



Previsão Automática de Propriedades de Material para a Simulação de Processos de Fundição e Sua Influência nos Resultados Obtidos ⁽¹⁾

Arthur Camanho ⁽²⁾

Um dos desafios da simulação de processos é a disponibilidade de dados de material precisos para os cálculos termodinâmicos e termomecânicos. Para a simulação de processos de fundição, estas propriedades devem ser definidas para uma grande variedade de ligas cobrindo uma faixa extensa de temperatura, da fase líquida, solidificação, transformação de fase no estado sólido e finalmente na temperatura ambiente. Alguns softwares possuem um banco de dados termodinâmicos para prever de forma automática as propriedades termo físicas para várias ligas. Nos softwares mais recentes já é possível prever também parte das propriedades termomecânicas.

Enquanto os dados de material são críticos para a simulação do processo, o objetivo final é obter as propriedades mecânicas do componente fundido. Estas propriedades mecânicas são muito dependentes da microestrutura, que é determinada pela química da liga e pelas condições de processo. Os softwares hoje em dia podem prever a resistência pontual dos materiais fundidos, o que é fundamental para a previsão do desempenho final dos componentes montados.

Este trabalho mostra, através de exemplos práticos, como a obtenção de dados de material é feita de forma automática e suas influências nos resultados obtidos na simulação. Também foram realizadas comparações dos resultados da simulação com os resultados experimentais obtidos.

Palavras chave: Simulação, propriedades de material

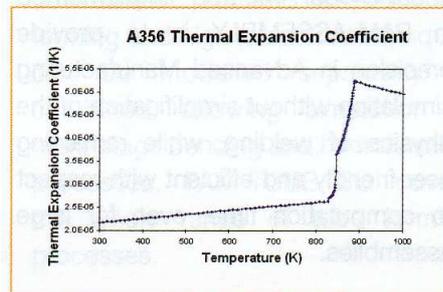
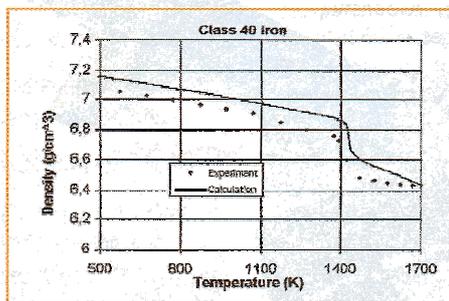
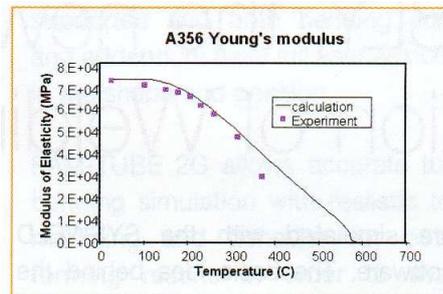
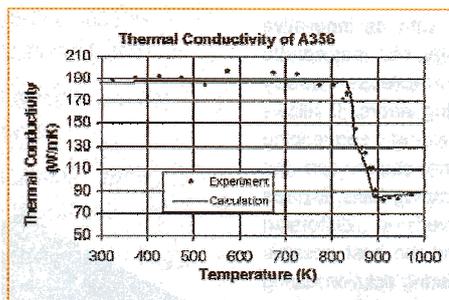
(1) CONAF, 25 a 28 de setembro de 2007, Expo Center Norte, São Paulo

(2) Engenheiro mecânico formado pela FEI com especialização em simulação numérica nos Estados Unidos e França. Atualmente trabalha como gerente regional da ESI Group para a América do Sul.

A Termodinâmica Computacional

As informações disponíveis hoje sobre propriedades termo-físicas de materiais ainda são muito limitadas para cobrirem todas as necessidades da simulação de processos de fundição. Considerando a grande variedade de ligas utilizadas na indústria e a dificuldade e alto custo para se realizar testes experimentais a altas temperaturas, a termodinâmica computacional (ou geração de dados de material utilizando um programa específico) passa a ser uma alternativa muito interessante.

Baseando-se na composição da liga utilizada e num banco de dados termodinâmicos, são calculadas automaticamente a densidade da liga, entalpia, condutividade térmica e viscosidade líquida. A previsão fornece uma gama completa de propriedades termo-físicas que são exigidas para a simulação de cálculo de fluxo e térmica. Esta funcionalidade está disponível hoje para alumínio, ferro, magnésio, níquel e titânio, com planos de inclusão do cobre num futuro próximo.



Figuras 1 e 2: Comparação entre curvas experimentais e calculadas para condutividade térmica e densidade, numa liga de Al e ferro respectivamente

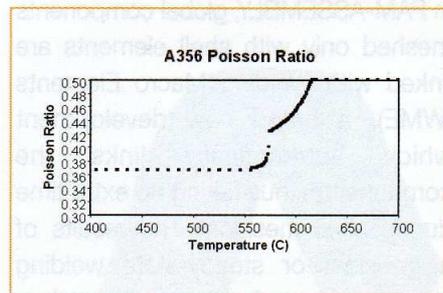


Figura 3, 4 e 5: Curvas calculadas para tensão de escoamento, coeficiente de Poisson e expansão térmica, respectivamente para uma liga de AlSi7Mg

Para cálculos de tensões, dados termomecânicos também são necessários. Para responder a esta necessidade, as últimas versões de alguns softwares já fornecem módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e dados de expansão térmica. Tensões de escoamento e de ruptura serão incluídas num futuro próximo.

Microestrutura

A formação da microestrutura durante a solidificação é um fator muito importante para o controle das propriedades e das qualidades dos produtos fundidos. Há diferentes tipos de microestruturas para diferentes ligas. Os tipos de fases presentes e sua fração em volume, o tamanho de grão e sua forma, são fatores que vão determinar as propriedades e conseqüentemente a utilização apropriada de cada liga.

Para obter resultados de microestrutura, os softwares juntam cálculos termodinâmicos com os resultados de distribuição térmica e de fluxo de metal vindos da simulação em escala macro. Dependendo da composição química, o módulo de cálculo de microestrutura detecta automaticamente as fases que vão aparecer e o tipo de microestrutura que deve ser calculado (dendrítica, eutética, nodular, etc.). Dependendo do tipo de liga e sua composição, informações adicionais estarão disponíveis, como tamanho de grão, espaçamento interdendrítico ou fração eutética para alumínio e contagem de nódulos, raio austenítico, fração de perlita e ferrita para ferro fundido nodular.

Para ilustrar e validar estas funcionalidades, frações eutéticas e espaçamento secundário de dendritas foram previstos e comparados a experimentos e a outras previsões de modelos para um Al-4.9%Cu, para vários tempos de solidificação. Quando aplicado a uma liga Ti-6Al-4V, a nucleação e crescimento das fases alfa e beta bem como a fração de volume das diferentes fases podem ser calculadas com boa precisão.

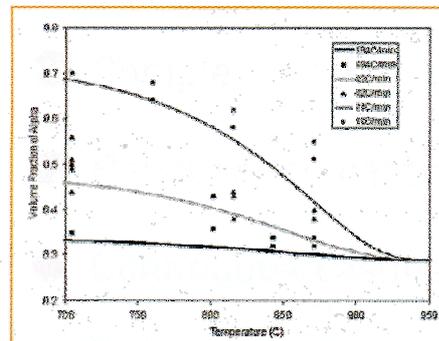


Figura 6: Comparação entre cálculo e medições reais de fração de volume da fase alfa em função da temperatura para uma liga Ti-6Al-4V, para diferentes taxas de resfriamento

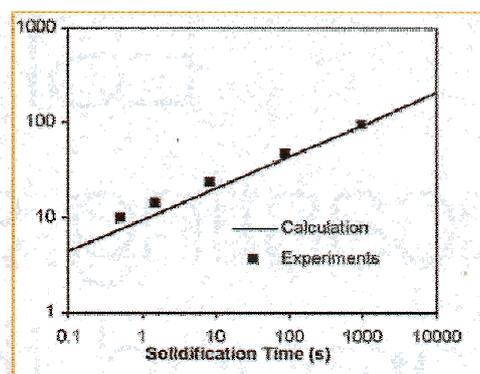
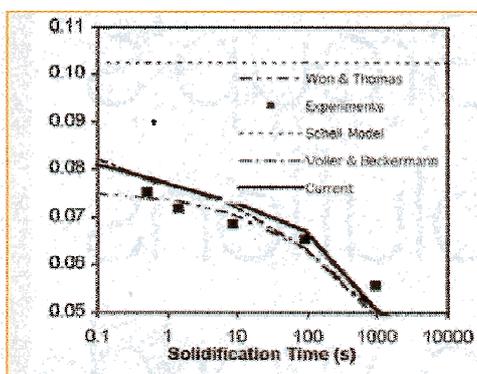


Figura 7 e 8: Comparação entre curvas calculadas e experimentais para fração eutética e espaçamento secundário de dendritas para uma liga Al-4.9%Cu

Nos softwares mais avançados, se estudarmos um ferro fundido nodular, automaticamente a contagem de nódulos, o raio austenítico, e as frações de perlita e ferrita serão calculados, juntamente com as correspondentes propriedades mecânicas (como alongamento, dureza, tensões de escoamento e ruptura, etc.). O software também pode detectar automaticamente se não há magnésio na composição do ferro fundido, e conseqüentemente sua estrutura será lamelar e não nodular.

Na transformação eutética do ferro fundido nodular ocorre um crescimento independente da austenita e do grafite, que não crescem de forma concomitante. A variação de densidade que ocorre neste fenômeno é levada em conta, e o tamanho do grão vai variar então com a expansão e contração do mesmo. Portanto, durante a solidificação, as densidades das diferentes fases são calculadas de acordo com a composição da fase naquela temperatura específica (figura 9). No cálculo, a expansão do grafite também é levada em conta. Na **região 1**, graças ao grande resfriamento que ocorre na borda do fundido, a microestrutura é principalmente constituída de uma fase metaestável (ledeburita). Nesta região, uma densidade local sem expansão é levada em conta. Na **região 2**, onde o resfriamento é mais lento, uma expansão local do material deve ser levada em conta graças à formação dos nódulos que ocorre neste volume.

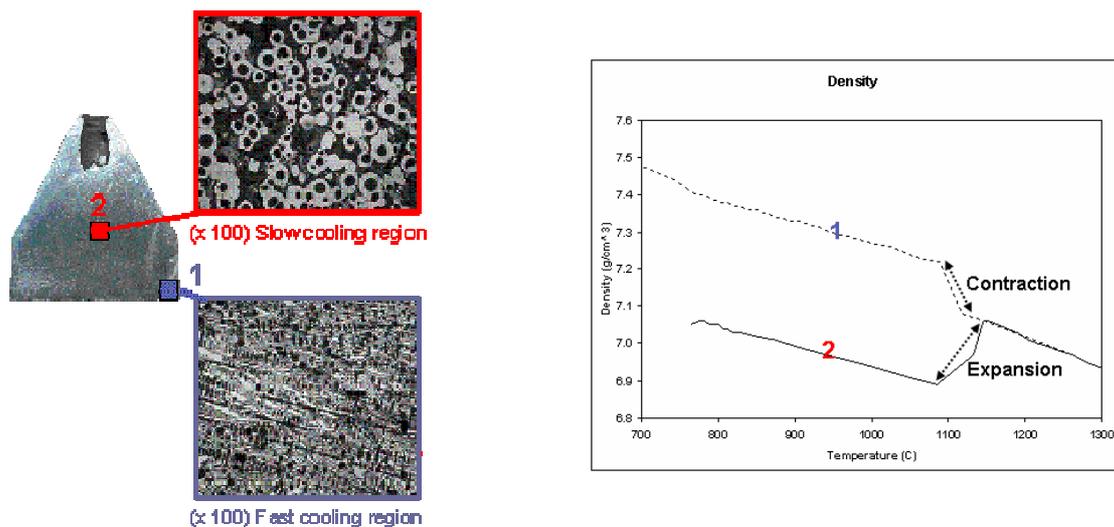


Figura 9: Exemplo de microestrutura e sua correspondente densidade local observados em uma peça simples de ferro fundido

Propriedades de Material do Fundido

Os cálculos de microestrutura podem finalmente ser utilizados para a previsão das propriedades mecânicas finais de algumas ligas. Tensões de escoamento e de ruptura, bem como dureza, podem ser obtidas tanto para ferro fundido nodular como para cinzento. Baseando-se nos resultados de fração de volume e tamanho de grãos simulados para diferentes fases, a tensão de escoamento também pode ser obtida para ligas de Ni usando precipitação gama e modelos de crescimento, e em ligas de Ti usando frações de volume de fases alfa e beta e tamanhos de grãos. Um processo simples de fundição por cera perdida de uma liga Ti-6Al-4V pode ser

usado para ilustrar a relação entre a microestrutura prevista e a tensão de escoamento.

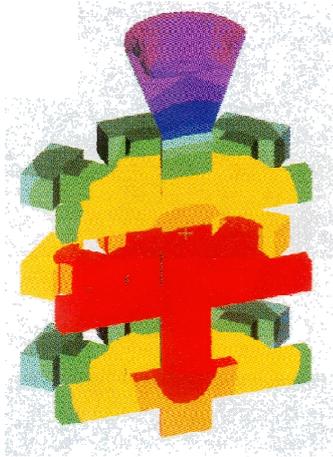


Figura 10: Fração da fase alfa à temperatura ambiente

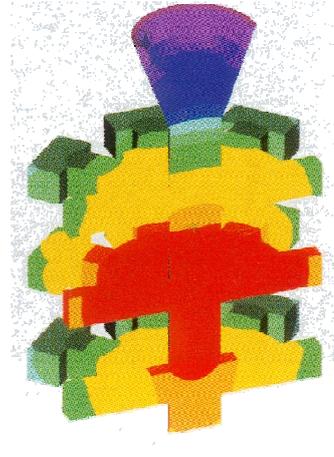


Figura 11: Tamanho médio das partículas da fase alfa

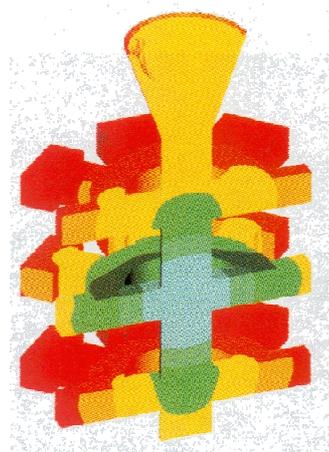


Figura 12: Tensão de escoamento à temperatura ambiente

Como ilustrado, o modelamento de processos de fundição ou tratamento térmico requer modelos avançados de cálculos termomecânicos acoplados com cálculos de microestrutura. Alguns modelos já estão disponíveis para simulação de processos de fundição e podem ser aplicados também para simular o processo de tratamento térmico e prever assim as propriedades mecânicas finais. Estes modelos atualmente conjugam os campos macro de distribuição de temperatura com cálculos termodinâmicos e de microestrutura.

Para atingir o objetivo final de prever as propriedades mecânicas do componente fundido é também necessário levar em conta a influência dos defeitos ocorridos na fundição, as porosidades. Estudos já em curso, como no projeto europeu IMPRESS e outros, tem este objetivo.

Agradecimentos

O autor agradece os engenheiros Dr. Marco Gremaud, Marco Aloe e Gilles Croissonnier pela colaboração no trabalho.

Referências Bibliográficas

PAM-TALK, issue 30, Jul 2006
Casting e-tip 30, www.esi-group.com, Jan 2007