

Comparação entre resultados numéricos e experimentais para o campo magnético de cubas eletrolíticas de alumínio

(Numerical and experimental results comparison of magnetic fields in aluminium electrolysis cells)

André F. Schneider

Eng., PCE Engenharia S/S Ltda. LASID - PPGEM - UFRGS. E-mail: andre@pce.com.br

Dagoberto S. Severo

Eng., PCE Engenharia S/S Ltda. E-mail: dagoberto@pce.com.br

Vanderlei Gusberti

Eng., PCE Engenharia S/S Ltda. LASID - PPGEM - UFRGS. E-mail: vanderlei@pce.com.br

Elton C. V. Pinto

Eng., LASID - PPGEM - UFRGS. E-mail: elton@pce.com.br

Antônio Cezar Faria Vilela

Dr-Ing., LASID - PPGEM - UFRGS. E-mail: vilela@ufrgs.br

Resumo

A fabricação primária de alumínio dá-se em fornos onde banho e metal líquidos são movimentados a partir de Forças de Lorentz. Esse artigo apresenta a validação experimental em cubas reais de uma metodologia 3-D de análise eletromagnética de cubas eletrolíticas anteriormente desenvolvida com o pacote comercial de Elementos Finitos ANSYS 9.0. 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 . A maior diferença observada entre resultados numéricos e experimentais para a componente longitudinal B_x , é de 33% e, para a componente vertical B_z , é de 60%. Foram observadas correlações entre dados medidos e calculados de 98,8% para B_x e 93,5% para B_z .

Palavras-chave: Redução de alumínio, cuba eletrolítica, campos magnéticos, medições de campo magnético, simulação numérica, magnetohidrodinâmica.

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 previously introduced 3-D magnetic field analysis methodology developed with the commercial Finite Element package ANSYS 9.0. Numerical results represent fairly the most important \vec{B} components for the simulated technology (B_x and B_z), considering the measurement error ϵ . Maximum differences observed between experimental and numerical results are 33% for B_x and 60% for B_z . Correlation between measured and calculated values are up to 98,8% for B_x and 93,5% for B_z .

Keywords: Aluminum reduction, electrolytic pot, magnetic fields, magnetic field measurements, numerical simulation, magnetohydrodynamics.

1. 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 $-\nabla\sigma(\nabla\Phi)=0$. 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 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 desses 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 (Ziegler & Kozarek, 1991), Métodos Integrais (Segatz & Vogelsang, 1991) e Métodos Diferenciais.

Os modelos baseados em Métodos Diferenciais (Guoha & Dexiang, 1995) 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). Esse 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].

Ψ é 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 se deseja determinar \vec{B} , [m].

Tanto regiões de materiais magnetizáveis quanto não permeáveis precisam de ser modeladas, para que se possa calcular $\nabla\Psi$. A aplicabilidade do método é restrita às situações em que 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 (Schneider, 2006; Severo et al., 2005) a partir do pacote comercial ANSYS 9.0, utilizando-se o modelo Potencial Escalar Generalizado (GSP) (ANSYS Inc., 2004), 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

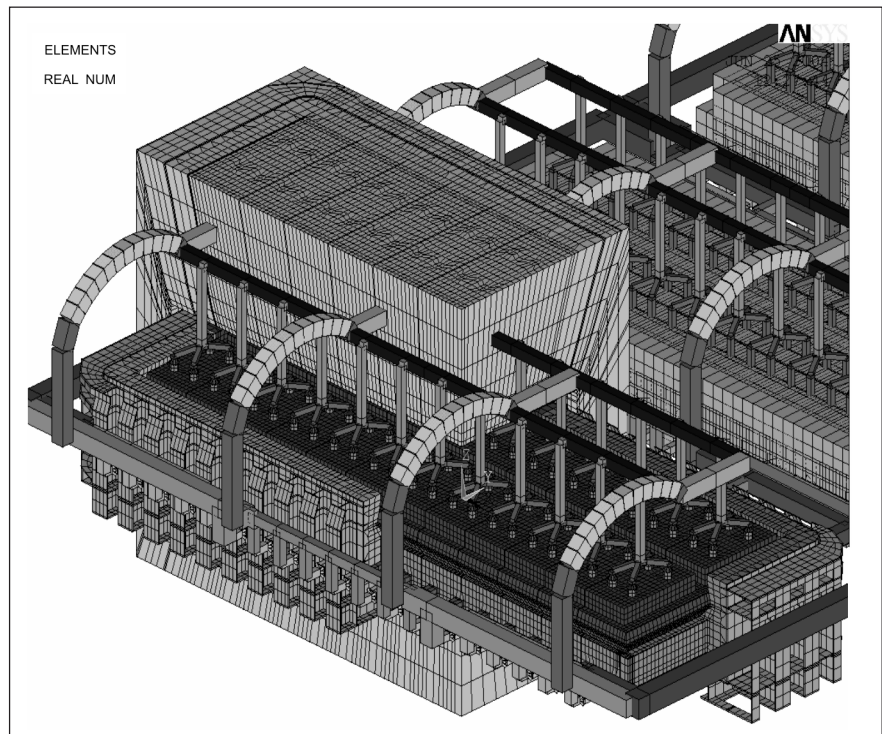


Figura 1 - Modelo matemático de uma cuba side-by-side com side risers de ânodos pré-cozidos.

ção (1), para todo o domínio, e a influência da componente ortogonal ao casco de \vec{H}_i é finalmente considerada.

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

2. 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 obtidos para as 3 componentes (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 (Ziegler & Kozarek, 1991).

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

A campanha de medições foi realizada, concomitantemente, com o regime de operação normal do forno, *i.e.*, a rotina de troca de ânodos e a corrida de metal bem como os 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 martetele hidráulico (quebra-crosta) da ponte rolante. A sonda foi introduzida até o nível do metal (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



Figura 2 - Campanha de medições magnéticas realizadas em outubro/novembro 2005.

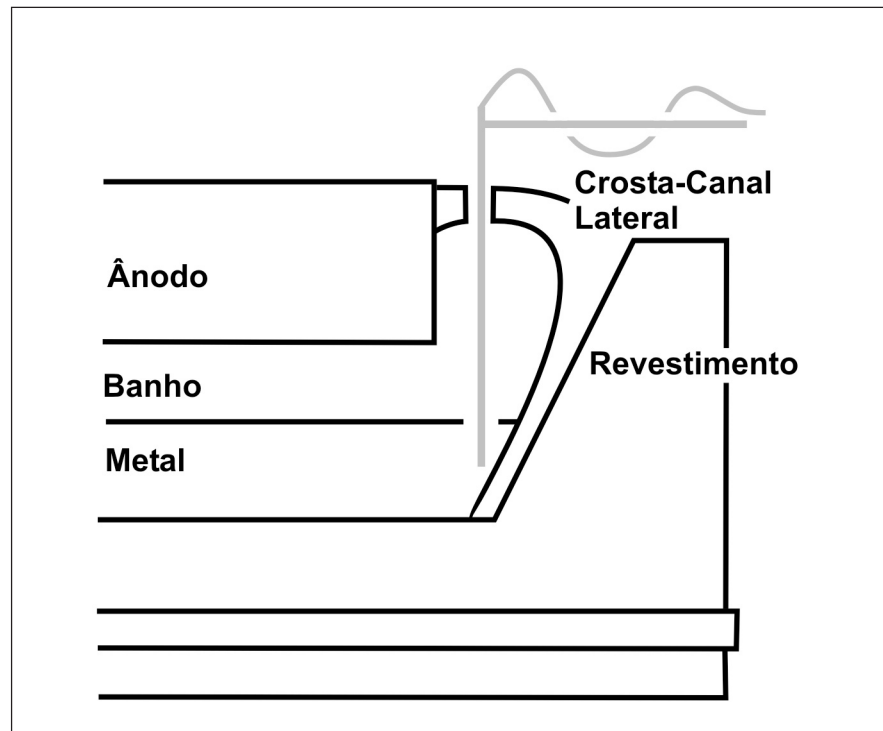


Figura 3 - Vista lateral do sensor em relação ao metal, ânodo e revestimento.

mento 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 $\epsilon = \pm 5 \text{ G}$ (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 $|\vec{B}| = 200 \text{ G}$).

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

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 (Ziegler & Kozarek, 1991; Yang, 2001) 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 (Ziegler & Kozarek, 1991) entre os resultados obtidos para várias cubas da mesma tecnologia e que o comportamento médio dos equipamentos pode ser obtido ao longo de grande período de observação.

Assim, no que tange à distribuição de corrente anódica e catódica:

- Utilizaram-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 bar-

ras 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 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 representados 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.

3. 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).

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 *US* e *DS*, no nível do metal.

4. 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,

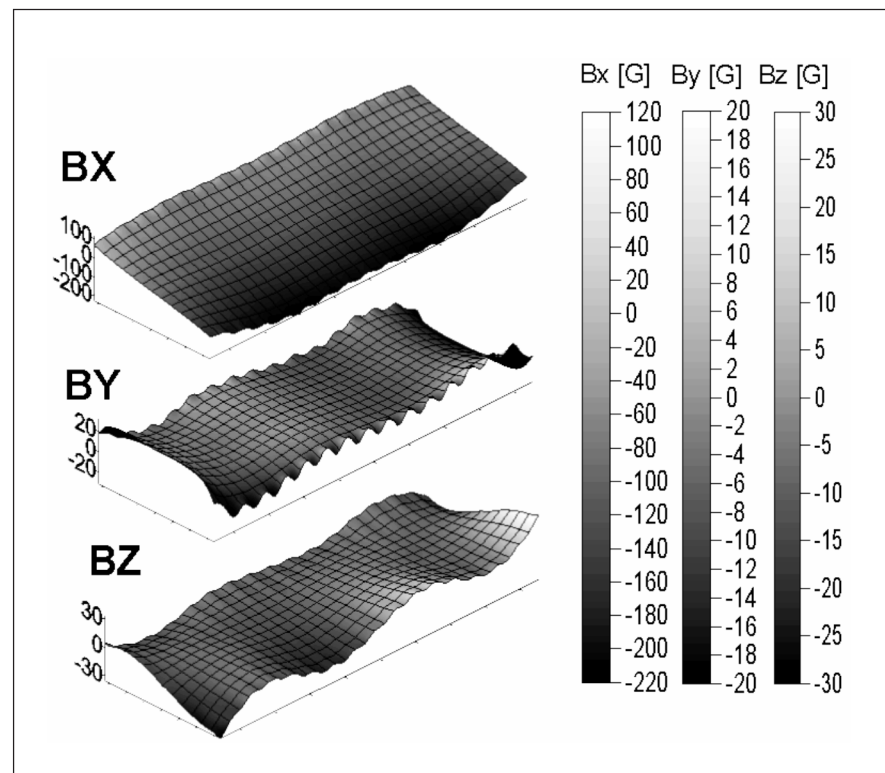


Figura 4 - Distribuições das 3 componentes de \vec{B} para a tecnologia ensaiada.

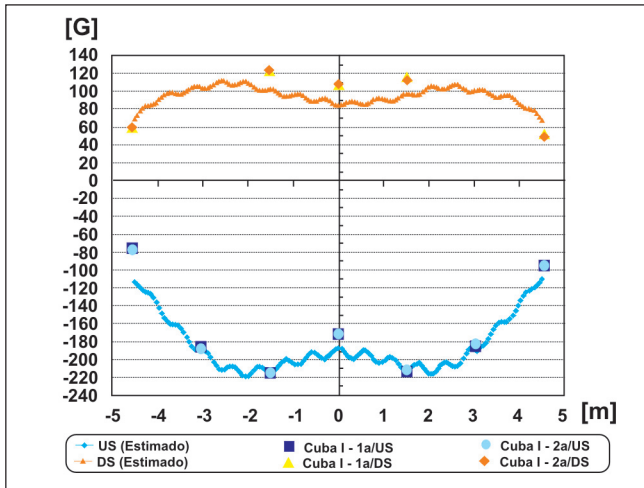


Figura 5 - Comparação entre B_x medido e calculado para a Cuba I.

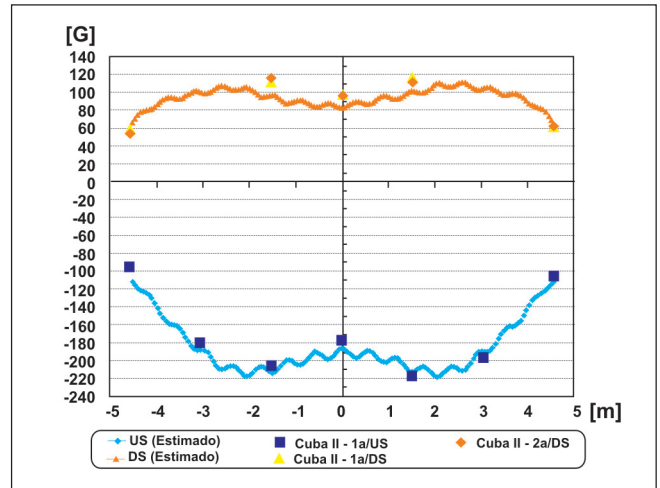


Figura 8 - Comparação entre B_x medido e calculado para a Cuba II.

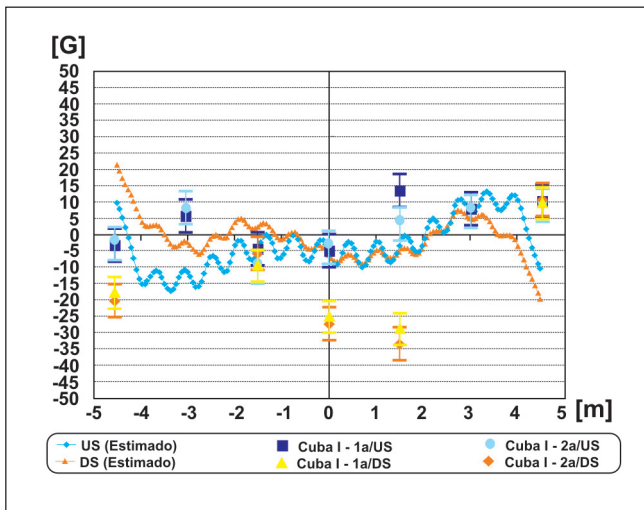


Figura 6 - Comparação entre B_y medido e calculado para a Cuba I.

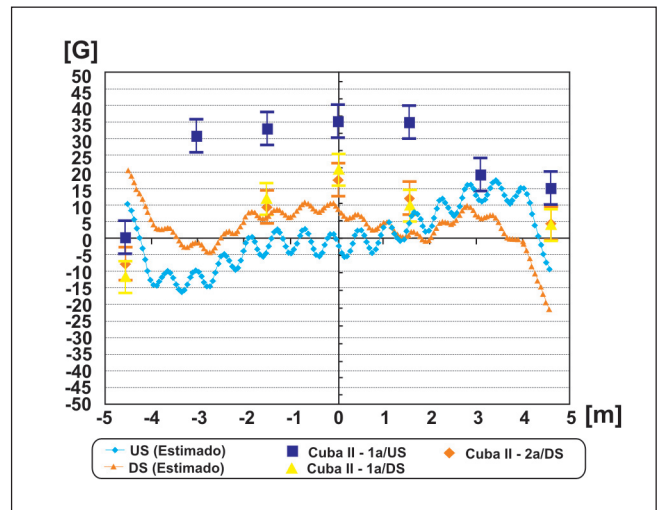


Figura 9 - Comparação entre B_y medido e calculado para a Cuba II.

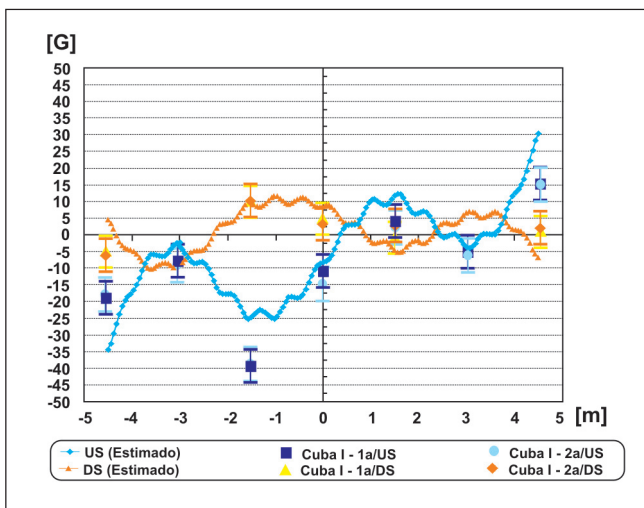


Figura 7 - Comparação entre B_z medido e calculado para a Cuba I.

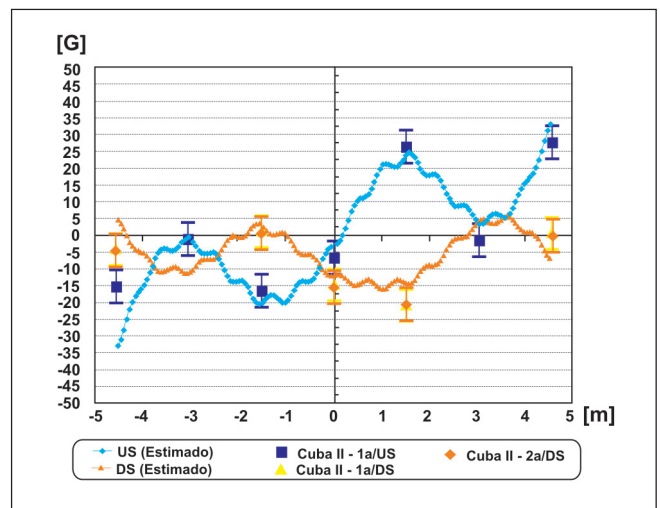


Figura 10 - Comparação entre B_z medido e calculado para a Cuba II.

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 maior diferença observada é de 33% no ponto localizado em $X = -4,5$ m no US da Cuba I. A correlação entre a curva sugerida pelos pontos medidos e calculados chega a 98,8% no US da 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 (Ziegler & Kozarek, 1991). 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 correlação entre a curva sugerida pelos pontos medidos e calculados chega a 93,5% no US da II.

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

- A magnitude de B_y é pequena na situação de projeto para a tecnologia ensaiada ($< |20|$ G). Dessa 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, eventos corriqueiros como trincas e/ou falhas no conjunto catódico e cargas distintas da

quelas previstas pelo comportamento médio dos ânodos em função do seu tempo em serviço podem ter sido negligenciados. Esses fenômenos podem alterar a distribuição de corrente elétrica.

Ao ensaiar outra tecnologia cujo B_y de projeto era, igualmente, diminuto, Ziegler e Kozarek (1991) 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) apresentadas pelos pesquisadores aproximam-se das distribuições previstas pela situação de projeto.

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

5. Conclusões

Conclui-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 . A maior diferença observada entre resultados numéricos e experimentais, para a componente longitudinal B_x , é de 33% e para a componente vertical B_z , é de 60%. Foram observadas correlações entre dados medidos e calculados de 98,8% para B_x e 93,5% para B_z .

6. Referências bibliográficas

1. ANSYS Inc., ANSYS 9.0 Theory Reference, Cap. 5 - Electromagnetics (2004).
2. GUOHA, L., DEXIANG, L. A new method for calculation of magnetic field in aluminium reduction cell. In: TMS Meeting 1995. *Light Metals*, 1995. p. 301-303.
3. 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: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-(PPGEM), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2006. 107p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia).
4. SEGATZ, M., VOGELSANG, D. Effect of steel parts on manetic fields in aluminum reduction cells. In: TMS Annual Meeting 1991. *Light Metals*, 1991. p. 393-398.
5. SEVERO, D. S. et al. Modeling magnetohydrodynamics of aluminum electrolysis cells with ANSYS and CFX. In: TMS Annual Meeting 2005. *Light Metals*, 2005.
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. ZIEGLER, D. P., KOZAREK, R. L. Hall-heroult cell magnetics measurements and comparison with calculations. In: TMS Annual Meeting 1991. *Light Metals*, 1991. p. 381-391.

Artigo recebido em 02/06/2006 e aprovado em 18/06/2008.