

# **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM 3-D DURANTE A SOLIDIFICAÇÃO DO AÇO AISI 420 EM MOLDES DE AREIA E MULITA**

## **NUMERICAL SIMULATION IN 3-D OF HEAT TRANSFER DURING THE SOLIDIFICATION OF AISI 420 STEEL IN SAND AND MULLITE MOLDS**

**Moisés Meza Pariona<sup>1</sup>, Eliane Bihuna<sup>2</sup>, Erika Priscila Davanzo<sup>3</sup>**

- <sup>1</sup> Autor para contato: Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG, Campus em Uvaranas, Departamento de Matemática e Estatística e Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Ponta Grossa, PR, Brasil; (42) 220-3056, e-mail: mmpariona@uepg.br
- <sup>2</sup> Departamento de Matemática da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- <sup>3</sup> Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG, Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais, Ponta Grossa, Brasil.

*Recebido para publicação em 29/07/2003*

*Aceito para publicação em 24/11/2003*

### **RESUMO**

Neste trabalho foi realizada as simulações numéricas da solidificação do aço em moldes de areia sintética a verde industrial, AI 50/60 AFS, e mulita através da técnica de elementos finitos e o programa de software ANSYS em três dimensões. Para esta finalidade foram consideradas as propriedades termofísicas do aço, bem como da areia e da mulita. Também foi considerado o fenômeno de convecção na superfície externa do molde. As características metalúrgicas como zona de ataque de canal de alimentação e massalotes não foram consideradas neste estudo por se tratarem de irrelevantes ao comportamento da transferência de calor metal/molde. Devido às propriedades termofísicas dependentes da temperatura do aço, este tipo de problema é de característica não linear. Como resultado deste estudo foi mostrada a transferência de calor em todo o sistema em três dimensões, bem como, as curvas de convergência que controla a viabilidade do processo do cálculo do algoritmo Newton-Raphson, e as curvas de resfriamento em vários pontos da peça solidificada e as curvas de aquecimento e resfriamento no molde.

Palavras-chave: simulação numérica, elementos finitos, solidificação do aço, moldes de areia e mulita

## ABSTRACT

In the study reported on herein, three-dimensional numerical simulations were made of steel solidification in industrial AI 50/60 AFS greensand and mullite molds, using the finite element technique and the ANSYS software program. For this purpose, the steel's thermo-physical properties were considered temperature-dependent, while for sand and mullite these properties were considered constant. The convection phenomenon was also considered on the mold's external surface. Metallurgical characteristics, such as the attack zone in the feed head and hot top, were not taken into account in this study since they are irrelevant to the behavior of metal to mold heat transfer. Owing to the steel's temperature-dependent thermo-physical properties, this type of problem is of nonlinear characteristic. The results of the heat transfer are showed throughout the 3D system, the convergence curves that control the feasibility of the Newton-Raphson algorithm calculation process, the cooling curves at various points of the solidified specimen, and the heating and cooling curves in the mold.

Key words: numerical simulation, finite elements, solidification of steel, sand and mullite molds

## Introdução

As dificuldades tecnológicas nos processos de fundição variam bastante, de acordo com a característica de temperatura de fusão do metal. Estas características estão relacionadas por sua vez, às propriedades físico-químicas e a estrutura dos metais e ligas. A dificuldade de fundir metais, também, está relacionada a uma série de propriedades, dentre elas podem ser mencionadas as diferenças em atividades químicas entre os elementos que constitui o metal, solubilidade dos gases, modo de solidificação entre os elementos químicos, tipo de moldagem e coeficientes de contração na solidificação. Por outra parte, o processo de resfriamento afeta o fluxo do metal líquido, influenciando no enchimento e na estabilidade do molde complexo, possibilitando a ocorrência de tensões de resfriamento na estrutura e nas propriedades do produto final, gerando conseqüências nas variações dimensões geométricas devido à contração e/ou dilatação da peça fundida, como também pode influenciar na forma do acabamento superficial e na qualidade da peça.

Algumas das propriedades e características mais diretamente associadas ao processo de fundição são (Campbell, 1991):

a) Fluidez, que se refere à capacidade de preenchimento do molde, ou seja, à capacidade do metal

líquido fluir através dos canais de alimentação e passagens, preenchendo todos os interstícios do molde e permitindo a resolução de todos os detalhes desenhados. As principais variáveis, inerentes ao metal em si, por sua vez, que afetam a fluidez do metal líquido são a temperatura, a composição química, a tensão superficial, os filmes óxidos superficiais, a viscosidade do metal líquido, a pressão metalostática, a difusividade térmica do molde, os respiros, os alimentadores e a permeabilidade do molde.

b) Gases em metais líquidos, que podem estar presentes nos fundidos, em soluções ou em cavidades (bolhas), ou ainda pela formação de compostos químicos. Em geral, estão associados a defeitos que resultam em prejuízos na produção. Pode-se destacar alguns resultados inerentes à presença de gases quando envolvem a oxidação do metal líquido, as diferenças de solubilidade do gás no sólido e no líquido, a formação de compostos não óxidos, a formação de filme de óxido sólido. Os recursos existentes para evitar os defeitos inerentes da presença de gases no metal líquido estão ligados ao controle de matérias-primas, ao controle do ambiente, aos tratamentos e adições que visam prevenir a presença dos gases.

c) Solidificação dos metais (Campbell, 1991, Pariona *et al.*, 2000, Flemings, 1974, Su X, 2001), que se dá por nucleação e crescimento da fase sólida,

quando existem condições térmicas favoráveis. A nucleação homogênea envolve a formação e a sobrevivência de núcleos sólidos com raio maior ou igual ao raio crítico e é função dos componentes de energia livre, de volume e de superfície, associadas à solidificação do material. Ocorre abaixo da temperatura de fusão no equilíbrio, caracterizando a ocorrência do super-resfriamento térmico. Por outro lado, a nucleação heterogênea, que está associada à existência de substratos diferentes do elemento metálico em questão, requer um super-resfriamento térmico significativamente menor que o da nucleação homogênea (Pariona *et al.*, 2000). Em termos práticos, a fundição apresentando nucleação heterogênea, ocorre na maioria dos casos, quer seja nas paredes do molde, quer seja pela presença de elementos diversificados no banho. Após a nucleação, ocorre o crescimento da fase sólida, cujo desenvolvimento depende das condições térmicas presentes na solidificação e da composição da liga. Quando se diminui uniformemente a temperatura, em todo o líquido, haverá nucleação aleatória extensiva em todo o líquido. Entretanto, as condições práticas de fluxo de calor promovem a formação de gradientes de temperatura no líquido, que induzem à nucleação inicial nas paredes do molde, com o crescimento de grãos para o centro da peça. Os grãos nucleados com orientação mais favorável crescem preferencialmente e avançam para o interior da peça, por deposição progressiva de átomos na interfase sólido-líquido. O crescimento lateral é restringido pelo crescimento competitivo, formando-se assim grãos colunares, alongados na direção do fluxo térmico.

#### Materiais de moldes e de machos

Os moldes empregados em fundição podem ser do tipo colapsável, quando se fragmentam a cada peça produzida, ou do tipo permanente, empregados na fabricação de grandes quantidades de peças por molde.

Os moldes colapsáveis mais comuns e baratos são fabricados com materiais refratários, à base de areia de sílica. São os mais empregados na produção industrial de fundidos, servindo para pequenas, médias ou grandes escalas de produção.

Os moldes permanentes são em geral metálicos, fabricados em aço ou aços ligados para fundir metais ou ligas de menor ponto de fusão que a matriz, embora

outros materiais, como o grafite, possam ser empregados. O alto custo de fabricação dos moldes ou matrizes metálicas permanentes determina que sejam aplicados apenas em grandes escalas de produção industrial.

De um modo geral, o tipo de molde empregado afeta sensivelmente a qualidade da peça fundida quanto às dimensões, forma, acabamento superficial e qualidade interna, tornando imprescindível a seleção e o controle dos materiais do molde (Campbell, 1991, Su X, 2001).

Pode-se ressaltar ainda que o material do molde desempenha papel importante na solidificação da peça. Como o fenômeno de solidificação é essencialmente o resultado da transferência de calor durante o processo, as propriedades térmicas do material do molde, como a condutividade térmica e a difusividade térmica, afetam tanto a estrutura da peça solidificada quanto as suas propriedades e sua qualidade, além de influir sobre o tempo total de solidificação e custo do processo produtivo.

#### Areias de fundição

A combinação dos requisitos funcionais de moldes e de machos depende do peso da peça e dos conjuntos peça/molde, da composição química da liga, das propriedades do fundido e do nível de qualidade desejado para o produto (Campbell, 1991, Su X, 2001).

As misturas de materiais usadas na confecção de moldes e de machos são feitas a partir de areia de base + aglomerantes + plastificantes + aditivos especiais para melhorar uma ou outra característica. Muitas vezes, além de aditivos incorporados na mistura, utilizam-se tintas refratárias, aplicadas no molde com finalidade de melhorar o acabamento superficial da peça. As areias podem ser naturais ou sintéticas.

A composição química influencia particularmente as características de refratariedade, dilatação térmica, densidade e reação da areia com o metal fundido. A maior parte das areias são formadas a base de sílica ( $\text{SiO}_2$ ). São abundantes geologicamente, de baixo custo e apresentam excelentes propriedades até temperaturas próximas a  $1700^\circ\text{C}$ . Porém, possuem o inconveniente de sofrerem transformações de fase da sílica a baixas temperaturas, com conseqüente variação de volume e possível deformação da configuração do molde.

O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo comparativo do metal fundido nos moldes de areia e mulita. Como resultado, foi observada a transferência de calor no metal fundido, na interface e no molde, bem como as curvas de resfriamento em diferentes pontos no metal fundido, e as curvas de aquecimento e resfriamento nos diferentes pontos no molde. Conseqüentemente, a qualidade microestrutural e as propriedades mecânicas da peça fundida dependem da técnica de fundição usada, das características e propriedades do processo de moldagem escolhido, e do metal fundido.

#### Simulação numérica

A equação diferencial parcial de fluxo térmico para o estado transiente e não linear, sem considerar a geração de calor e o efeito da radiação é dada por (Su X, 2001, ASM, 1996, Grozdanié, 2002)

$$K \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \rho c \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

Sujeita à condição de contorno convectivo:

$$K \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = K \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = K \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = h_f (T - T_B) \quad (2)$$

Onde  $q$  é o calor,  $K$  é a condutividade térmica para o material termicamente isotrópico,  $c$  é o calor específico e  $\rho$  é a densidade do material, estas propriedades podem ser dependentes da temperatura e se for este caso, a equação (1) se transforma em equação não linear. O  $h_f$  é o coeficiente de transferência de calor convectivo na superfície externa do molde,  $T$  é a temperatura e  $T_B$  é a temperatura do meio ambiente.

Através das equações (1) e (2) pode ser determinada a distribuição da temperatura ou transferência de calor durante o processo de solidificação na fundição do aço no molde de areia ou mulita.

#### Critério de convergência

A solução da equação do transporte térmico não linear requer um especial cuidado na etapa de carregamento das condições iniciais e de contorno, e como também, o cuidado do controle para o processo de

execução através do ANSYS. Para cumprir estes requisitos, se requer dividir a carga a ser aplicada em pequenos incrementos. Significa aplicar um carregamento incremental, isto poderá gerar um número determinado de interações para atingir a solução desejada sob o controle de critério de convergência do software. A seguir, será feito um esclarecimento de maneira breve sobre o conceito do controle do critério de convergência.

Definindo,  $\{Q^a\}$ , vetor de fluxo de calor nodal interno gerado pelos cálculos computacionais  $\{Q^{nr}\}$ , vetor de fluxo de calor nodal aplicado, o balanço do vetor fluxo de calor ou “residual”  $\{\Phi\}$  é a diferença entre os dois vetores (Heat Transfer 5.7, 2001),

$$\{\Phi\} = \{Q^a\} - \{Q^{nr}\} \quad (3)$$

Também, definindo a norma (i.e., magnitude) do residual, denotado por  $\|\Phi\|$ . O critério de convergência adotado usualmente é igual à norma do vetor de carga calculado,  $\|Q^a\|$ , multiplicado pelo fator de tolerância, e.

A equação de análise térmica para o sistema não linear pode ser escrita em forma matricial,

$$[C(T)]\{T\} + [K(T)]\{T\} = \{Q(T, t)\} \quad (4)$$

Onde,  $[C(T)]$ , matriz de calor específico,  $[K(T)]$ , matriz de condutividade e  $\{Q(T, t)\}$ , termo de fluxo térmico.

Para a análise de um campo térmico simples não linear, ANSYS freqüentemente usa o algoritmo iterativo de Newton-Raphson. Esta técnica segue os seguintes processos (Heat Transfer 5.7, 2001):

1. O sistema de equações é resolvido através do processo iterativo, tal como:

$$[C(T_{i+1})]\{T_{i+1}\} + [K(T_{i+1})]\{T_{i+1}\} = \{Q^a\} - \{Q_{i+1}^{nr}\} \\ (i = 1, 2, \dots), \text{ onde } \{T_{i+1}\} = \{T_i\} + \{\Delta T_i\}$$

2. As temperaturas dos nós são atualizadas,

3. O fluxo de calor nos nós internos são calculadas segundo a teoria elementar de fluxo de calor,

4. A norma de convergência é calculada e comparada com o critério de convergência. Assim, se a norma é menor ou igual que  $\|\{\Phi\}\| \leq \varepsilon \|Q^a\|$  finaliza-se o processo de interação. Se a norma é maior que  $\|\{\Phi\}\| > \|Q^a\|$ , os dados são atualizados e o proces-

so se repete até atingir o critério da convergência. O valor “default” para e freqüentemente é 0,001. Por seguinte, a análise não linear normalmente requer um carregamento incremental para atingir a convergência da solução, pois também, cada incremento precisa de sub-incrementos intermediários para atingir a convergência da solução dentro de cada etapa de carregamento.

Na análise da solução através do Ansys, deve-se verificar que a norma do residual ( $\|\Phi\|$ ), também chamada como “Graphical Solution Tracking (GST)”, denotada por “Heat L2”, e o critério ( $\epsilon\|Q^a\|$ ), denotado por “Heatcrit”, são mostradas em função do número de interações. A convergência da solução é atingida quando “Heat L2” é menor ou igual ao critério de convergência ( $\epsilon\|Q^a\|$ ).

Neste trabalho foi estudado a solidificação do aço AISI 420 em moldes de areia sintética à verde industrial, AI 50/60 AFS e mulita (este material é freqüentemente usado no processo “SHAW”). As propriedades termofísicas do aço foram consideradas em função da temperatura, tais como, condutividade térmica, calor específico e densidade. As propriedades da areia e da mulita foram consideradas constantes. Também, foi considerada a presença do fenômeno de convecção na superfície externa do molde. Este tipo de problema é de característica não linear e transiente, e foi resolvido através da técnica de elementos finitos em 3-D, para a viabilidade da solução, foi feito o controle da convergência.

### Metodologia da simulação numérica

Para simular a solidificação do aço em moldes de areia e de mulita foram usados o método de elementos finitos (Su X, 2001, Heat Transfer 5.7, 2001, Handbook Ansys 7.0, 1976), o software Ansys 7.1 e um computador Pentium III 1GHz. Para a execução da simulação foram adotados os seguintes procedimentos:

a) O desenho geométrico da peça para esta finalidade foi uma cantoneira de aço AISI 420, sendo este material de característica homogênea e isotrópica, como é apresentado na Figura 1.

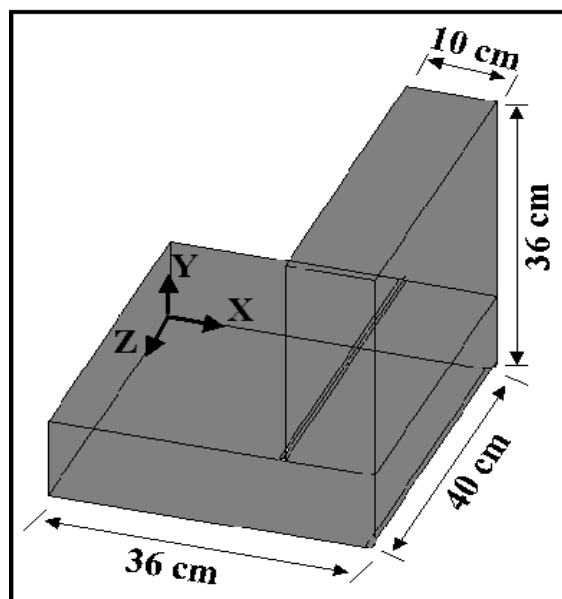


Figura 1 - Cantoneira de aço.

b) Criou-se a geometria da peça junto com o molde de areia sintética à verde ou mulita. Esta geometria pode ser observada na Figura 2, onde na parte superior é mostrada a entrada do metal líquido. Nesta simulação não foram considerados o posicionamento usual do canal de alimentação da peça, o massalote e o modelo convencional de caixa de moldagem usado.

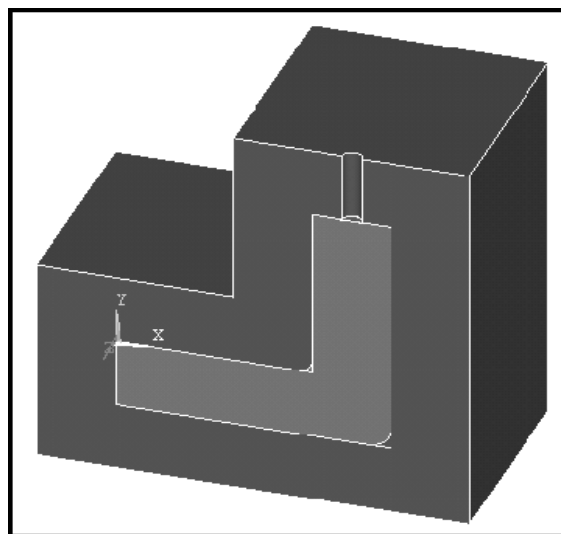


Figura 2 - Cantoneira de aço junto com o molde de areia ou mulita

c) Criou-se a simetria da peça, com a finalidade de reduzir o número de quantidade de malhas, isto é, para facilitar o processamento de cálculo do sistema

de equações não lineares e sem sobrecarregar a capacidade do computador. Esta simetria com as dimensões da peça é mostrada na Figura 3 em 3-D.

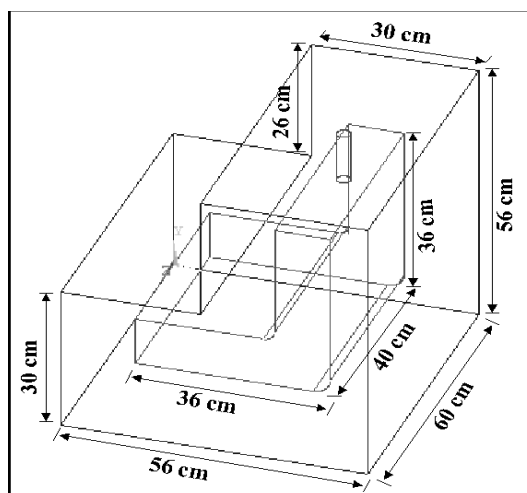


Figura 3 - Simetria da peça

d) Em seguida foram selecionados os tipos de materiais, tais como, aço e areia ou mulita, bem como

as suas propriedades, que são apresentados na Tabela 1.

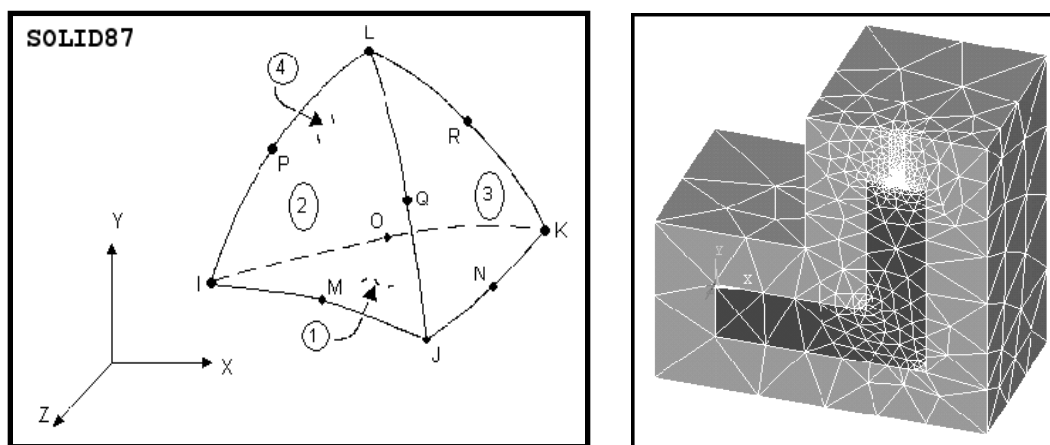
**Tabela 1** - Propriedades físicas do aço, da areia industrial AI 50/60 AFS e da mulita (Kingery *et al.*, 1976, Hertzberg, 1996, Ozisik, 1985)

<b>Propriedades do Aço – AISI 420</b>		
Temperatura (K)	Condutividade Térmica ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	Calor Específico ( $kJ.kg^{-1}$ )
293	22,0	0,477
373	22,4	0,485
473	22,9	0,498
573	23,5	0,536
673	24,2	0,611
773	24,6	0,678
873	25,3	0,749
973	26,3	0,820
1073	26,6	0,895
1149	26,9	0,950
1173	27,0	0,569
1273	28,1	0,569
1373	28,8	0,569
1473	29,0	0,569
1573	29,7	0,569
Densidade ( $kg.m^{-3}$ )	7700 em 288 K	7000 em 1823 K
Temperatura de fusão 1727-1793 K		

<b>Propriedades da areia industrial - AI 50/60 AFS - seca a granel</b>	
Calor específico	1172,3 J/(kg.K)
Condutividade térmica	0,52 W/(m.K)
Densidade	1494,71 kg/m <sup>3</sup>
<b>Propriedades da mulita</b>	
Calor específico	1172,3 J/(kg.K)
Condutividade térmica	5,86 W/(m.K)
Densidade	3100 kg/m <sup>3</sup>
<b>Propriedade de Convecção</b>	
$h_f$ , Coeficiente de transferência de calor convectivo médio na superfície externa do molde <sup>11</sup>	11,45 W/m <sup>2</sup> .K
$T_B$ , Temperatura do meio ambiente	300 K
<b>Temperatura inicial do metal líquido (superaquecimento em 80 K)</b>	
	1873 K

e) Para gerar o sistema de equações a fim de conhecer o resultado em cada ponto da peça em todo o volume, foi gerada uma malha em todo o volume da peça, sendo que a unidade geométrica de cada elemento de malha deve ser adequada segundo a geometria da peça. Para isto, o software ANSYS, permite

controlar o tamanho e a geometria da malha, com finalidade de que a solução seja mais precisa. Porém, um número muito grande de malhas pode comprometer a capacidade do computador. Na Figura 4 é apresentada a malha na simetria da peça (Handbook Ansysy 7.0, 1976).



**Figura 4** - Tipo de malha (sólido térmico tetraédrico com 10 nós) utilizado para a simulação de transferência de calor.

f) Em seguida, foram aplicadas as condições iniciais e de contorno na simetria da peça. As condições iniciais consideradas foram a temperatura do meio ambiente (300 K) que foi aplicada nas paredes externas do molde de areia ou mulita, e a temperatura inicial

do metal líquido, que foi considerada 1873 K, pois, a temperatura de fusão de este tipo de aço é 1727-1793 K. Isto significa que o metal líquido, que foi superaquecido em 1873 K. A condição de contorno também foi aplicada nas paredes externas do molde de areia

ou mulita e para isto, foi considerada a perda de calor devido ao fenômeno de convecção gerada pelo meio ambiente natural arejada, dada pela equação (2). Nesta equação figura o coeficiente de transferência de calor convectivo e este dado é apresentado na Tabela 1. Também, não foram considerados a aplicação de tintas refratárias e o processo de gasagem.

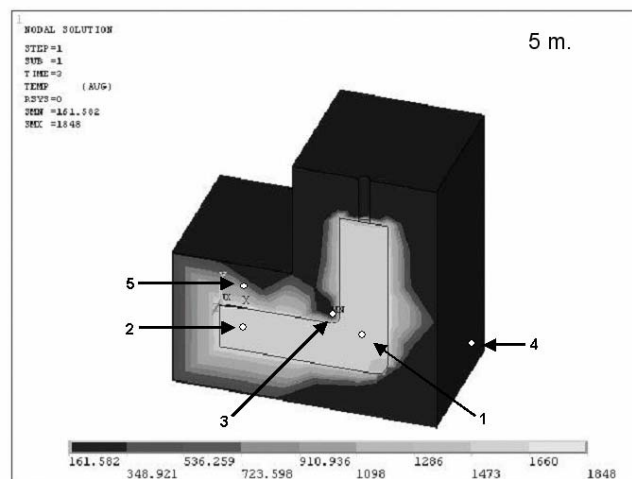
g) Na etapa final, foi resolvido o problema de transferência de calor do sistema molde - metal fundido, através da equação (1) e controlado pela condição de convergência. O resultado da transferência de calor é mostrado em 3-D e bem como, as curvas de resfriamento no metal fundido, e de aquecimento e resfriamento no molde.

## Resultados e discussões

O estudo da simulação numérica da solidificação através do software ANSYS 7.0 foi realizado para uma cantoneira de aço dentro de um molde de areia sintética à verde industrial, AI 50/60 AFS – seca a granel, cujo resultado é apresentado na Figura 5. Nesta figura observa-se o resultado para os primeiros 5 minutos e também para duas horas de solidificação, sendo que os passos de cada subintervalo de tempo foram de 3 e 100 segundos respectivamente. Neste trabalho, não foi possível manter um passo pequeno de subintervalo de tempo para grandes tempos de solidificação, devido à falta de capacidade do software e do computador. Pois, a temperatura de fusão do aço AISI 420 é 1727-1793 K e neste trabalho o aço líquido foi superaquecido em 80 K acima da temperatura de “líquidus”, com propósito de observar a transferência de calor acima desta temperatura.

Pode-se observar na Figura 5, que nos primeiros 5 minutos ocorre uma alta transferência de calor entre o metal fundido e o molde de areia. Na maior curvatura da peça o resfriamento é mais rápido que em outros lugares, sendo que em alguns pontos a temperatura do metal fundido ainda está acima da temperatura de “líquidus”. Após duas horas todo metal está solidificado, sendo que o ponto 2 da Figura 5 está ainda em alta temperatura. Também se observa para duas horas que o molde de areia sintética à verde foi aquecido, a areia em torno da interfase do metal fundido

chegou perto de 900 K, em alguns pontos a temperatura foi de 360 K e em outras zonas se manteve na temperatura do ambiente. Além de isso, neste modelo foi considerado que a perda de calor na superfície externa do molde foi devido ao fenômeno de convecção natural do meio ambiente. Entretanto, através da legenda que aparece na figura inferior pode-se comparar de maneira mais apropriada os valores de temperatura ao longo da peça.



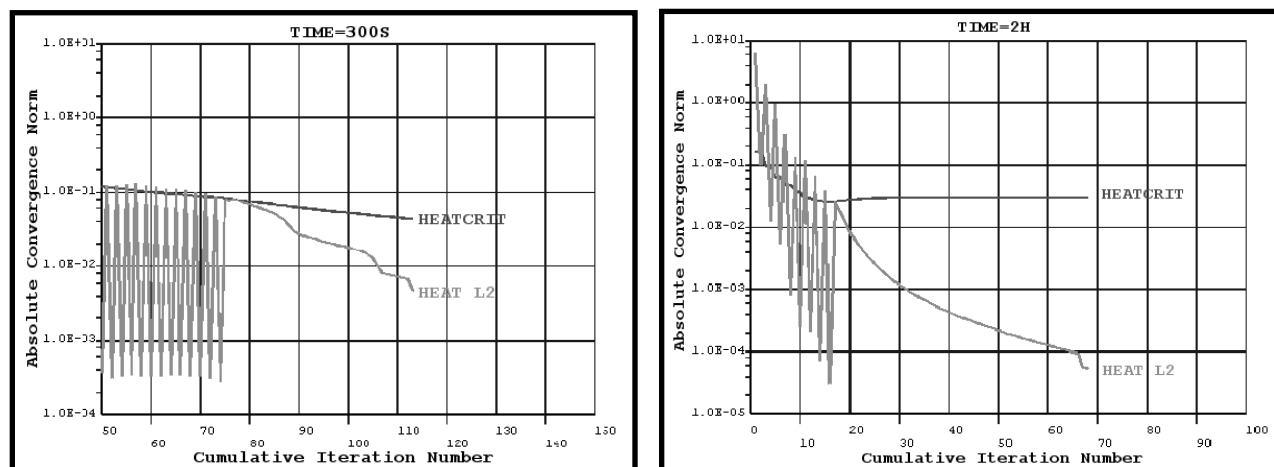
**Figura 5** - Resultado numérico da transferência de calor em torno da peça e da areia industrial AI 50/60 AFS – seca a granel.

O modelo matemático de solidificação considerado neste trabalho possui um comportamento não-linear, devido as propriedades termofísicas do aço AISI 420 serem dependentes da temperatura. Conseqüentemente, este tipo de problema depende muito do comportamento da convergência, pois, na Figura 6 é mostrado o resultado da convergência para 5 minutos e 2 horas de solidificação após do vazamento do metal fundido no molde. Nestas figuras observa-se a variação da norma da convergência absoluta,  $\|\Phi\|$ , em função de número de interações acumulativas, sendo esta norma denotada por “HEAT L2”. Também nestas figuras aparece o critério de convergência ( $\epsilon\|Q^a\|$ ) denotado por “HEATCRIT. A teoria assegura (Heat Transfer 5.7, 2001) para que exista convergência a norma da convergência absoluta deve ser menor que o critério de convergência a medida que aumenta o número de interações. Não obstante, a convergência depende do passo mínimo do subintervalo de tempo e do fator de



tolerância, e. Por exemplo, para este modelo foram selecionados apropriadamente os passos de cada subintervalo de tempo para atingir a convergência, sendo que para 5 minutos de solidificação, o subintervalo foi de 3 segundos e para 2 horas foi de 100 segundos.

Isto significa, por exemplo, que para 2 horas de solidificação, após de 100 segundos se inicia o processo de interação do cálculo do algoritmo Newton-Raphson e o tempo vai se incrementando cada 100 segundos. A tolerância, e, considerada foi de 0,001.



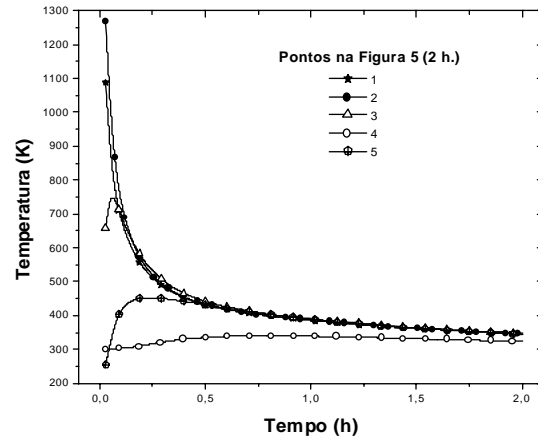
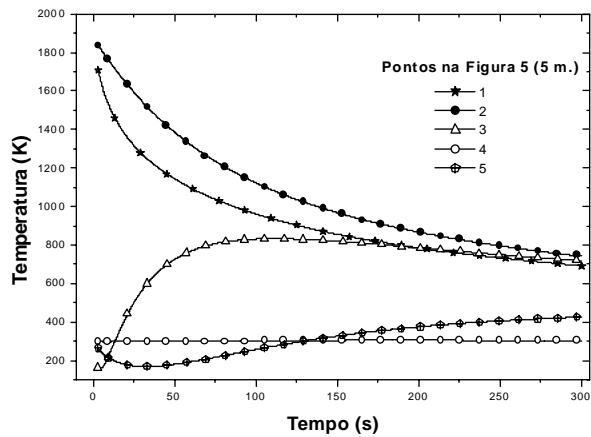
**Figura 6** - Resultado da convergência do modelo para a solidificação do aço em areia durante (a) 5 minutos e (b) 2 horas.

Também, neste trabalho foi analisado o resfriamento em alguns pontos no metal fundido e de aquecimento e resfriamento no molde de areia. Este resultado é mostrado na Figura 7, onde as curvas de resfriamento nos pontos 1 e 2 sofrem uma queda rápida de temperatura, sendo que o resfriamento do ponto 1 é mais rápido em relação ao ponto 2. Aliás, a zona que corresponde ao ponto 2 se encontra numa temperatura mais alta em relação às outras zonas do metal fundido. Isto, poderia ser devido a falta de fluidez do metal líquido, se refere à capacidade do metal líquido fluir e de preencher o molde que poderiam ser dificultados quando os canais e passagens apresentarem geometrias mais complexas, acarretando maior tempo para o preenchimento do molde. Também, poderia ser devido ao surgimento do fenômeno de junta fria (Campbell, 1991, Flemings, 1974).

Logo, à medida que aumenta o tempo as curvas de resfriamentos atingem um patamar. Estas curvas de resfriamento caracterizam a microestrutura cristalina do metal solidificado, sendo que as curvas que possuem maior velocidade de resfriamento apresentarão tamanho de grão menor, por exemplo, a zona que corres-

ponde ao ponto 2 e bem como toda a zona perto da interface do molde.

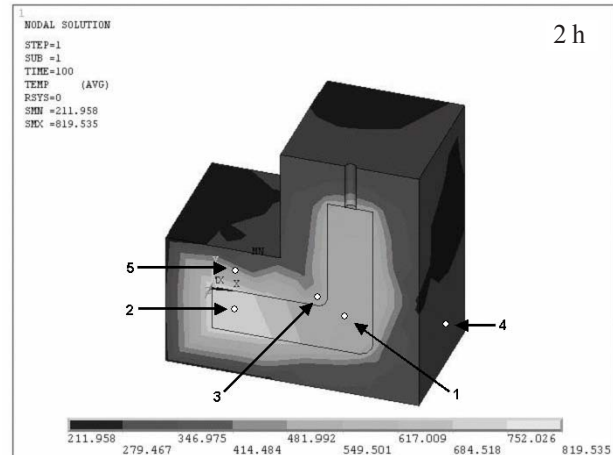
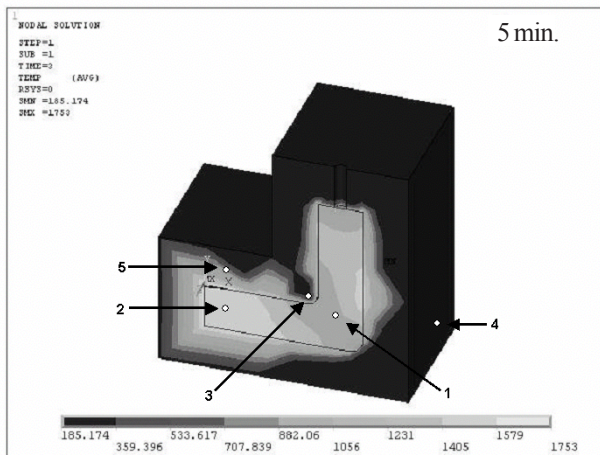
As curvas de aquecimento e resfriamento nos pontos 3, 4 e 5 que pertencem ao molde de areia sintética à verde da Figura 5, também são apresentadas na Figura 7. Pode ser observado que o aquecimento e o resfriamento é mais acentuado para o ponto 3, pois este ponto está mais perto da interface molde-metal, talvez, este tipo de comportamento poderia significar uma mudança de fase, devido à mudança de curvatura da curva de resfriamento, que ocorre aproximadamente em 450 K. O ponto 4, se encontra na parede externa do molde e apresenta um aquecimento muito lento. O ponto 5, que apresenta um aquecimento relativamente rápido e um resfriamento lento, pois este ponto está mais afastado da interface molde-metal. Porém, o comportamento deste ponto 5 no estágio inicial de solidificação para 5 minutos, apresentou temperaturas abaixo da temperatura inicial (300 K) imposta ao molde, sendo este caso um problema numérico, que não condiz com a realidade. Este tipo de incoerência, também ocorreu no mesmo ponto no molde de mulita.



**Figura 7** - Em alguns pontos da Figura 5, curvas de resfriamento no metal e de aquecimento e resfriamento no molde de areia.

A seguir, neste trabalho de simulação numérica foi considerado o molde de mulita em vez de areia sintética à verde, onde este tipo de material além de possuir maior condutividade térmica é mais denso que a areia sintética à verde industrial. Para essa simulação foram considerados os mesmos dados da Tabela 1,

tais como, as mesmas geometrias (Figuras 1 e 2), o mesmo metal, as mesmas condições iniciais e de contorno, e passos de cada subintervalo de tempo foram também os mesmos. Cujos resultados de fluxo térmico é apresentado na Figura 8, tanto para 5 minutos e 2 horas solidificação.



**Figura 8** - Resultado numérico da transferência de calor em torno da peça e mulita.

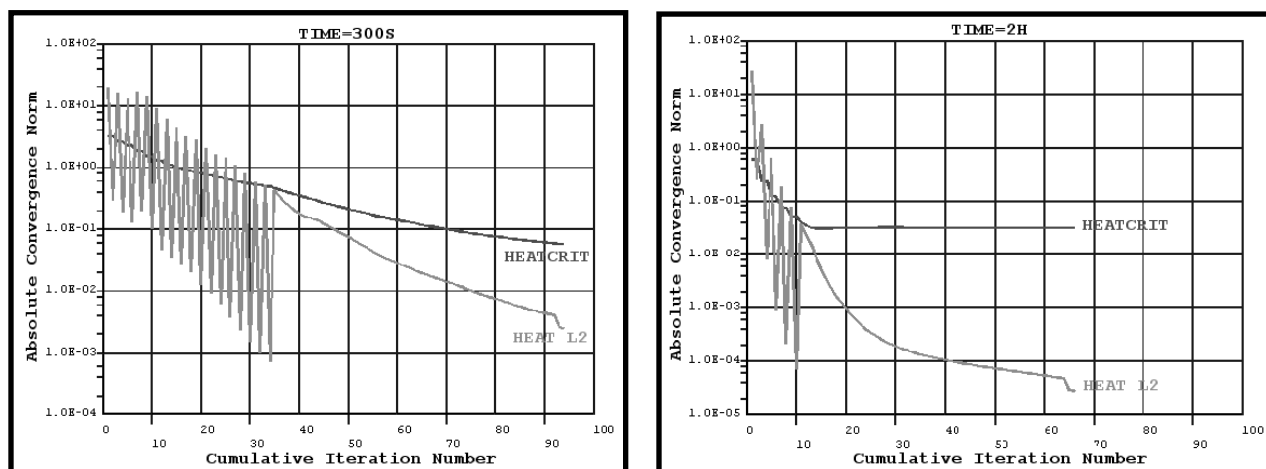
Pode-se observar na Figura 8, a variação do fluxo térmico na interfase metal e mulita e através da legenda que se apresenta na parte inferior da figura pode-se observar os valores de temperatura ao longo da temperatura. A transferência de calor é mais intensa que na areia sintética à verde industrial, AI 50/60 AFS, isto pode ser justificado, pois a condutividade

térmica da mulita é maior que a da areia comercial, além de ser mais densa. Também, cabe notar que o aquecimento e o resfriamento deste tipo de molde é mais rápido que o molde de areia, propiciando maior perda de calor na superfície devido ao fenômeno de convecção natural.

Na Figura 9 são apresentadas as curvas de convergência para o molde de mulita. Observa-se nesta curvas, que a convergência é mais rápida comparada com o molde de areia sintética à verde, sendo que neste caso, o número de interações cai pela metade em relação ao molde de areia.

A continuação, foram determinadas as curvas de resfriamento ou aquecimento nos diferentes pontos da Figura 8, durante 5 minutos e 2 horas de solidi-

ficação. As curvas de resfriamentos no metal nos pontos 1 e 2 são apresentadas na Figuras 10. Observa-se para o ponto 1 uma velocidade de resfriamento muito brusca até aproximadamente 400 K, seguida de um resfriamento mais lento. No entanto, no ponto 2 ocorreu um resfriamento menos brusco que no anterior e a característica posterior desta queda é semelhante a do ponto 1.

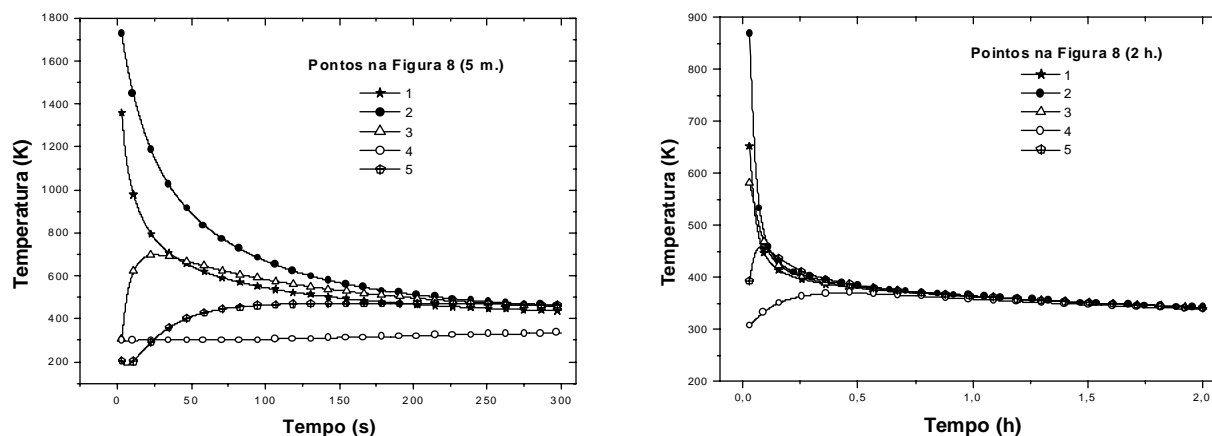


**Figura 9** - Resultado da convergência do modelo para a solidificação do aço em mulita durante (a) 5 minutos e (b) 2 horas.

As curvas de aquecimento e resfriamento nos pontos 3, 4 e 5 são apresentadas na mesma figura anterior. Observa-se perto da interfase mulita/metal, no ponto 3, que o aquecimento e o resfriamento é muito brusco. Para o ponto 4, que está na parede externa do molde, o aquecimento é muito lento. Finalmente, o ponto 5 está afastado da interface metal/molde, mas, este ponto corresponde à parte interna do molde, o aquecimento é bastante rápido e conseqüentemente o resfriamento é lento. Na Figura 10 pode-se observar, que após atingirem a temperatura de resfriamento de aproximadamente 350 K todas as curvas de resfriamento tendem a convergir, sendo este tipo de comportamento semelhante ao do molde de areia.

Comparando o resultado do molde de areia

sintética à verde industrial, AI 50/60 AFS, com a de mulita, observou-se uma transferência de calor muito mais intensa na mulita. Analisando de outra forma, considerando os mesmos pontos que correspondem as Figuras 5 e 8, verifica-se que as velocidades de aquecimento e resfriamento são muito mais rápidas na mulita, pois, isto se justifica, devido a que a mulita possui maior condutividade térmica e ser mais densa que a areia sintética à verde industrial AI 50/60 AFS. Conseqüentemente as microestruturas em molde de areia sintética à verde e mulita serão diferentes, pois, no caso da mulita o resfriamento é mais rápido, e isto induzirá a geração de tamanhos de grãos menores, gerando com isso melhores propriedades mecânicas.



**Figura 10** - Curvas de resfriamento no metal, e aquecimento e resfriamento no molde da mulita durante 5 minutos e 2 h de solidificação.

## Conclusão

O estudo da simulação numérica por elementos finitos da fundição do aço em moldes de areia sintética à verde e nos moldes de mulita durante a solidificação foi realizado com a finalidade de prever a transferência de calor em 3-D, e dessa maneira podem ser comparados os resultados obtidos e também possibilitar a previsão das propriedades mecânicas do aço fundido. Neste trabalho foi considerado que as propriedades termofísicas do aço AISI 420 são dependentes da temperatura, conseqüentemente o problema é de característica não-linear. Como resultado foi observada uma distribuição notória do fluxo térmico em diferentes pontos do metal e molde. Sendo que, a distribuição do fluxo térmico é mais notória para a mulita que para a areia sintética à verde industrial AI 50/60 AFS. Este fato pode ser justificado, pois a mulita têm maior condutividade térmica e densidade em relação à areia industrial. Como também, as curvas de aquecimento e resfriamento no aço e nos moldes de areia e de mulita tiveram comportamentos diferentes e interessantes, observando-se mais rápido resfriamento do aço no molde de mulita. Entretanto, as curvas de resfriamento caracterizam o tamanho de grão e a propriedade mecânica do metal, conseqüentemente, para obter tamanhos de grãos menores, que propiciam melhores propriedades mecânicas, o aço deve ser fundido em moldes de mulita.

## REFERÊNCIAS

- 1 CAMPBELL, J., **Casting**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1991.
- 2 PARIONA, M.M., BOLFARINI, C., DOS SANTOS, R.J. AND KIMINAMI, C.S. Application of Mathematical Simulation and Factorial Design Method to the Optimization the Atomization Stage in the Forming of a Cu-6% Zn Alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, v.102, n.1, p.221-229, 2000.
- 3 FLEMINGS, M.C., **Solidification processing**. New York: McGraw-Hill, 1974.
- 4 Su X. Computer aided optimization of an investment bi-metal casting process. Cincinnati, 2001 (PhD thesis, Department of Mechanical, Industrial and Nuclear Engineering, University of Cincinnati).
- 5 ASM Handbook, **Casting** v.15. The materials Information Society, 1996.
- 6 GROZDANIÉ, V. Numerical simulation of the solidification of a stell rail-wheel casting and the optimum dimension of the riser. **Materiali in Tehnologije**, v.36, p.139-141, 2002.
- 7 HEAT TRANSFER 5.7 Training-Manual, Ansys, Inc, 2001.
- 8 DAVIES, A. J., **The finite element method**. New York: Oxford University Press, 1980.
- 9 HANDBOOK ANSYS 7.1, Canonsburg, PA, 2003.
- 10 KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, H. K., **Introduction to ceramics**, 2. ed. New York: John Wiley, 1976.
- 11 HERTZBERG, R.W. **Deformation and fracture mechanics of engineering materials**. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- 12 OZISIK, M.N. **Heat Transfer A basic Approach**. New York: McGraw-Hill, 1985.