em cubas foi desenvolvida [4] a partir do pacote comercial ANSYS 9.0 utilizando-se o modelo Potencial Escalar Generalizado (GSP) [5], que é uma estratégia em 3 etapas para solução da Equação (1).

Na 1ª etapa resolve-se a Equação (2) para as regiões magnetizáveis, onde somente a componente paralela ao casco de \vec{H}_i é considerada. Na 2ª, resolve-se a Equação (1) para as regiões não magnetizáveis. Na 3ª, resolve-se a Equação (1) para todo o domínio e a influência da componente ortogonal ao casco de \vec{H}_i é finalmente considerada.

A Figura 1 mostra a malha de elementos finitos utilizada na análise de uma cuba *Side-by-side* com *side risers* de ânodos pré-cozidos hipotética. O eixo longitudinal X é paralelo às paredes laterais; o eixo transversal Y é paralelo às cabeceiras e seu sentido positivo aponta para o *down stream*; o sentido positivo de eixo vertical Z aponta para cima. A origem do sistema de coordenadas encontra-se no centro da face superior do conjunto de blocos catódicos.

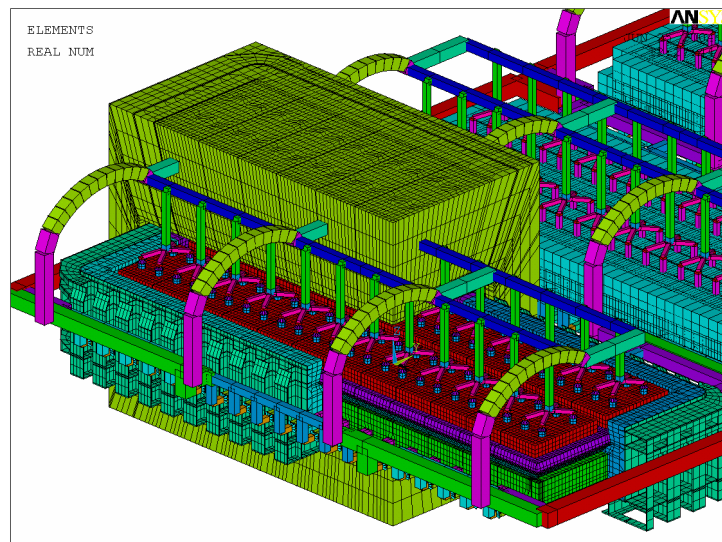


Figura 1 – Malha de elementos finitos para uma cuba *Side-by-side* com *side risers* de ânodos pré-cozidos hipotética.

Este trabalho apresentará a validação do modelo desenvolvido através da sua comparação com dados experimentais de \vec{B} obtidos em fornos reais.

Materiais e Métodos

Foram realizadas medições de densidade de fluxo magnético \vec{B} em 2 cubas de uma planta de redução localizada no Brasil, entre Outubro e Novembro de 2005. O objetivo da campanha de medições foi a comparação dos resultados experimentais obtidos para B_x , B_y e B_z com as simulações realizadas para a tecnologia em questão. Utilizou-se um gaussímetro tridimensional desenvolvido em conjunto pela PCE Ltda. e pelo Laboratório de Magnetismo do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Equipamentos similares são apresentados na literatura [1].

A Figura 2 mostra 2 operadores com o sensor utilizado durante a campanha de medições na sala de cubas.



Figura 2: Campanha de medições magnéticas em realizadas em Outubro/Novembro 2005.

A campanha de medições foi realizada concomitantemente com o regime de operação normal do forno, *i.e.*, a rotina de troca de ânodos e corrida de metal, bem como demais procedimentos de manutenção da cuba foram mantidos.

As medições foram realizadas em ambos os canais laterais da cuba, cujas crostas foram quebradas sempre entre 2 ânodos adjacentes utilizando-se o martelete hidráulico (quebra-crosta) da ponte rolante. A sonda foi introduzida até o nível do metal em pontos previamente selecionados nos canais laterais da cuba, Figura 3.

As medições foram realizadas 2 vezes em cada ponto de medição de cada um dos fornos por 2 operadores distintos, de modo a evitar erros sistemáticos de posicionamento. O alinhamento do sensor em relação ao eixo vertical global Z é obtido com um nível de bolha acoplado à estrutura do aparelho. O alinhamento no plano horizontal é dado por meio de inspeção visual do suporte horizontal do gaussímetro em relação à geometria da cuba. O erro assumido em cada ponto de medida é $\varepsilon = \pm 5 \text{ G}$ (que corresponde a um erro máximo de posicionamento de $1,5^\circ$

do sensor magnético em relação ao sistema de coordenadas global da cuba, considerando-se um campo magnético de intensidade $|\vec{B}| = 200 \text{ G}^3$.

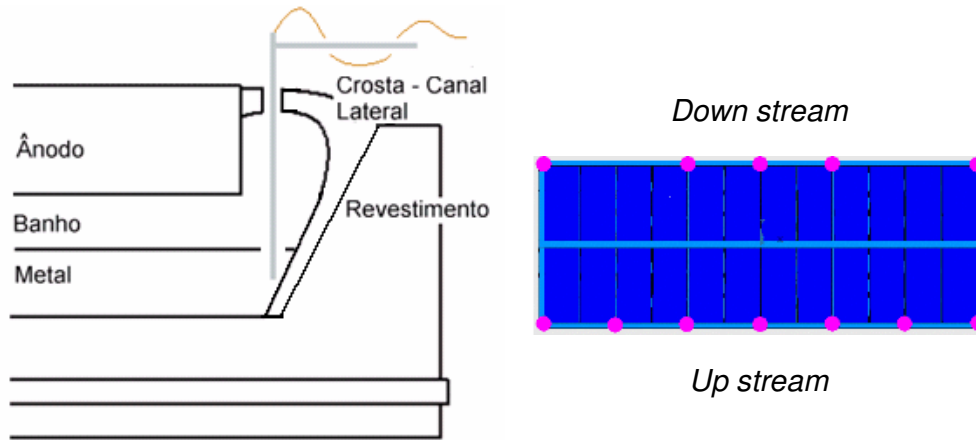


Figura 3: Vista lateral do sensor em relação ao metal, ânodo e revestimento (esquerda) e pontos escolhidos para as medições nos canais laterais de *up stream* (US) e *down stream* (DS).

Sabe-se que a distribuição elétrica dos ânodos e cátodos, na prática industrial, difere daquela prevista na situação de projeto devido às operações de troca e posicionamento de ânodos e ao comportamento desigual dos blocos catódicos no que tange a falhas (trincas e desgaste) e à resistência de contato. Foi reportado na literatura [1, 6] que os campos magnéticos medidos em áreas de redução são influenciados pela distribuição elétrica de cada cuba, gerando resultados que diferem dos modelos de projeto. Ambas as referências sugerem o cálculo dos campos magnéticos a partir da distribuição elétrica verificada no equipamento. Ressalta-se que existe grande variabilidade [1] entre os resultados obtidos para várias cubas da mesma tecnologia e que o comportamento médio dos equipamentos pode ser obtido durante ao longo de grande período de observação.

Assim, no que tange à distribuição de corrente elétrica anódica e catódica das cubas ensaiadas:

- utilizou-se um voltímetro e um termopar para realizar medições de corrente nas hastes e barras coletoras mas não foi possível obter bons resultados – faz-se necessária a utilização de um sensor tipo Bobina de Rogowski;
- a distribuição de corrente elétrica nas hastes pôde ser estimada a partir do tempo de serviço (em horas) de cada ânodo;
- a distribuição de corrente nas barras coletoras foi determinada pelo modelo, assumindo-se que não há trincas e/ou falhas nos conjuntos catódicos e que a resistência de contato é uniforme.

A cuba de interesse do modelo numérico foi representada com elementos sólidos tipo SOLID5,9 e SOLID96. O casco de aço foi representado detalhadamente, incluindo berços e demais reforços estruturais. O perímetro do volume de ar

³ O erro associado ao posicionamento do sensor é $\pm 200 \cdot \sin(1,5^\circ) \approx \pm 5,23 \text{ G}$. A incerteza do gaussímetro é $< \pm 1 \text{ G}$; assim, segundo a Equação de Kline e McClintock, $\varepsilon = \pm ((5,23)^2 + (1)^2)^{1/2} \text{ G} \approx \pm 5,32 \text{ G}$.

modelado encontra-se a uma distância equivalente a 2 comprimentos de ânodo a partir do casco em todas as direções ortogonais. A resistência de contato catódica foi calibrada com medições de queda de potencial catódica realizadas pela planta de redução. Os barramentos, demais cubas e linhas de redução foram representadas elementos condutores unidimensionais LINK68. O modelo de elementos finitos gerado possui 434.266 nós. Em todos os cálculos utilizou-se um microcomputador com 3,06 GHz de processamento, 2 Gb RAM, HD 76.3 Gb.

Resultados

A Figura 4 mostra as 3 componentes de \vec{B} obtidas para a tecnologia ensaiada considerando-se corrente uniforme nos ânodos (situação de projeto).

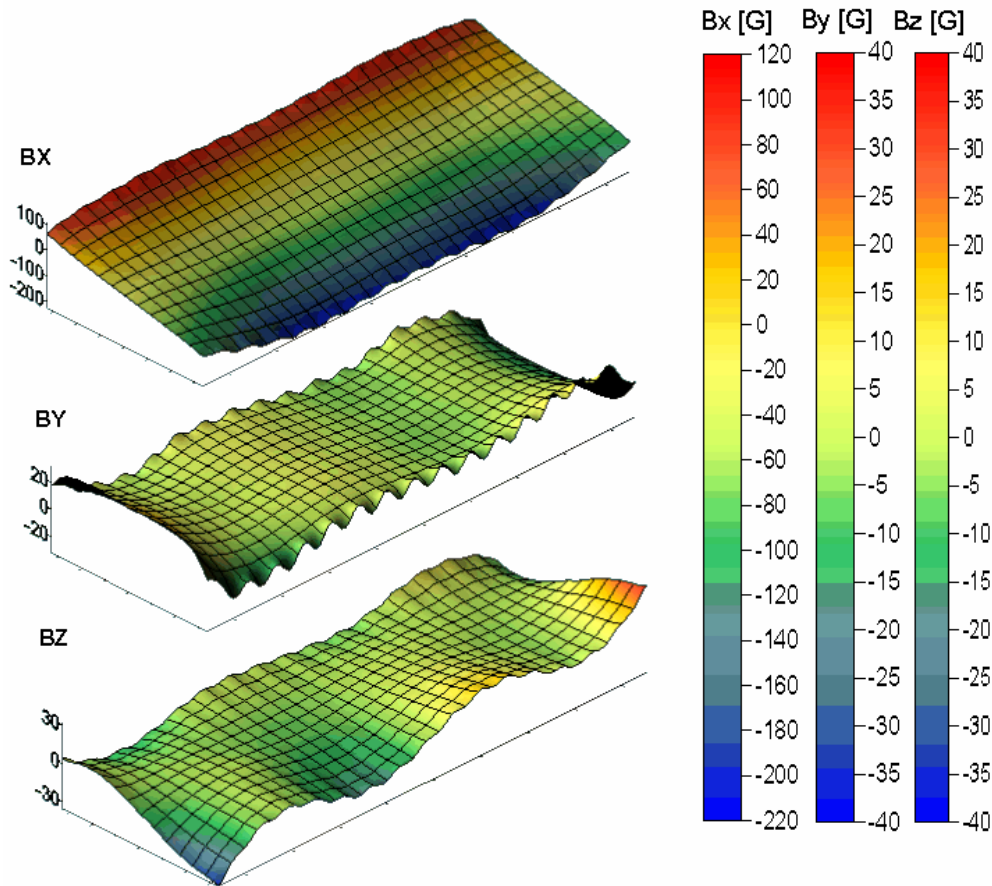


Figura 4: Distribuições das 3 componentes de \vec{B} para a tecnologia ensaiada.

As Figuras 5 a 7 apresentam os resultados obtidos para a cuba I e as Figuras 8 a 10 para a cuba II, considerando-se a corrente estimada nas hastes de acordo com o tempo em serviço de cada ânodo. Todos os dados adquiridos foram adquiridos ao longo de linhas localizadas nos canais laterais de *up stream* (US) e *down stream* (DS), no nível do metal.

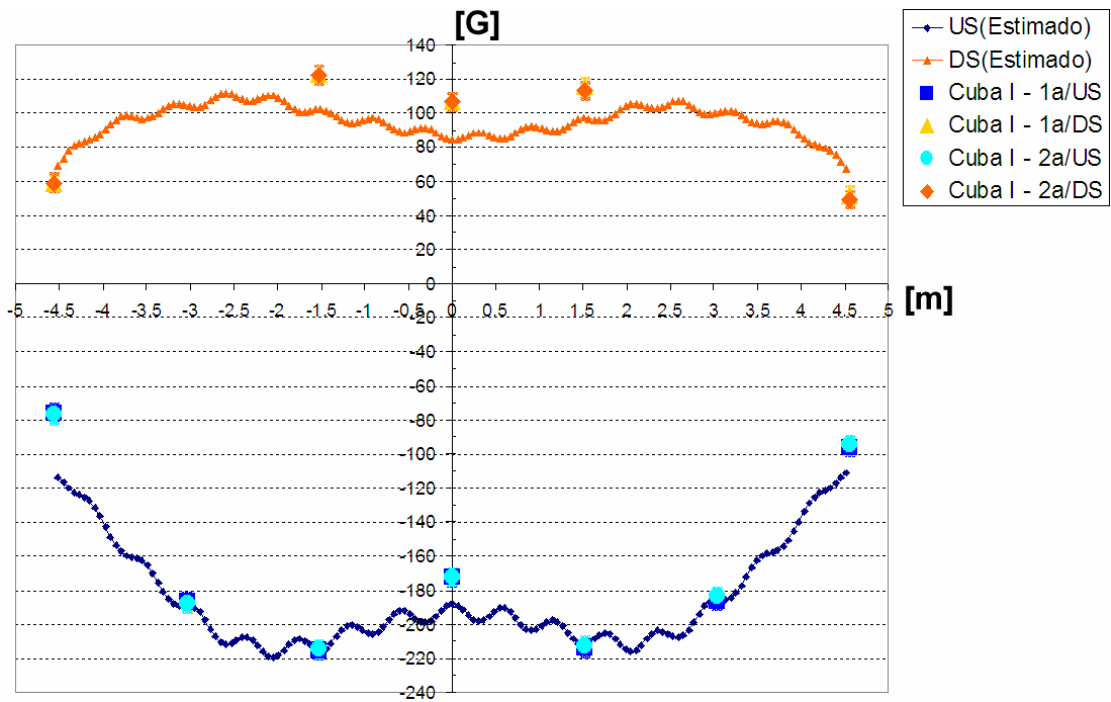


Figura 5: Comparação entre B_x medido e calculado para a Cuba I.

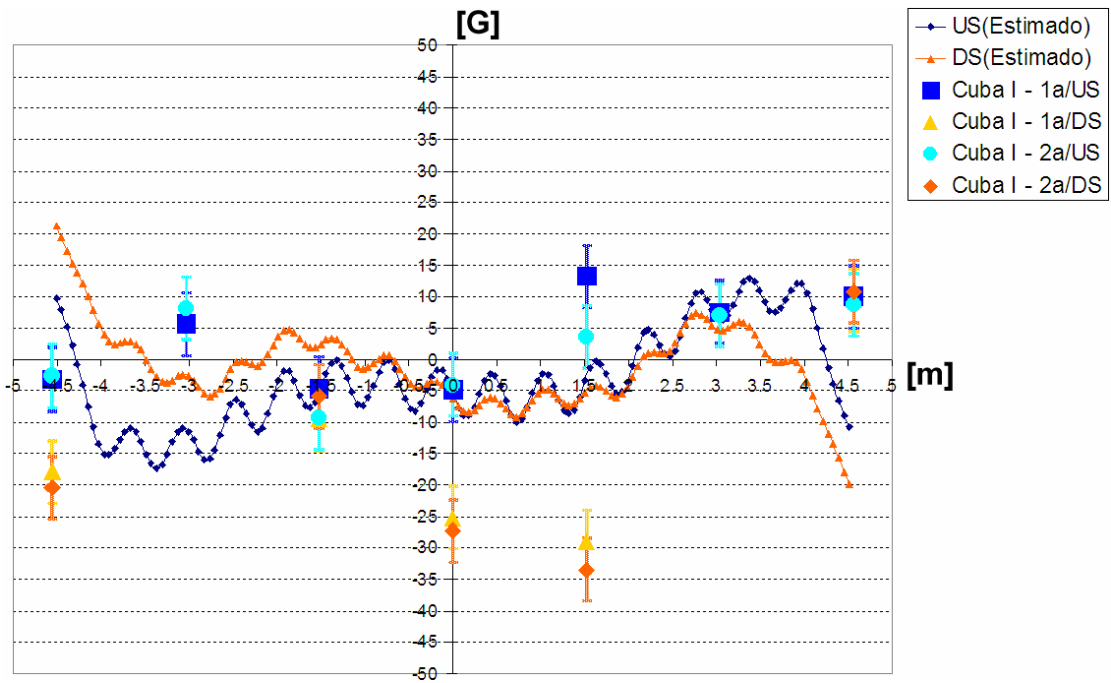


Figura 6: Comparação entre B_y medido e calculado para a Cuba I.

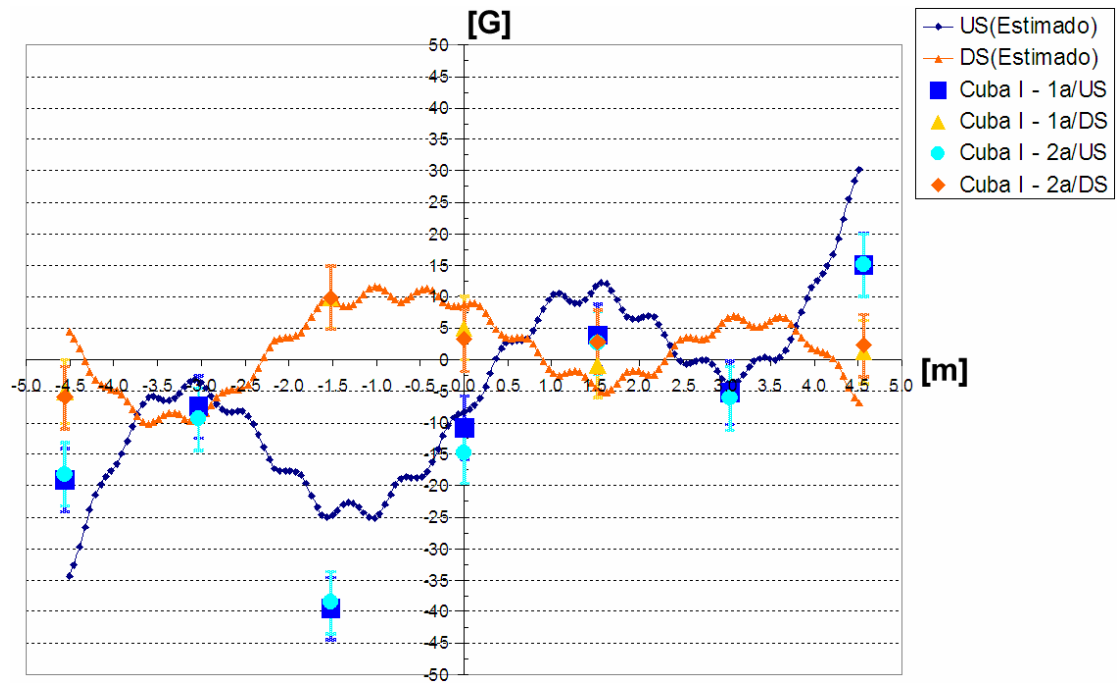


Figura 7: Comparação entre B_z medido e calculado para a Cuba I.

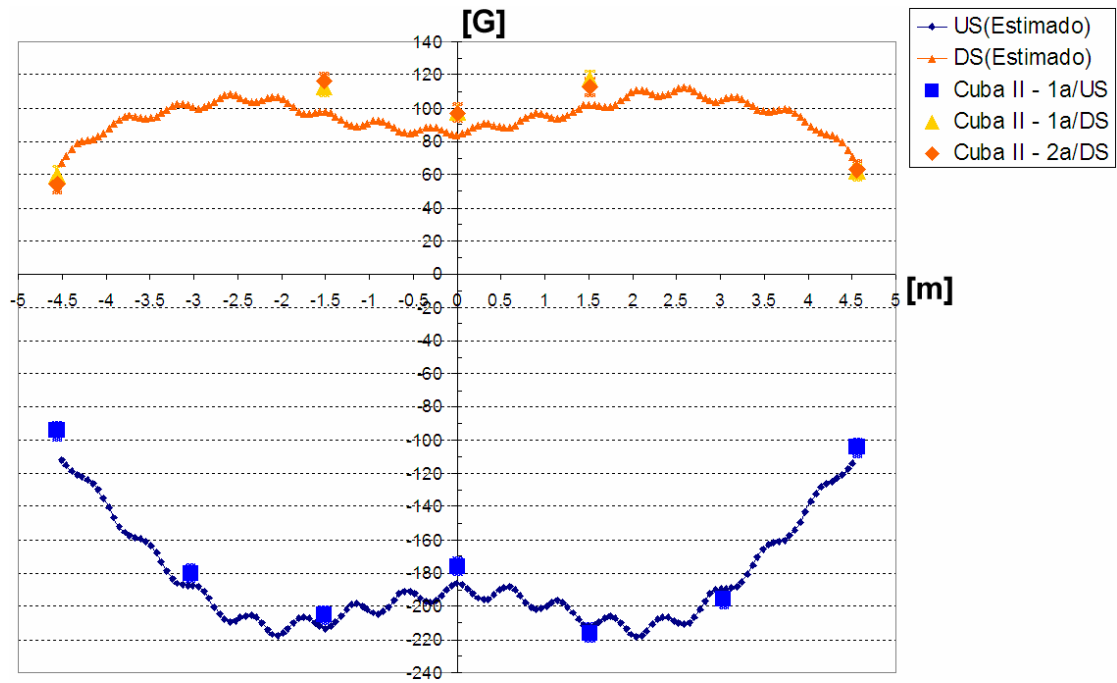


Figura 8: Comparação entre B_x medido e calculado para a Cuba II.

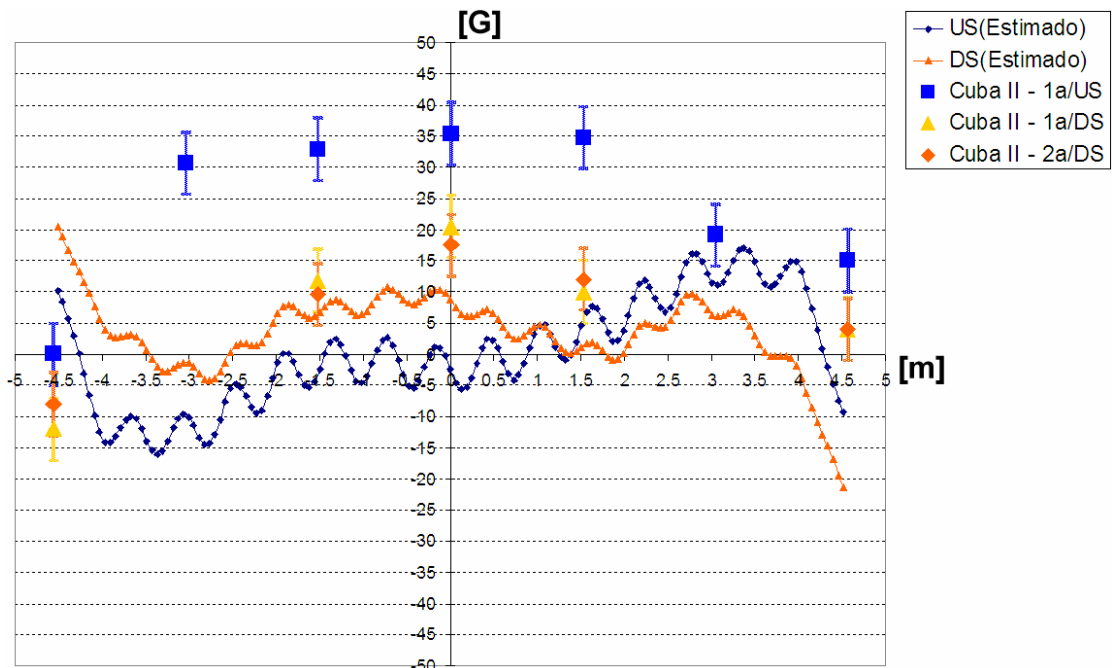


Figura 9: Comparação entre B_γ medido e calculado para a Cuba II.

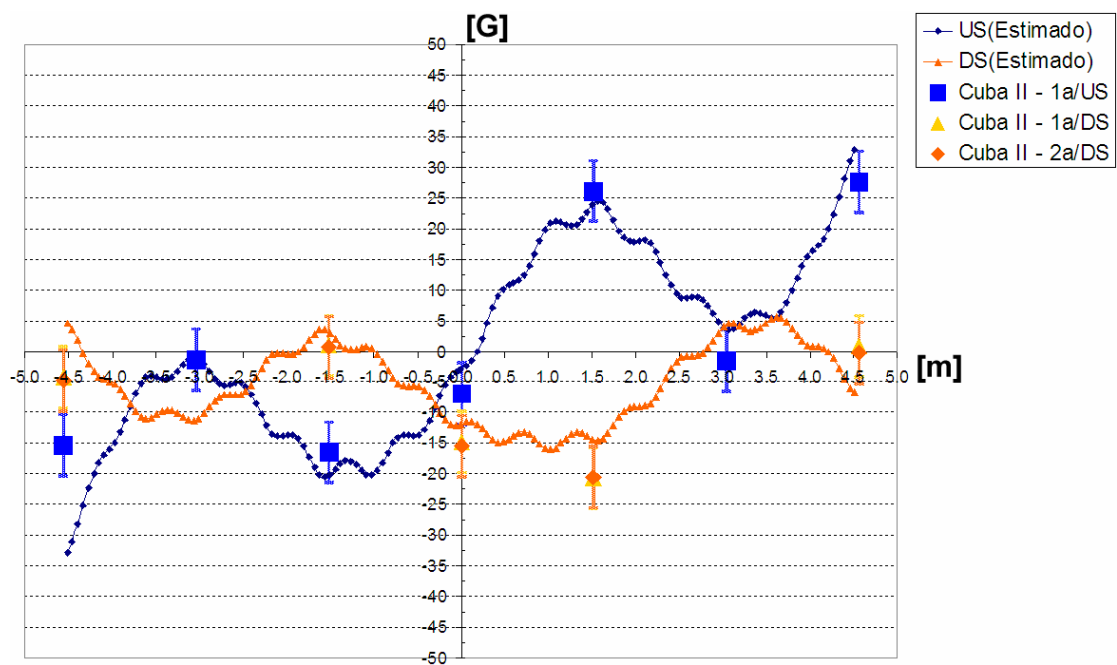


Figura 10: Comparação entre B_z medido e calculado para a Cuba II.

Discussão

Em ambas as situações a forma da componente longitudinal B_x sugerida pelas medições é reproduzida pelos resultados numéricos, observando-se o erro de medição ϵ . As diferenças observadas entre magnitudes dos pontos medidos e calculados são creditadas às simplificações do modelo de magnetização, onde os efeitos de histerese (histórico do casco) são desconsiderados e a curva B-H do aço

SAE 1020 à temperatura ambiente é utilizada. A correlação entre a curva sugerida pelos pontos medidos e calculados chega a 98,8% no *US* da Cuba I. A maior diferença observada é de 33% no ponto localizado em $X = -4,5$ m no *US* da Cuba I.

Com a utilização da corrente estimada nos ânodos a forma da componente vertical B_z também apresenta boa concordância entre resultados calculados e experimentais (observando-se o erro de medição ε , o que concorda com a literatura [1]). A correlação entre a curva sugerida pelos pontos medidos e calculados chega a 93,5% no *US* da Cuba II. A maior diferença observada entre valores numéricos e experimentais é de 60%, no ponto localizado em $X = -1,5$ m no *US* da Cuba I.

A componente transversal B_y , por sua vez, não apresenta boa correlação entre os ensaios e cálculos. Enumeram-se a seguir algumas possíveis causas para as discrepâncias:

- a magnitude de B_y é extremamente pequena na situação de projeto para a tecnologia ensaiada. Desta forma, é a componente mais severamente influenciável por possíveis erros de alinhamento;
- não foi possível calcular o modelo matemático utilizando-se a corrente nos ânodos e barras coletoras medida diretamente pela indisponibilidade de um sensor tipo Bobina de Rogowski. Assim, eventuais trincas e falhas no conjunto catódico ou até mesmo cargas distintas daquelas previstas pelo comportamento médio dos ânodos em função do seu tempo em serviço podem ter sido negligenciados. Estes fenômenos que podem alterar a distribuição de corrente elétrica.

Ao ensaiar outra tecnologia cujo B_y de projeto era igualmente diminuto, Ziegler e Kozarek [1] também não obtiveram sucesso na tentativa de correlacionar os dados medidos durante a campanha de medições para a componente transversal com os cálculos realizados. Ressalta-se, contudo, que os valores das médias históricas (obtidas ao longo de anos de monitoramento) apresentados pelos pesquisadores, aproximam-se das distribuições previstas pela situação de projeto.

Além disto, a experiência dos autores deste trabalho em cubas *side-by-side* (*side risers* e *end risers*) mostra que fornos com distribuições de B_y mais intensas conduzem a melhor concordância entre resultados experimentais e numéricos para a componente transversal.

Ressalta-se ainda que o modelo desenvolvido pode ser usado para estudar a resposta de um determinado forno em novas condições de operação; estudar o impacto de diferentes conjuntos catódicos (diferentes tipos de blocos catódicos e barras coletoras); além de comparar diferentes conceitos de barramentos – útil tanto em situações de *retrofit* quanto de novos *designs*. Ao ser utilizado em conjunto com modelos hidrodinâmicos permanentes pode-se avaliar o comportamento médio do escoamento do metal [4] e até mesmo a influência das diferentes geometrias de *slots* e dos canais entre ânodos no escoamento do banho [7].

Finalmente, ao utilizar-se o modelo magnético desenvolvido em conjunto com um modelo de instabilidade, pode-se avaliar a influência de diversas variáveis na oscilação da interface banho-metal, tais como: altura do metal, ACD, posição do *legde*, além de diferentes projetos de barramentos ou esquemas de compensação

magnética. Pode-se ainda verificar o impacto de diferentes seqüências de troca de ânodos na instabilidade magnética de cubas [8].

Conclusões

Concluí-se que o modelo desenvolvido representa adequadamente a forma das componentes mais importantes de \vec{B} para a tecnologia ensaiada (B_x e B_z), observando-se o erro da medição ε . Foram observadas correlações entre dados medidos e calculados de até 98,8% para B_x e 93,5% para B_z . A maior diferença registrada entre resultados numéricos e experimentais para a componente longitudinal B_x foi de 33% e para a componente vertical B_z de 60%.

O modelo desenvolvido pode ser usado no projeto de novas tecnologias bem como no *retrofit* de cubas existentes. Além disto, quando utilizado em conjunto com modelos hidrodinâmicos permanentes e de instabilidade, permite realizar um estudo completo do comportamento magnetohidrodinâmico de cubas eletrolíticas.

Referências Bibliográficas

1. ZIEGLER, D. P., KOZAREK, R. L. "Hall-Héroult Cell Magnetics Measurements and Comparison with Calculations". In: TMS Annual Meeting 1991. *Light Metals (1991)*, pp. 381-391.
2. SEGATZ, M., VOGELSANG, "D. Effect of Steel Parts on Manetic Fields in Aluminum Reduction Cells". In: TMS Annual Meeting 1991. *Light Metals (1991)*, pp. 393-398.
3. GUOHA , L., DEXIANG, L. "A New Method for Calculation of Magnetic Field in Aluminium Reduction Cell". In: TMS Meeting 1995. *Light Metals (1995)*, pp. 301-303.
4. SEVERO , D. S. et alii. "Modeling Magnetohydrodynamics Of Aluminum Electrolysis Cells With ANSYS And CFX". In: TMS Annual Meeting 2005. *Light Metals (2005)*.
5. ANSYS 9.0 Theory Reference, Cap. 5 - Electromagnetics.
6. YANG, S. et alii. "Magnetic Field Measurement and Calculation for 160 kA Prebake Cells in the Guizhou Aluminum Smelter". In: TMS Annual Meeting 2001. *Light Metals (2001)*.
7. SEVERO, D. S. et alii. "Modeling the Bubble Driven Flow in the Electrolyte as a Tool for Slotted Anode Design Improvement". In: TMS Annual Meeting 2007. *Light Metals (2007)*.
8. GUSBERTI, V. et alii. "Modeling the Effect of the Anode Change Sequence with a Non-Linear Shallow Water Stability Model". In: TMS Annual Meeting 2007. *Light Metals (2007)*.

Abstract

Primary aluminum is produced in electrolytic cells where bath and metal flow due to Lorentz Forces. This work presents the experimental validation in real pots of a 3-D magnetic field analysis methodology previously developed with the Finite Element commercial package ANSYS 9.0. A three-dimensional gauss meter, developed by PCE Ltda. and LMag/UFRGS, was used to measure the

internal magnetic flux density \bar{B} (at the metal pad level) of pre baked side-by-side Hall-Héroult cells. Numerical results fairly represent the most important \bar{B} components for the simulated technology (B_x and B_z), considering the measurement error ε . Correlation between measured and calculated values are up to 98,8% for B_x and 93,5% for B_z .