

UMA ANÁLISE DE CIRCULAÇÃO NATURAL DO URÂNIO FUNDIDO

Francisco Antonio Braz Filho, fbraz@ieav.cta.br¹
Eduardo Madeira Borges, eduardo@ieav.cta.br¹

¹Instituto de Estudos Avançados, Rodovia dos Tamoios, km 5, Putim, São José dos Campos, SP, 12.228-001

Resumo: A melhoria da eficiência de um sistema de enriquecimento isotópico de urânio a laser, via vapor metálico, depende, em parte, do estudo da fusão do urânio através de um canhão de elétrons. O software FLUENT será utilizado na simulação do fenômeno da transferência de calor e escoamento do urânio fundido contido em um cadinho de cobre refrigerado a água. As principais forças atuantes no fenômeno estudado, que fazem o líquido se movimentar, são devidas à convecção natural e à tensão superficial (convecção de Marangoni). As hipóteses consideradas nesta simulação são: estado estacionário e geometria bidimensional. Embora tenham sido realizadas experiências com a fusão do urânio, as velocidades e temperaturas não foram medidas.

Palavras-chave: convecção natural, Marangoni, fusão de urânio, enriquecimento isotópico a laser, FLUENT.

1. INTRODUÇÃO

O projeto JAVARI-1 (Rodrigues, 2008), em desenvolvimento no Instituto de Estudos Avançados (IEAv), consiste no enriquecimento isotópico de urânio a laser via vapor metálico. O urânio é fundido através de um canhão de elétrons em um ambiente a vácuo. O vapor de urânio produzido é bombardeado pelo laser ionizando o isótopo 235 do urânio, que é extraído através de um campo magnético e/ou elétrico.

O urânio na fase líquida é bastante corrosivo, por isso a fusão e a conseqüente evaporação do metal devem ser efetuadas com o uso de um cadinho de cobre refrigerado a água. Esta técnica de evaporação, normalmente utilizada para se evaporar materiais refratários e/ou corrosivos, possui uma eficiência térmica muito baixa. Somente uma pequena parte da potência do feixe de elétrons é convertida em calor para a evaporação do metal, o restante desta potência é transformado em perdas por radiação, condução e convecção. A taxa de evaporação depende principalmente da temperatura, quanto mais alta, maior será a produção de vapor, porém, o urânio, na temperatura de fusão, reage com o cadinho na forma de um ataque corrosivo. Para se acomodar esta situação, deve-se projetar um sistema onde se obtenha a mais alta temperatura possível sem que o cadinho seja atacado. Outro problema encontrado foi a ocorrência, em uma das experiências realizadas, de uma excessiva movimentação do urânio fundido no cadinho, levando ao derramamento do metal fundido na câmara que contem o sistema. Várias hipóteses estão sendo estudadas, tais como, impurezas contidas no metal, pontos quentes devido ao perfil de potência e movimentação relacionada com forças naturais como convecção e tensão superficial.

O objetivo deste trabalho é a simulação do fenômeno termo-hidráulico ocorrido durante o aquecimento do urânio fundido, utilizando-se o software FLUENT (Ansys, 2006). O movimento do fluido é considerado devido às forças de convecção natural e de tensão superficial (convecção de Marangoni). A fusão e evaporação do urânio é problemática por se tratar de um elemento radioativo, portanto é de grande importância o conhecimento e a simulação deste fenômeno para que experiências futuras possam ser realizadas com segurança.

Serão apresentadas as seções: descrição do problema, geometria e malha computacional, modelos e métodos adotados, resultados e comentários finais.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O cadinho está contido em um ambiente a vácuo, portanto, as perdas por convecção na superfície do urânio são desprezíveis. Inicialmente, o cadinho encontra-se à temperatura ambiente quando o canhão começa a fornecer potência. Neste momento o sistema de refrigeração já está ativado. A potência do canhão, em parte, é absorvida pelo urânio contido no cadinho, em parte, é refletida, estima-se que 60% (Braz Filho, 2009) da potência total seja refletida. O calor absorvido pelo urânio é gasto em fundi-lo (mudança de fase), parte é retirada pelo sistema de refrigeração, parte é perdida por radiação e parte por evaporação do urânio. Quando se atingir o estado estacionário todo o calor absorvido é perdido pelo sistema de refrigeração, radiação na superfície do cadinho e evaporação do urânio.

Inicialmente, o objetivo será a simulação do fenômeno quando este atingir o estado estacionário, ou seja, quando toda a massa de urânio derretida permanecer constante, neste caso não ocorre mudança de fase.

3. GEOMETRIA E MALHA COMPUTACIONAL

As dimensões do cadinho no formato de um paralelepípedo são: comprimento de 127 mm, espessura de 55 mm e altura de 31 mm, como mostra a Fig. (1).

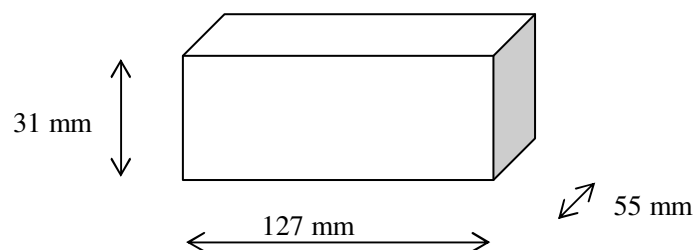


Figura 1. Geometria do cadinho.

O urânio foi bombardeado por um canhão de elétrons com potência de 15 kW numa área de espessura de 6 mm e tamanho igual ao comprimento do cadinho, localizada no centro do cadinho com incidência formando um ângulo de 45° com a normal. A refrigeração em baixo do cadinho e nas laterais podem ser consideradas homogêneas, de tal forma, que se podem traçar três linhas de simetria para o problema, como mostra a Fig. (2). Para a simulação do problema em 2D foi escolhida a seção indicada na Fig. (2).

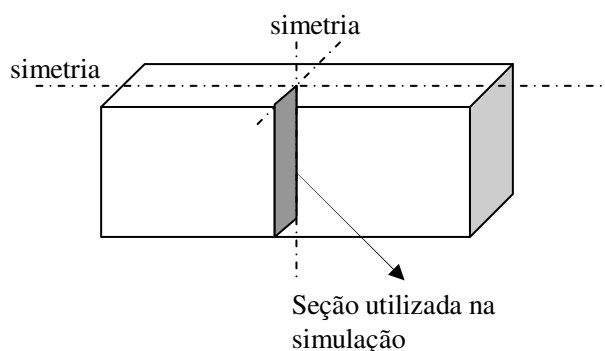


Figura 2. Seção utilizada na simulação 2D.

Foi utilizada uma malha computacional não estruturada triangular com 1 mm de lado, inicialmente, e uma segunda de 0,5 mm de lado sem mudanças no resultado. O software GAMBIT (Ansys, 2006) foi utilizado para criar a peça e construir a malha, como mostra a Fig. (3).

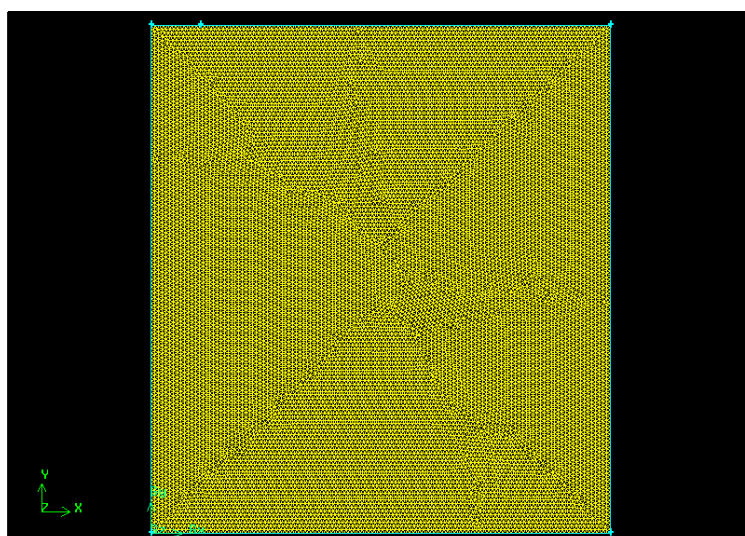


Figura 3. Malha computacional utilizada na simulação.

4. MODELOS E MÉTODOS DE CÁLCULO

Como apresenta a Seção 2 a análise será realizada quando o regime atingir o estado estacionário, neste momento não ocorre mudança de fase, pois a massa de urânio fundida permanece constante. Toda energia absorvida pelo urânio é perdida por radiação e evaporação na superfície externa do cadinho e por condução nas paredes do cadinho e convecção para a água de refrigeração. O urânio movimenta-se no cadinho devido às forças de empuxo (convecção natural) e tensão superficial (Marangoni).

Para simulação de convecção natural no FLUENT existem duas alternativas: i) em estado transitório, a densidade variando com a temperatura; e ii) em estado estacionário, o modelo de Boussinesq. A alternativa adotada foi o modelo de Boussinesq.

O modelo de Boussinesq trata a densidade como constante em todas as equações resolvidas, exceto para o termo de empuxo na equação da quantidade de movimento:

$$(\rho - \rho_0)g = -\rho_0 \beta(T - T_0)g, \quad (1)$$

onde ρ_0 é a massa específica (constante) do fluido, T_0 é a temperatura de operação e β é o coeficiente de expansão térmica. Esta aproximação é válida quando $\beta(T - T_0)$ é muito menor que 1.

As equações que são resolvidas pelo FLUENT estão listadas a seguir.

A equação da energia é dada por:

$$\nabla \cdot (\rho_0 u h - K \nabla T - \tau \cdot u) = u \cdot \nabla p + S_h, \quad (2)$$

onde, h é a entalpia, p é pressão do fluido estática, K é a condutividade térmica, u é a velocidade do fluido, T é a temperatura e τ representa a tensão viscosa. S_h representa todas as fontes de calor e as perdas por radiação, condução e evaporação, etc.

A equação da quantidade de movimento é dada por:

$$\nabla \cdot (\rho_0 u \otimes u + pI - \tau) = \rho g + F, \quad (3)$$

I é o tensor identidade, g aceleração da gravidade, ρ é a massa específica variável (modelo de Boussinesq) e F a soma das forças de superfície (inclusive Marangoni)

A equação da continuidade é dada por:

$$\nabla \cdot (\rho_0 u) = 0. \quad (4)$$

Outro aspecto importante é a definição a priori do escoamento que deve se estabelecer, laminar ou turbulento, para que se possa escolher, dentre as possibilidades do FLUENT, o modelo mais adequado. No caso de convecção natural pura, o número adimensional que define o tipo de regime de escoamento é o número de Rayleigh ($Ra = Gr \times Pr$), onde Pr

é o número de Prandtl e Gr é o número de Grashof definido como: $Gr = \frac{g\beta(\Delta T)L_c^3}{\nu^2}$, onde L_c é o comprimento característico do problema. Para o caso em estudo tem-se aproximadamente $\Delta T = 800$ °C e $L_c = 0,055/2 = 0,0275$ m, portanto: $Gr = 1,3 \cdot 10^8$ e $Pr = 0,0261$, assim $Ra = 3,4 \cdot 10^6$, desta forma, em princípio, o escoamento encontra-se no regime laminar ($10^4 < Ra < 10^9$).

Na região compreendida pelas paredes do cadinho, serão adotadas duas possibilidades de transferência de calor: i) temperatura de fusão do urânio, uma vez que próximo às paredes do cadinho o urânio encontra-se pastoso; e ii) convecção para a água de refrigeração. A Figura (4) denomina as regiões onde as condições de contorno foram aplicadas.

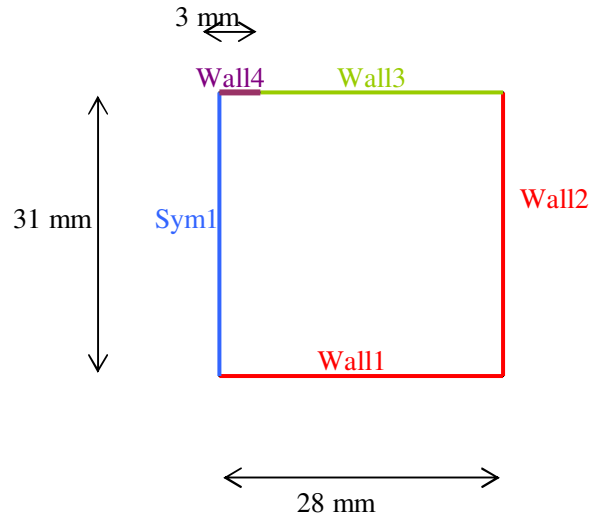


Figura 4. Condições de contorno utilizadas na simulação.

A região Sym1 corresponde a uma condição de contorno de simetria. Os lados Wall1 e Wall2 correspondem ao chão e lateral do cadinho, respectivamente, e foram utilizadas condições de contorno de parede (NO SLIP) com duas situações especificadas para a transferência de calor (equação da energia): temperatura especificada ou convecção. Para temperatura especificada foi considerada a temperatura de fusão do urânio ($T_f=1405$ K (Braz Filho, 2009)). Para condição de convecção foi fornecido o coeficiente global de troca de calor ($U=450$ W/m² K (Braz Filho, 2009)) e a temperatura média do refrigerante ($T_r=300$ K). A condição Wall3 é a superfície livre que irradia calor. Neste caso, foi considerada condição de contorno de radiação (emissividade (ϵ) igual a 0.2 e temperatura externa (T_e) igual a 300 K), aplicada na equação da energia. Para a equação da quantidade de movimento aplica-se a tensão de cisalhamento especificada (τ) devido à força de Marangoni:

$$\tau = \frac{d\sigma}{dT} \nabla_s T \quad , \quad (5)$$

onde, $d\sigma/dT$ é o gradiente da tensão superficial com relação à temperatura (fornecida pelo usuário) e $\nabla_s T$ é o gradiente de temperatura na superfície. Da mesma forma, Wall4 é a superfície livre que recebe o fluxo de calor do canhão de elétrons ($7,9 \cdot 10^6$ W/m² (Braz Filho, 2009)), com tensão de cisalhamento definida na Eq. (2). O fluxo de calor perdido devido à evaporação do urânio foi considerado desprezível (Braz Filho, 2009).

Nos manuais do FLUENT é recomendado, no caso de convecção natural, o método SIMPLE para o acoplamento pressão-velocidade, PRESTO para a discretização da pressão, “Second Order Upwind” para a quantidade de movimento e energia. Exatamente com estas condições o problema não convergiu, nem iniciando o caso com “First Order Upwind” e depois continuando com o “Second Order Upwind”. Depois de várias tentativas observou-se que a não convergência está relacionada com a utilização de um método de segunda ordem para a quantidade de movimento. A opção mais próxima da recomendada foi: SIMPLE para o acoplamento pressão-velocidade, PRESTO para discretização da pressão, “Second Order Upwind” para a energia e “Power Law” para a quantidade de movimento. Alternativas, como os métodos SIMPLER e PISO, foram testadas e apresentaram variações menores que 1 %.

5. RESULTADOS

Com o objetivo de se entender melhor o fenômeno estudado, uma seqüência de três testes foi montada. Primeiro, foram simulados dois testes não considerando a força de Marangoni, ou seja, a movimentação do urânio fundido é devida apenas à convecção natural. Neste caso, foram utilizadas para as condições de contorno nas paredes do cadinho: caso A1 – temperatura especificada, ou caso A2 – troca de calor entre o urânio e a água de refrigeração do cadinho (convecção). Em seguida, foi simulado um caso levando-se em conta a força de Marangoni, caso B. Nesta situação, foi utilizada a condição de contorno nas paredes do cadinho a troca de calor entre o urânio e a água de refrigeração do cadinho (convecção).

O caso A1 é uma tentativa de simplificar ao máximo a simulação do fenômeno, para se estudar o efeito do número de elementos e parâmetros utilizados na solução numérica (fatores de convergência). A temperatura especificada no caso A1 é a temperatura de fusão do urânio uma vez que foi observado na experiência realizada que o metal encontrava-se pastoso próximo às paredes do cadinho. A Figura (5) indica que a distancia entre o piso do cadinho até pouco acima da metade da altura do cadinho a temperatura do urânio permanece constante. Na verdade, deveria existir um gradiente acentuado até o cadinho, ou seja, provavelmente o urânio encontra-se congelado até esta altura, como será mostrado nos

próximos casos. Isto leva a uma solução errada do campo de velocidades apresentado na Fig. (6). O escoamento encontra-se circulando em toda a extensão do cadinho.

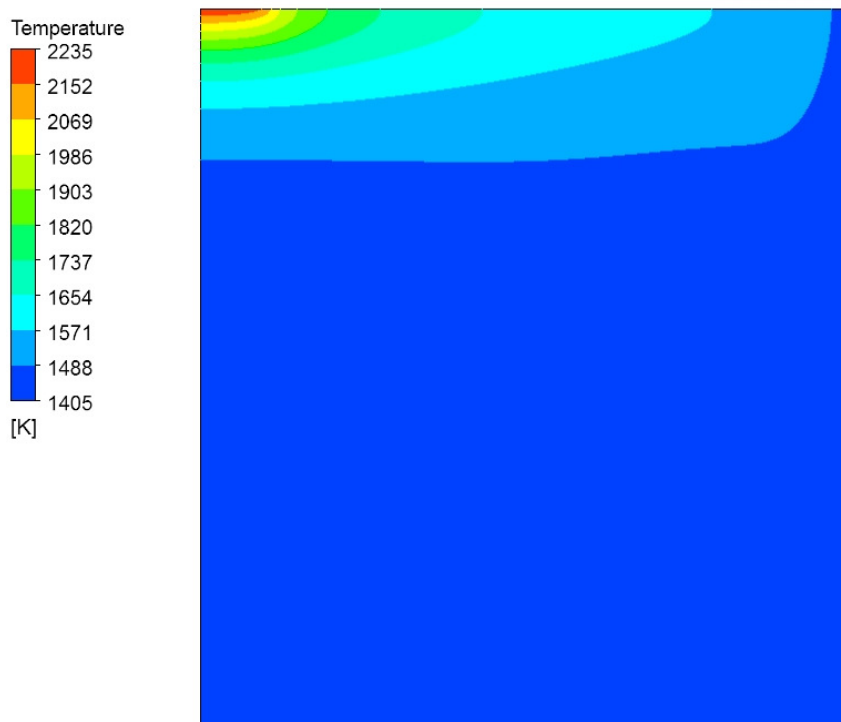


Figura 5. Isolinhas de temperaturas para o caso A1.

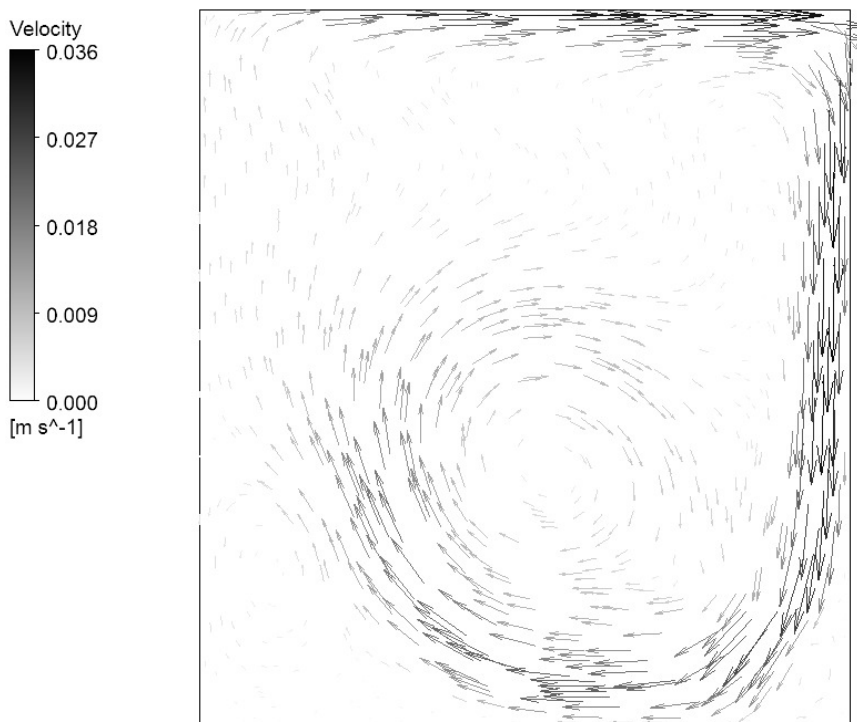


Figura 6. Vetores das velocidades para o caso A1.

No caso A2 os resultados são mais coerentes com o esperado, ou seja, o urânio mantém-se abaixo da temperatura de fusão por volta da metade da altura do cadinho, como mostra a Fig. (7) e a circulação do metal líquido ocorre principalmente na metade superior, como pode ser visto na Fig. (8).

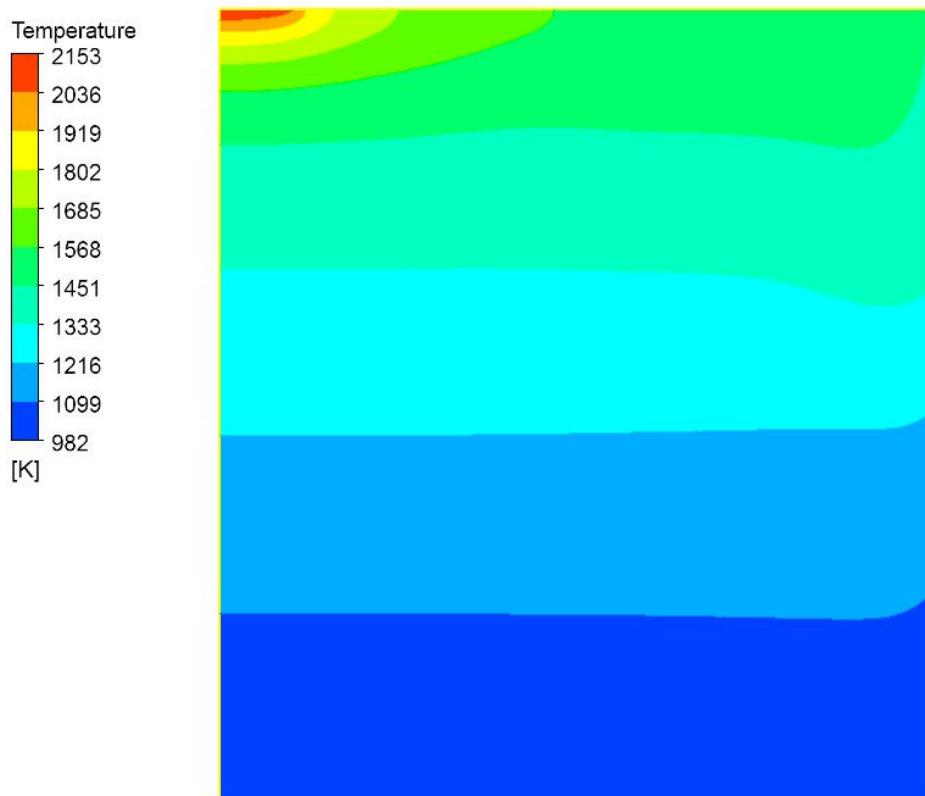


Figura 7. Isolinhas de temperaturas para o caso A2.

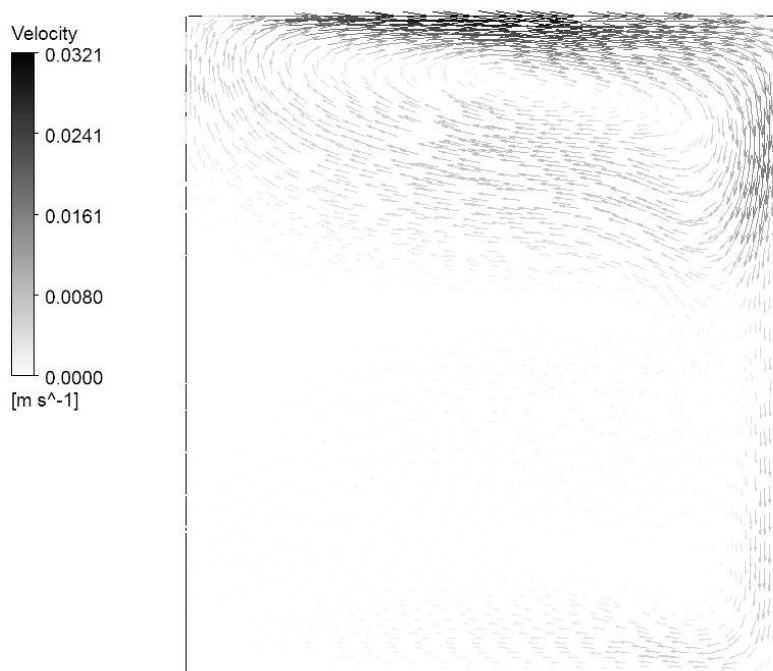


Figura 8. Vetores das velocidades para o caso A2.

As Figuras (9) e (10) mostram os perfis de temperatura na superfície externa do cadinho (topo) e na linha de simetria para os casos A1 e A2 respectivamente. As temperaturas máximas obtidas foram 2235 K para o caso A1 e 2153 K para o caso A2. As principais diferenças encontram-se na metade de baixo do cadinho onde a temperatura do urânio permanece constante para o caso A1 e existe um gradiente acentuado para o caso A2.

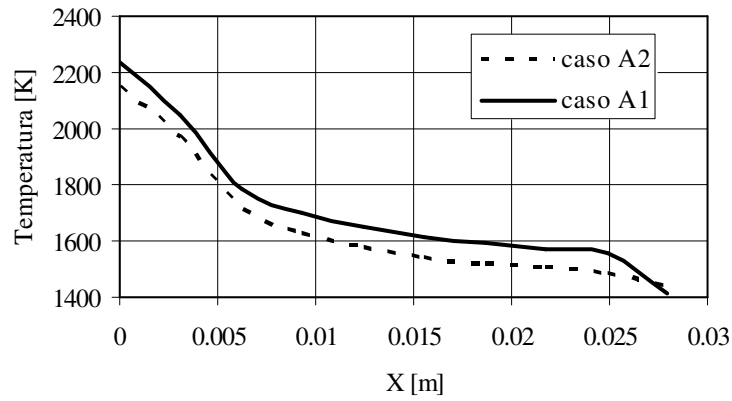


Figura 9. Perfil das temperaturas no topo do cadinho para os casos A1 e A2.

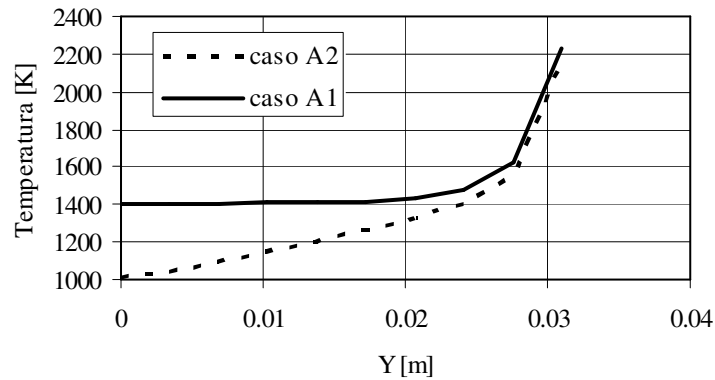


Figura 10. Perfil das temperaturas na linha de simetria do cadinho para os casos A1 e A2.

A Figura (11) apresenta o perfil de velocidade no topo do cadinho para os casos A1 e A2. As velocidades máximas obtidas são 0,036 m/s para o caso A1 e 0,032 m/s para o caso A2 localizadas próximas da metade do topo.

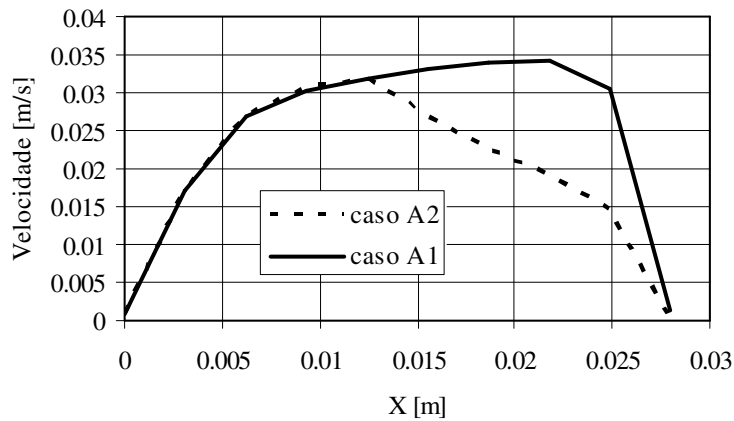


Figura 11. Perfil das velocidades no topo do cadinho para os casos A1 e A2.

As Figuras (12) e (13) mostram as isolinhas das temperaturas e os vetores de velocidade para o caso B. A velocidade máxima obtida é de 0,108 m/s, ou seja, mais de três vezes maior que a do caso A2, o que demonstra a importância de se considerar a convecção de Marangoni na simulação do fenômeno. Comparando-se os casos A2 e B, a circulação do metal líquido é um pouco deslocada para a esquerda considerando-se Marangoni.

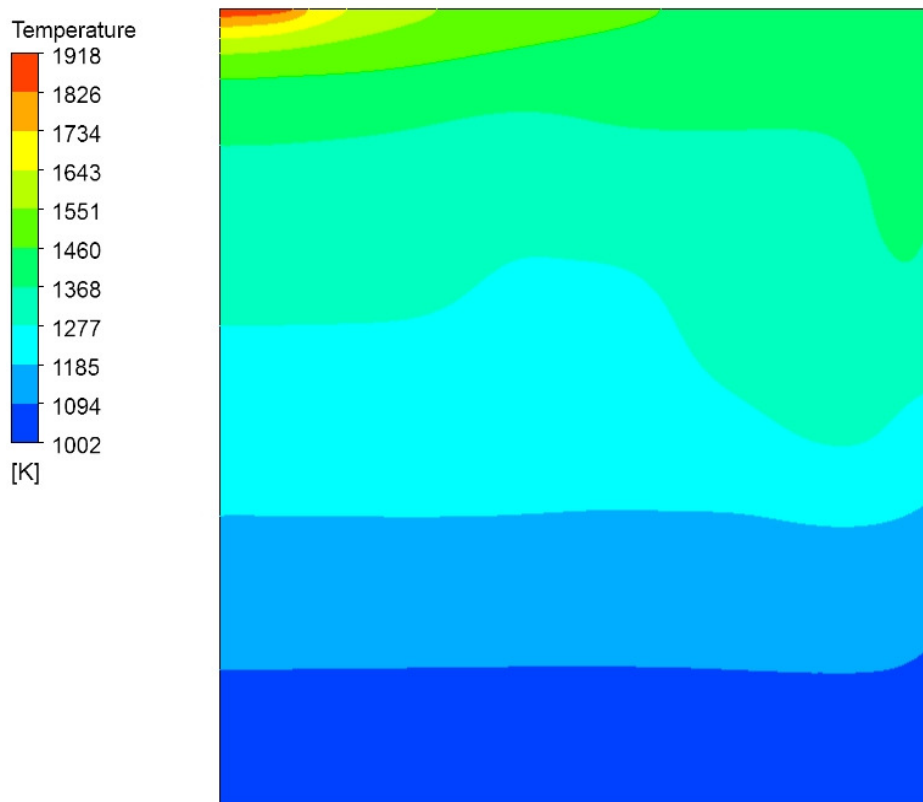


Figura 12. Isolinhas de temperaturas para o caso B.

As Figuras (14) e (15) mostram os perfis de temperatura no topo e na linha de simetria respectivamente, comparando-se os casos A2 e B, o perfil de temperatura apresenta valores mais baixos para o caso B. Isto é atribuído à maior velocidade de circulação para este caso. A temperatura máxima para o caso B é de 1918 K.

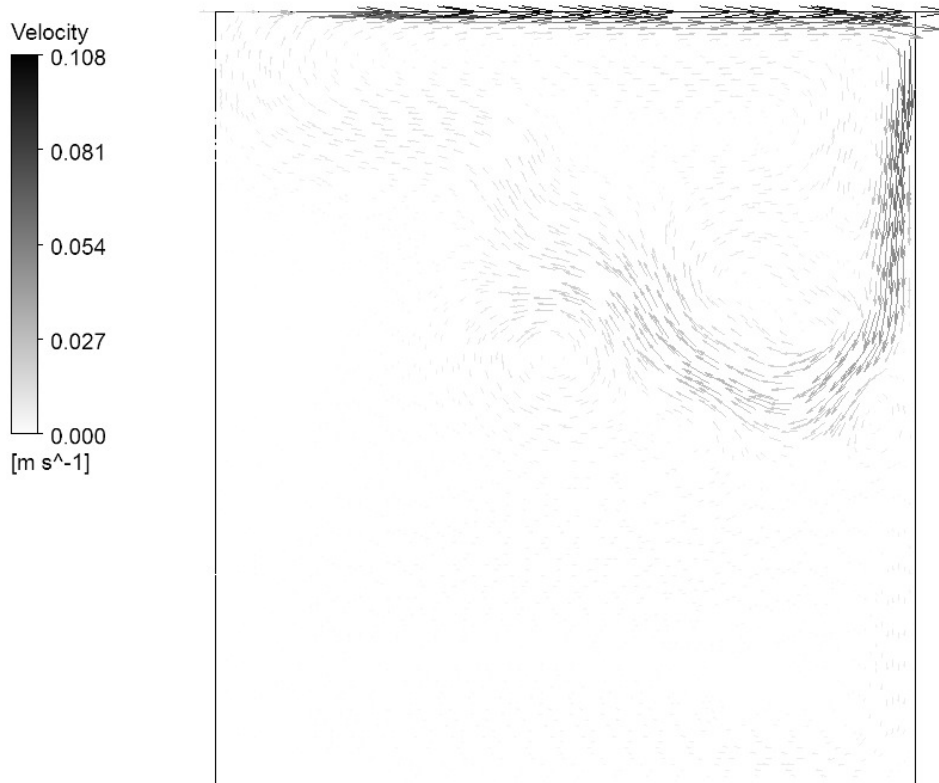


Figura 13. Vetores das velocidades para o caso B.

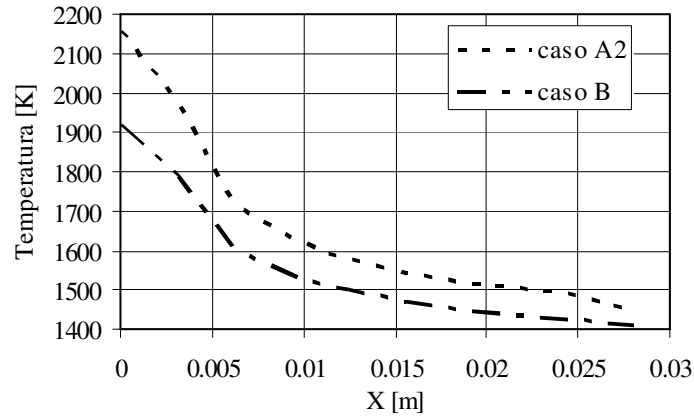


Figura 14. Perfil das temperaturas no topo do cadinho para os casos B e A2.

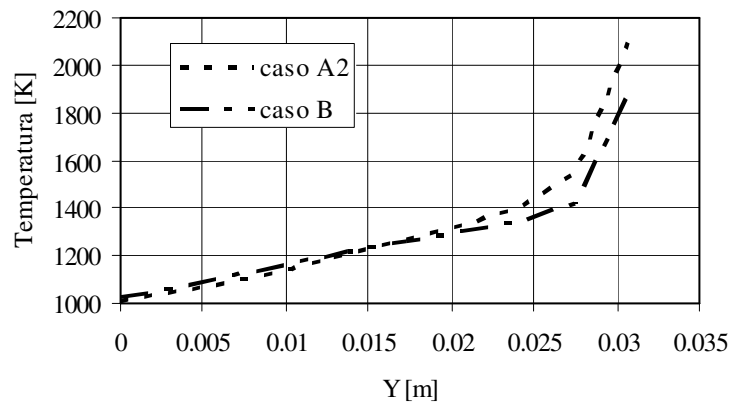


Figura 15. Perfil das temperaturas na linha de simetria do cadinho para os casos B e A2.

6. COMENTÁRIOS FINAIS

O objetivo do trabalho foi o de simular a transferência de calor e o escoamento do urânio fundido contido num cadinho de cobre refrigerado à água. Numa experiência realizada anteriormente ocorreram alguns problemas, levando o urânio a derramar para fora do cadinho. A principal motivação deste estudo é o de entender o fenômeno e projetar um sistema seguro e eficiente. Da experiência anterior observou-se que o urânio líquido não tocava o cadinho e a temperatura do metal alcançou por volta de 2000 K, medida indiretamente pelo material recolhido.

Nesta primeira simulação consideraram-se geometria bidimensional e estado estacionário, assim, toda a massa de urânio que deveria fundir já estaria derretida, não ocorrendo mudança de fase.

Dois modelos foram utilizados: com apenas convecção natural (caso A) e, outro, somando-se o efeito da força de Marangoni (caso B). A temperatura máxima e a velocidade máxima para o caso A2 foram respectivamente 2153 K e 0,032 m/s, enquanto que para o caso B foram de 1918 K e 0,108 m/s. Neste caso, como o gradiente da tensão superficial para o urânio é negativo, as forças de convecção natural e Marangoni somam-se, tornando a velocidade máxima três vezes maior para o caso B, forçando uma maior circulação e, conseqüentemente, as temperaturas ficam mais baixas.

Este modelo ainda é muito simplificado e não representa totalmente o fenômeno, pois para a simulação, todo urânio contido no cadinho, é considerado líquido e os cálculos realizados indicam que mais da metade inferior do metal no recipiente deve estar congelada. A próxima etapa do trabalho será a simulação do transitório com mudança de fase, considerando o urânio sólido sendo fundido até o regime de estado estacionário. A completa representação deste estudo será com a simulação do problema em uma geometria tridimensional.

7. REFERÊNCIAS

- Rodrigues N. A. S., Destro M. G., Néri J. W. e Silveira C. A. B., 2008, "Projeto Javari-1: Fase 3", Atividades de Pesquisa e Desenvolvimento, Instituto de Estudos Avançados- IEAv, volume 1, ISSN: 1983-1544, São José dos Campos.
- Ansys, 2006, "FLUENT 6.3 Documentation".

Braz Filho F. A. e Borges E. M., 2009, “JA1/ENU1 – Relatório da Preparação dos Dados de Entrada para Simulação da Fusão do Urânio com o Software FLUENT”, Publicação Interna do IEAv, IEAv-ENU-T/003/2009.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

AN ANALYSIS OF NATURAL CIRCULATION OF MELTED URANIUM

Francisco Antonio Braz Filho, fbraz@ieav.cta.br¹

Eduardo Madeira Borges, eduardo@ieav.cta.br¹

¹Instituto de Estudos Avançados, Rodovia dos Tamoios, km 5, Putim, São José dos Campos, SP, 12.228-001

Abstract: *Improving the efficiency of a laser isotopic enrichment system of uranium, through metal vapor, depends, in part, on the study of the uranium fusion by an electron beam. FLUENT software is used to simulate the phenomenon of heat transfer and fluid flow of molten uranium contained in copper crucible water cooled. The main forces acting on the phenomenon, which make the fluid flow, are due to natural convection and surface tension (Marangoni force). The hypotheses considered in this simulation are: steady state and two-dimensional geometry. Although they have been experimenting with the fusion of uranium, the velocities and temperatures were not measured.*

Keywords: *natural convection, Marangoni, melted uranium, laser isotope enrichment, FLUENT*