

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA FORMAÇÃO DO CASCÃO DE AÇO NO INTERIOR DO CONJUNTO DAS VÁLVULAS REFRAATÁRIAS DO DISTRIBUIDOR DO LINGOTAMENTO CONTÍNUO DA CST

HENRIQUE SILVA FURTADO ⁽¹⁾
SANDRO DE SOUZA SANTOS ⁽²⁾
CARLOS EDUARDO FONTES ⁽³⁾
FLÁVIO QUEIROZ GUIMARÃES ⁽⁴⁾
RAINER FERREIRA DE OLIVEIRA ⁽⁵⁾

O trabalho apresenta uma modelagem computacional, utilizando o software PHOENICS, da solidificação do aço na tubulação refratária que liga o distribuidor ao molde do lingotamento contínuo. O objetivo é determinar os principais fatores e seus níveis críticos para a ocorrência da obstrução dos veios no início do lingotamento.

Os resultados do processo de validação mostram boa consistência do modelo adotado e uma boa correlação dos seus resultados com as temperaturas medidas nas paredes refratárias.

As análises foram realizadas nas máquinas de lingotamento contínuo #1 e #2, em modo “single” e “twin”, utilizando dois aços com teores de carbono diferentes. Os resultados mostraram que o superaquecimento do aço no distribuidor, a temperatura inicial do refratário, a vazão e o teor de carbono do aço foram os fatores mais críticos para o processo de obstrução por solidificação.

Palavras Chaves : lingotamento contínuo, obstrução, simulação numérica

XXXV SEMINÁRIO DE FUSÃO & V SEMINÁRIO DE FUNDIÇÃO – 2004 – INTERNACIONAL, 17 A 19 DE MAIO DE 2004 – SALVADOR - BAHIA – BRASIL.

- 1- Engenheiro Metalúrgico, MSc, Especialista Sênior da Divisão Técnica da Aciaria da CST
- 2- Engenheiro Metalúrgico, Especialista da Divisão Técnica da Aciaria da CST
- 3- Engenheiro Químico, MSc, PhD, Especialista em Fluidodinâmica Computacional da CHEMTECH
- 4- Engenheiro Químico, MSc, Gerente de Projetos Especiais da CHEMTECH
- 5- Técnico de Controle de Processo da Seção de Manutenção e Controle de Processo de Lingotamento Contínuo

INTRODUÇÃO

Um dos principais desafios no lingotamento contínuo é maximizar o seqüencial de corridas no distribuidor. Os benefícios são evidentes em qualidade, aumento de rendimento e em redução de custo, decorrente da redução do consumo de refratário. A obstrução no início do lingotamento, apesar de pouco freqüente, afeta sobremaneira o seqüencial do distribuidor, a estabilidade operacional do lingotamento contínuo e o seu sincronismo com as operações de refino.

Com base nas evidências de aço solidificado nas obstruções (figura 1), foi desenvolvido um modelo matemático, utilizando o software PHOENICS, para simular o escoamento do aço líquido e sua solidificação na tubulação refratária que liga o distribuidor ao molde do lingotamento contínuo (figura 2), de forma a determinar os fatores críticos para a ocorrência destas obstruções.



Figura 1 – Vista de baixo da válvula inferior do distribuidor com obstrução de aço

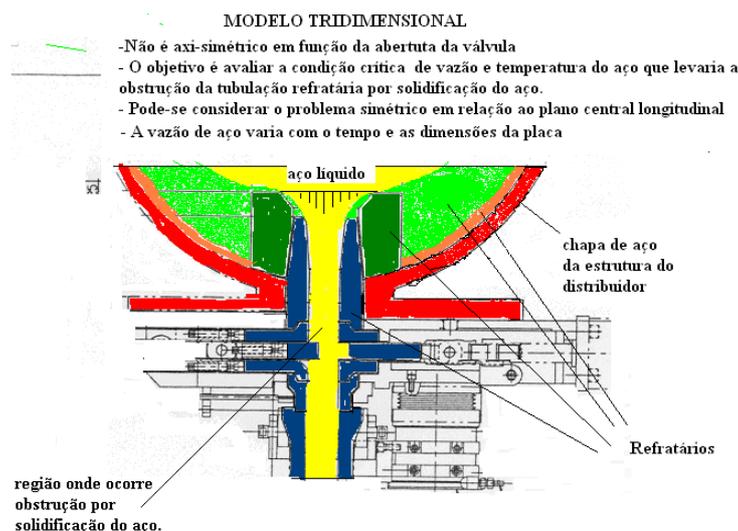


Figura 2 – Desenho esquemático da tubulação refratária do distribuidor

MODELO MATEMÁTICO

O modelo adotado para descrever a solidificação do aço foi desenvolvido por Voller e Prakash ⁽¹⁾. Ele é baseado na solução do balanço de energia descrito pela entalpia do sistema, sendo este composto pelas parcelas de calores latente (ΔH) e sensível (h), ou seja:

$$H = h + \Delta H \quad \dots (1),$$

sendo h descrito como uma função da temperatura (T),

$$h(T) = c \cdot (T - T_m) \quad \dots (2),$$

onde c é a capacidade calorífica e T_m é uma temperatura de referencia.

A parcela latente da entalpia é modelada de modo que assuma o valor zero no estado sólido e líquido. A transição de fase ("mush") é descrita por um valor intermediário, ou seja:

$$\Delta H = L \quad T \geq T_1 \quad \dots (3)$$

$$\Delta H = L(1-F_s), \quad T_1 > T \geq T_s \quad \dots (4)$$

$$\Delta H = 0 \quad T \leq T_s \quad \dots (5),$$

onde F_s é a fração sólida local, T_1 é a temperatura de início de solidificação e T_s é a temperatura correspondente à solidificação total.

Para representar a frenagem do escoamento, decorrente da mudança para o estado sólido, as células de discretização computacional foram modeladas como um meio de porosidade λ , que assume o valor 1 quando a fase é líquida, o valor 0 quando a fase é sólida e valores intermediários na região de transição. Assim, tem-se:

$$\lambda = 1 - F_s \quad \dots (6)$$

$$u = u_1 \quad , \text{ para a fase líquida } \dots (7)$$

$$u = u_1(1-F_s) \quad , \text{ para a zona mushy } \dots (8)$$

$$u = 0 \quad , \text{ para a fase sólida } \dots (9),$$

sendo u uma velocidade e u_1 a velocidade do líquido.

Completam o modelo utilizado, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e de energia. O sistema de equações termo fluidodinâmicas foi resolvido com o auxílio do software de CFD multipropósito PHOENICS ⁽²⁾. Uma variação do modelo $k-\epsilon$ (KECHEN), disponível no software, foi escolhida para descrever o escoamento turbulento. Para descrever a radiação térmica envolvida no processo, usou-se o modelo IMMERSOL, especialmente desenvolvido para o PHOENICS e cujos detalhes podem ser facilmente encontradas na documentação do código.

VALIDAÇÃO DO MODELO

(1) Modelo de solidificação

Numa primeira etapa foi avaliada a consistência do modelo utilizado para descrever a solidificação do aço. Isto foi feito comparando-se os resultados obtidos pelo modelo implementado com os resultados originais de Voller e Prakash ⁽¹⁾. A

simulação foi bi-dimensional. Um fluido com temperatura inicial superior a de sua solidificação muda de fase quando entra em contato com uma parede refrigerada. Os resultados apresentados foram obtidos utilizando-se uma malha de 40x40 elementos de volume e um passo de tempo de 10 segundos.

Como pode ser observado na figura 3, o presente modelo apresenta uma boa consistência com os resultados de Voller e Prakash ⁽¹⁾. Neste caso, estes autores estimaram que 35% do fluido dentro da cavidade estava solidificado, enquanto o presente modelo calculou que 34,8% mudou de fase, ou seja, uma ótima concordância.

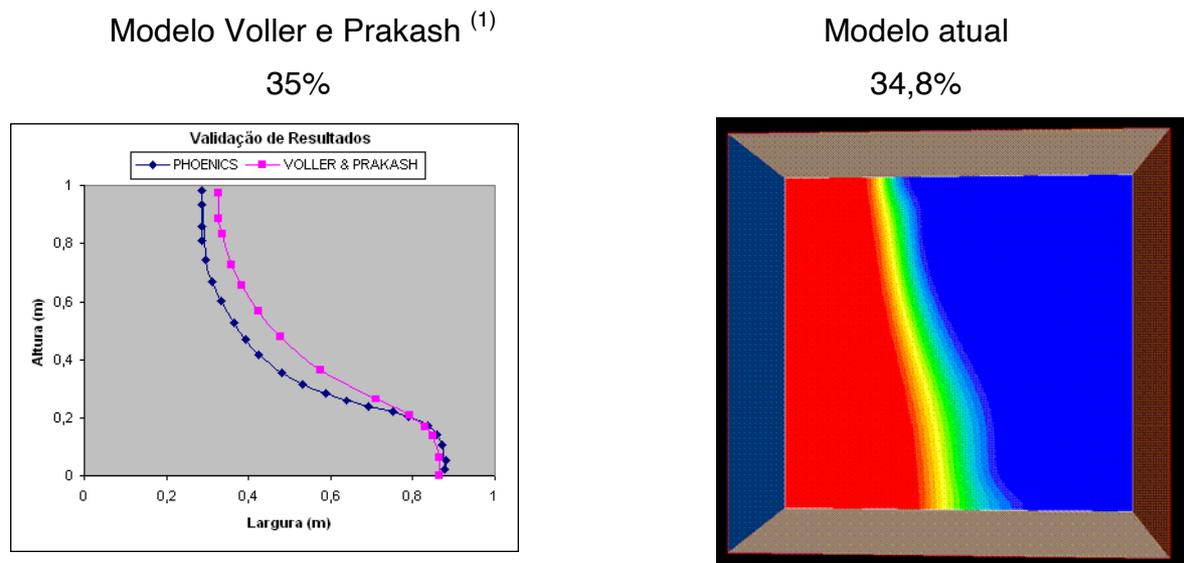


Figura 3: Fração solidificada após 250 segundos

(2) Modelo termo fluidodinâmico (completo)

A segunda etapa de validação consistiu em verificar a confiabilidade do modelo completo. Para isto foram propostas corridas experimentais, nas quais as temperaturas da superfície da válvula submersa foram medidas com auxílio de um pirômetro óptico. Estes valores foram então comparados com aqueles obtidos numericamente, através de um modelo bidimensional, conforme ilustrado na figura 4⁽³⁾.

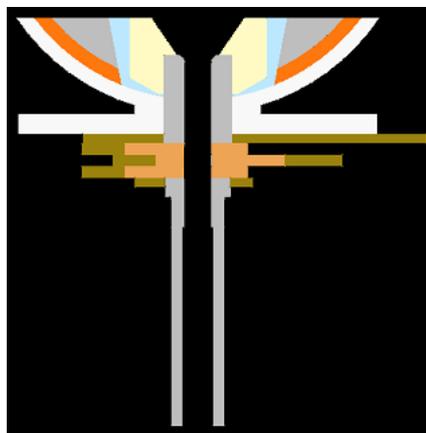


Figura 4: Modelo computacional bi-dimensional.

As condições iniciais de processo para as simulações foram definidas a partir dos padrões operacionais de partida de um novo distribuidor (figura 5). As temperaturas iniciais foram determinadas através de medições com termopares e pirômetro ótico⁽³⁾.

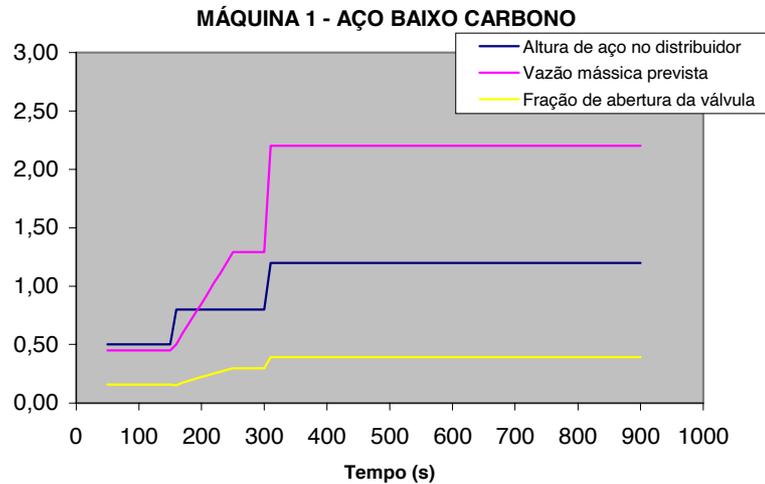


Figura 5 : Condições iniciais de processo utilizadas nas simulações

Na figura 6 é apresentada uma análise comparativa para a vazão mássica. Como pode ser observado, o resultado da solução das equações diferenciais do presente modelo reproduz com boa confiabilidade a vazão mássica experimental.

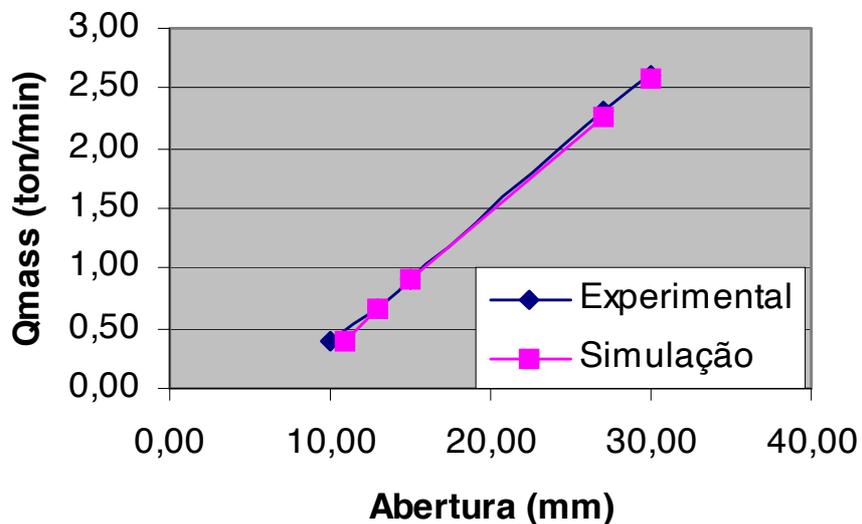


Figura 6: Vazões mássicas ao longo do processo: experimental e calculada

A figura 7 mostra a boa concordância entre a temperatura estimada pelo presente modelo e os resultados experimentais, indicando que o mesmo está adequado a simular as diversas condições em que a obstrução é desenvolvida, com boa sensibilidade de resposta.

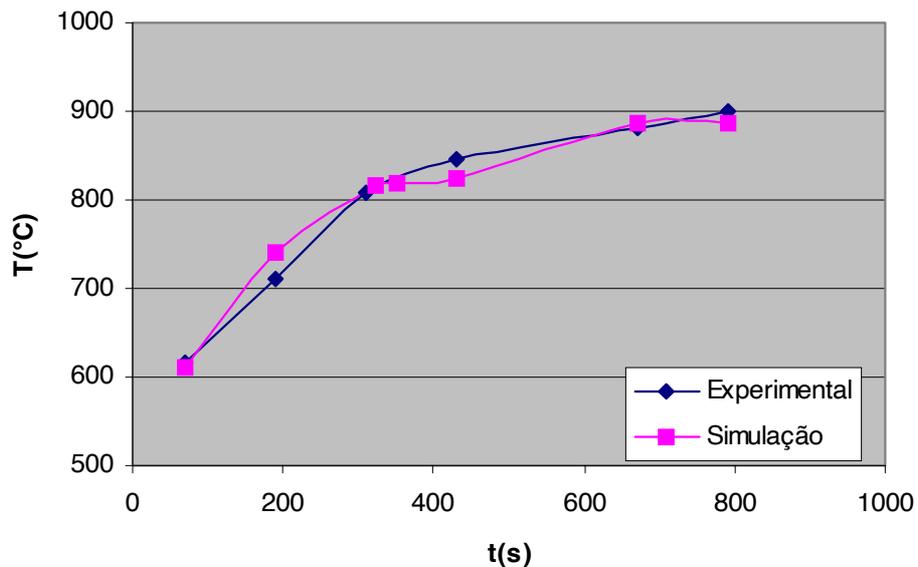


Figura 7: Temperaturas na válvula submersa: medidas e calculadas

(3) Geometria bi-dimensional x tri-dimensional

A última etapa de validação consistiu na verificação das possíveis diferenças envolvidas na utilização de uma geometria bidimensional ou tridimensional. Esta etapa foi considerada fundamental devido à diferença de tempo computacional associado aos dois casos: enquanto o modelo 2D produz resultados, em média, após 30 minutos, o modelo 3D demora, em média, 30 horas.

As semelhanças dos resultados apresentados nas figuras 8 e 9, assim como a boa correlação do modelo 2D com as medições experimentais, validam esta última abordagem à utilização nas demais análises.

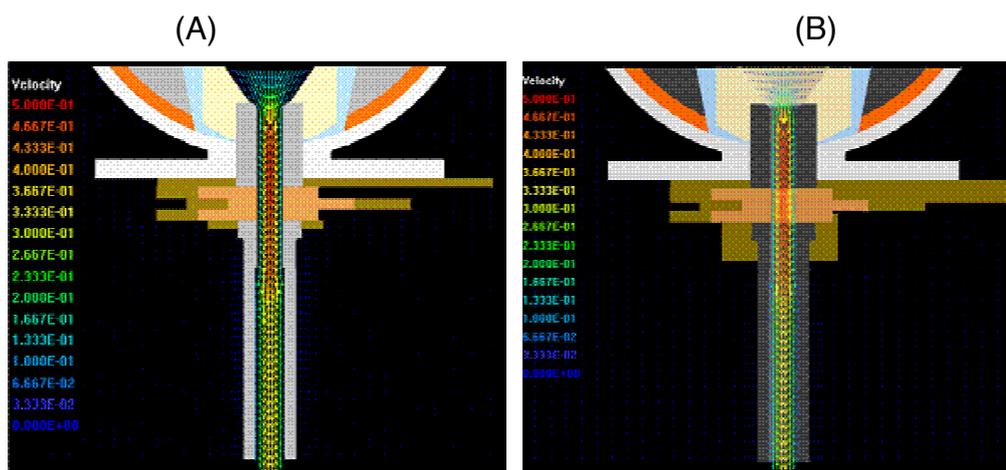


Figura 8: Perfil de velocidade do fluxo de aço líquido: (A) bi-dimensional; (B) tri-dimensional.

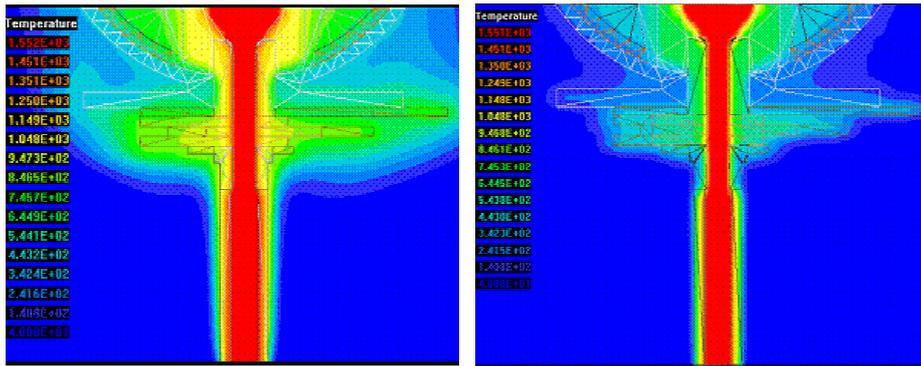


Figura 9 : Perfil de temperatura : (A) Bi-dimensional ; (B) Tri-dimensional

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Utilizando-se o modelo bi-dimensional foram realizadas simulações para avaliar a formação do cascão em dois tipos de aço (ultra-baixo e médio carbono) nos veios da máquina #2 (single e twin) e da máquina #1. Todos os resultados apresentaram comportamentos semelhantes àqueles ilustrados nas figuras 10 e 11.

Pelos resultados da simulação, a formação do cascão é iniciada na região da válvula gaveta nos primeiros instantes de lingotamento (figura 10). Neste momento a vazão de aço é muito baixa, provocando uma maior perda térmica induzida pela menor renovação de aço líquido (figura 11). Posteriormente, com o aumento da vazão de aço, ocorre a re-fusão do cascão (figura 10). Este processo é mais evidente para os aços ultra-baixo carbono.

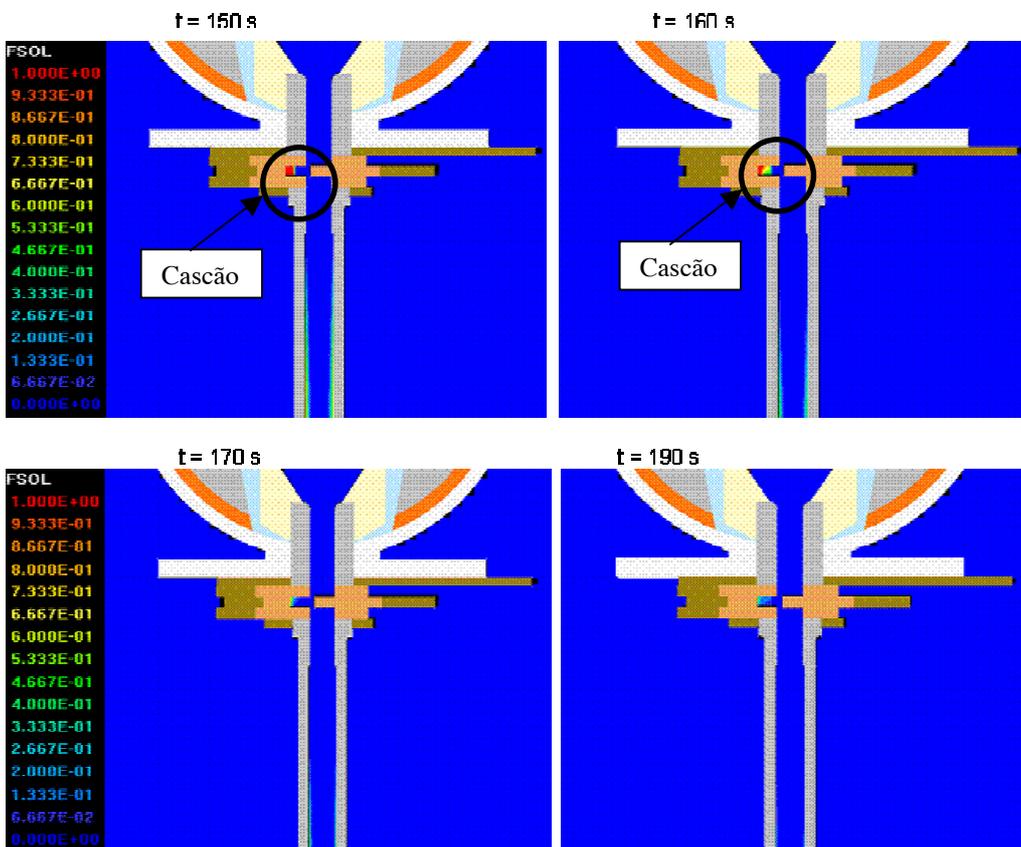


Figura 10 : Evolução da fração de sólido com o tempo

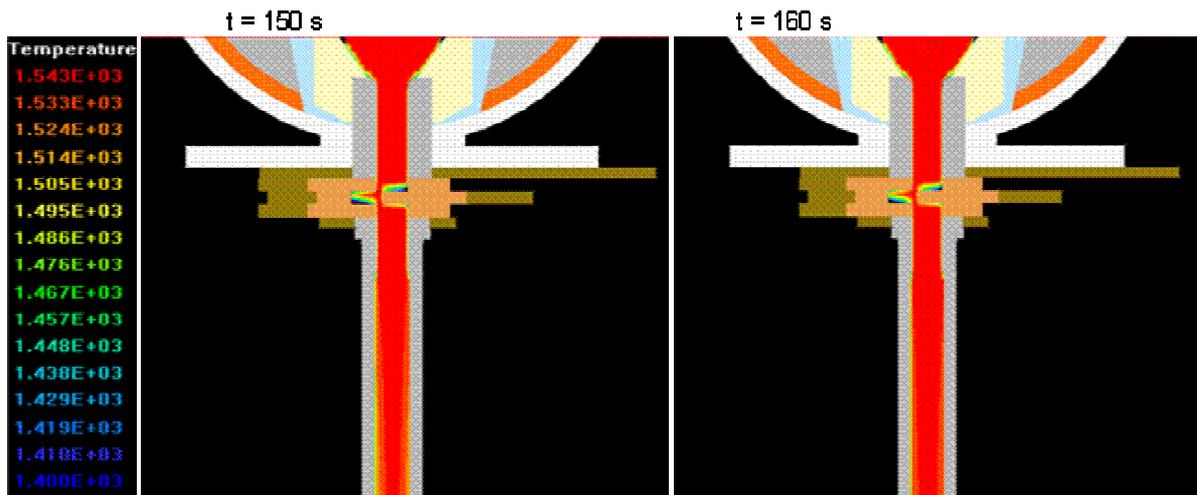


Figura 11 : Evolução da temperatura com o tempo

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Para avaliar a importância dos principais fatores sobre a ocorrência da obstrução por temperatura, foram realizadas novas simulações, cujos resultados da fração solidificada, transcorridos 200s, podem ser observados na figura 12. De fato, o aço ultra-baixo carbono (fam 10) apresenta uma maior propensão à formação do cascão, devido a sua menor diferença entre as temperaturas “liquidus” e “solidus”. Neste caso, a fração de sólido aumenta acentuadamente quando o superaquecimento do aço no distribuidor cai abaixo de 10°C. Por outro lado, um aumento da temperatura do refratário acima de 800°C ajuda a minimizar o processo de formação do cascão, uma vez que a perda térmica é diminuída.

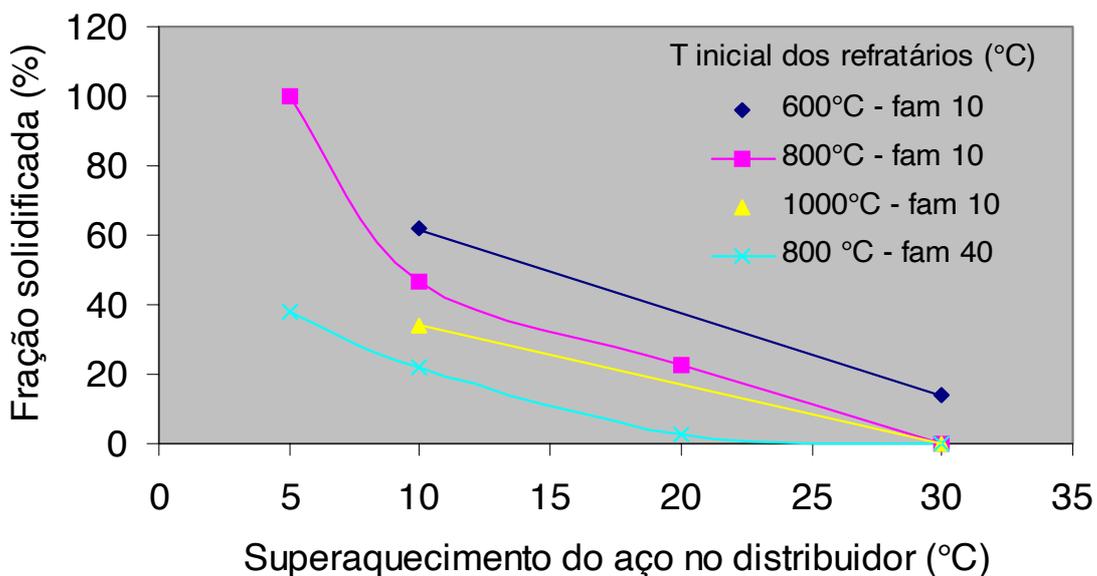


Figura 12 : Resumo das simulações para as diversas condições de processo

CONCLUSÕES

O modelo matemático para acompanhar a solidificação do aço, desenvolvido no software PHOENICS, está consistente com os resultados de Voller e Prakash ⁽¹⁾.

O modelo completo, para simulações do escoamento e solidificação do aço na tubulação refratária que liga o distribuidor, foi validado pelos dados de vazão mássica e de temperatura do refratário da válvula submersa.

Os resultados da comparação dos modelos bi e tridimensionais não apresentaram diferenças significativas.

O cascão de aço é formado nos primeiros momentos de lingotamento, decorrentes principalmente da baixa vazão de aço, e é refundido posteriormente, quando esta vazão é aumentada.

A formação do cascão é maior nos aços com menor teor de carbono, devido a menor diferença entre as temperaturas “liquidus” e “solidus”.

Uma análise de sensibilidade mostrou a influência determinante do superaquecimento do aço no distribuidor e, em menor grau, da temperatura inicial dos refratários.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- 1- Voller, V.R., Prakash, C. , A fixed Grid Numerical Modeling Methodology for Convection-Diffusion Mush Region Phase-Change Problems, Int. J. Heat Mass Transfer, 30, 8, 1709-1719 (1987)
- 2- POLIS – PHOENICS On-Line Information System, v.3.5
- 3- Modelagem e Otimização da distribuição de aço para o processo de lingotamento contínuo, Interno Chemtech TEC-CSTCFD-001, maio/2003
- 4- Processo de solidificação do aço: Estudo de sensibilidade a fatores operacionais, relatório Chemtech TEC-CSTCFD-002, agosto/2003

NUMERICAL SIMULATION OF STEEL SOLIDIFICATION INSIDE TUNDISH NOZZLES AT THE START CASTING

HENRIQUE SILVA FURTADO ⁽¹⁾
SANDRO DE SOUZA SANTOS ⁽²⁾
CARLOS EDUARDO FONTES ⁽³⁾
FLÁVIO QUEIROZ GUIMARÃES ⁽⁴⁾
RAINER FERREIRA DE OLIVEIRA ⁽⁵⁾

The work presents a numerical simulation of steel solidification inside the tundish nozzles at the start casting, using PHONICS software, used to determine the main factors and their critical levels for the occurrence of nozzles obstruction.

The validation process was performed by comparison with information from literature⁽¹⁾ and temperature measurements of submerged nozzle refractory.

Analysis was performed on machines N° 1 and N° 2 (single and twin) for an ultra low carbon and a medium carbon. The results showed the major influence of steel super heat, and refractory initial temperature. Those factors being more critical for casting ultra low carbon steel in a smaller inner diameter nozzle.

Key words: continuous casting, steel solidification, numerical simulation, obstruction

XXXV Steelmaking Seminar & Casting Seminar – 2004 – International, may 17TH to 19TH, 2004, Salvador, BA, Brazil

- 1- Metallurgical Engineer , MSc, Senior Expert of Steelmaking Technical Division of CST**
- 2- Metallurgical Engineer, Expert of Steelmaking Technical Division of CST**
- 3- Chemical Engineer, Phd, MSc, Expert on CFD Modeling of CHEMTECH**
- 4- Chemical Engineer, Msc, Head of Special Projects Division of CHEMTECH**
- 5- Continuous Casting Process Control Technician of CST**