

# Inclusões em Aços

## Cresce a importância de controlar as inclusões endógenas

A tecnologia de fabricação do aço teve um grande avanço nos últimos 25 anos que resultou em notável redução das impurezas no aço. A idéia de aço limpo (clean steel) muitas vezes inclui requisitos especiais para as inclusões com respeito a sua composição, morfologia, tipo, tamanho e distribuição no aço líquido, na solidificação dos lingotes ou placas e no produto final. Esses requisitos especiais precisam ser obtidos pela chamada engenharia de inclusões, ou seja, um controle de processos de fabricação dos aços capaz de prever e obter inclusões adequadas à aplicação prevista para o aço. Com o controle cada vez maior das inclusões exógenas por meios físicos, a influência das inclusões endógenas ficou mais visível e importante no controle das propriedades mecânicas dos aços. A previsão das inclusões endógenas depende de um conhecimento cada vez mais profundo e detalhado das interações que o metal líquido, as escórias e os gases empregados na

produção de aços possuem entre si e com os refratários presentes, em particular, das condições cinéticas e termodinâmicas que controlam as interações.

Por outro lado, a engenharia de inclusões depende da disponibilidade de técnicas capazes de caracterizar a composição, a morfologia e a distribuição destas mesmas inclusões. Os dois artigos deste Caderno Técnico abordam, de maneira objetiva e simplificada, duas áreas essenciais da engenharia de inclusões: a modelagem termodinâmica e os aspectos práticos do escoamento do aço líquido da panela até o molde. Na próxima edição será abordada a evolução das técnicas de caracterização das inclusões em aço. Informações suplementares poderão ser obtidas na página da Rede de Termodinâmica Computacional Aplicada a Materiais (<http://www.tecomat.eng.br>) que, em seu primeiro projeto, aborda exatamente o problema das inclusões em aços.

**Roberto Ribeiro de Aveliz**  
 aveliz@dcm.puc-rio.br  
 Departamento de Ciência dos  
 Materiais e Metalurgia  
 Pontifícia Universidade Católica—RJ

## Escoamento do aço líquido e remoção de inclusões não-metálicas

### Inclusões podem ser formadas ou eliminadas na panela, no distribuidor, na transferência ou no molde

**ABSTRACT** *The task of the flow system is to transport molten steel at a desired flow rate from the ladle into the mold and to deliver steel to the meniscus area that is neither too cold nor too turbulent. Many inclusion-related quality problems that originate during steel processing can be directly attributed to poor control of fluid flow conditions. In addition, the flow conditions should minimize exposure to air, avoid the entrainment of slag or other foreign material, aid in the removal of inclusions into the slag layer and encourage uniform solidification. Achieving these somewhat contradictory tasks requires careful optimization.*

A função do sistema de escoamento de aço é transportar aço líquido para dentro do molde com a vazão necessária, e garantir que o aço não chegue à região do menisco a temperatura muito baixa ou em condições excessivamente turbulentas. Muitos dos problemas de qualidade relacionados a inclusões que surgem durante o processamento do aço podem ser atribuídos diretamente ao controle inadequado das condições de escoamento do aço. Além disto, as condições de escoamento devem minimizar a exposição do aço ao ar, a absorção de escória ou outros materiais indesejados, ajudar na remoção de ...

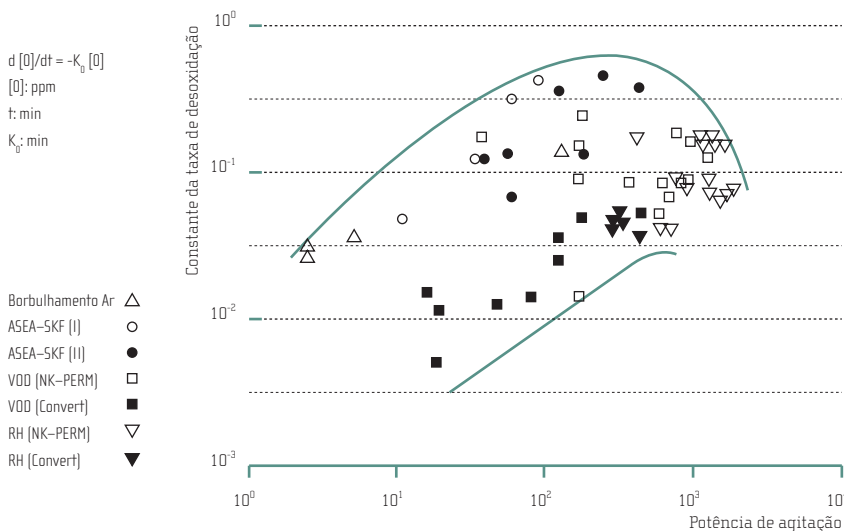
**Brian G. Thomas**  
 bgthomas@uiuc.edu  
 Wilkins Professor of Mechanical  
 Engineering Mechanical Science  
 and Engineering,  
 University of Illinois

inclusões pelas camadas de escória e promover uma solidificação uniforme. Atingir estas condições, de certa forma contraditórias requer uma otimização cuidadosa do processo.

A importância do escoamento dos fluidos começa nos equipamentos de elaboração e refino do aço, inclusive na panela. O escoamento é promovido pela injeção de bolhas de gás, que também têm um efeito positivo na melhoria da limpeza do aço. As bolhas capturam inclusões e transportam-nas na direção da camada de escória, na superfície da panela. A meta de escoamento na panela é promover a mistura uniforme das adições, facilitar as reações interfaciais entre aço e escória na interface superior, aglomerar as inclusões e promover sua remoção, trazendo-as ao contacto com a camada de escória localizada sobre o aço. O desafio está em otimizar os efeitos positivos decorrentes das condições de escoamento, minimizando, ao mesmo tempo, os efeitos negativos associados a velocidades de escoamento excessivas.

O escoamento do aço líquido é controlado pela potência de agitação que depende, por sua vez, da forma do vaso e dos pontos de injeção, assim como da taxa de injeção. O aumento da taxa de agitação ajuda a remoção de inclusões, reduzindo o nível de oxigênio total, como mostra a **figura 1** [1,2], a menos que seja excessivo. Agitação extremamente vigorosa ou duração excessiva de tratamento são negativas por várias razões: em primeiro lugar, velocidade vertical excessiva leva a abertura de um “olho” ou uma região da superfície do aço sem cobertura de escória em que ocorre reoxidação e, possivelmente, arrasto de escória. Em segundo lugar, o desgaste do revestimento da panela pode ser acelerado e se tornar um problema. Por fim, agitação muito forte promove a aglomeração de inclusões, através de colisões, formando macroinclusões[3]. Assim, a potência de agitação deve ser otimizada para uma dada operação.

**Figura 1** | Efeito da energia de agitação sobre a taxa de desoxidação e vários processos de refino (borbulhamento de Argônio[1]; ASEA-SKF[1]; VOD e RH[2])



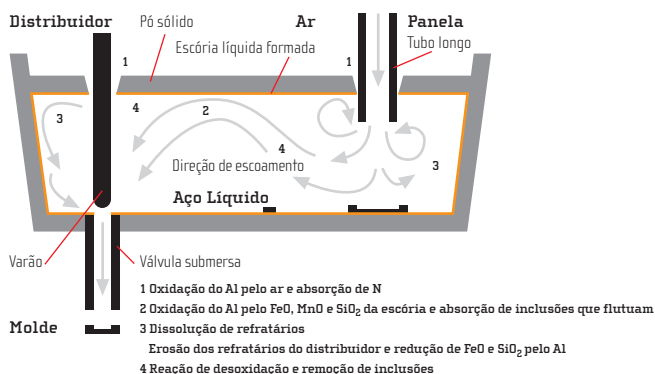
O distribuidor fornece um fluxo contínuo de metal entre as operações de panela, realizadas “em batelada”, e a máquina de lingotamento contínuo. Também é um importante reator metalúrgico, onde a qualidade pode ser melhorada, mantida ou perdida. A meta de escoamento no distribuidor é promover uniformidade de escoamento e remoção de inclusões, evitando, ao mesmo tempo, problemas de escoamento como turbulências superficiais, “curtos circuito”, zonas mortas e formação de vórtices. A **figura 2**[4] mostra, esquematicamente, vários fenômenos de escoamento no distribuidor.

O escoamento no distribuidor deve levar as inclusões à superfície superior e transportá-las ao longo da camada de cobertura com o nível ótimo de turbulência, de modo a permitir que as inclusões cheguem à escória, evitando, ao mesmo tempo, emulsificação e arraste de novas inclusões. O escoamento no distribuidor é ditado principalmente por suas dimensões e forma, e pela localização de ferramentas de controle do escoamento tais como barreiras ou blocos de impacto. O padrão de escoamento é afetado, também, pela vazão de aço e pela distribuição de temperatura no metal líquido. Devido à convecção térmica, uma diferença de temperatura de poucos graus é suficiente para inverter completamente o fluxo, especialmente em distribuidores grandes e profundos, com vazões pequenas, que são os ideais para a remoção de inclusões. Por fim, a injeção de uma cortina de bolhas de argônio antes da saída do distribuidor parece promissora para a remoção de inclusões, tanto devido ao arraste pelas bolhas até a superfície como pela alteração do padrão de escoamento, evitando curto-circuito. Distribuidores profundos com grandes capacidades aumentam o tempo de residência do aço e das inclusões, facilitando a remoção destas partículas. Distribuidores grandes também inibem a formação de vórtices, garantindo maior tempo para a troca de panelas antes que o arraste de escória se torne um problema. Sem controle otimizado do escoamento no distribuidor é melhor não tentar realizar operações de limpeza, operando apenas com o objetivo de evitar contaminação.

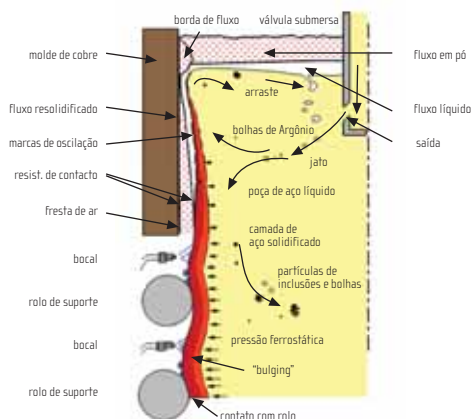
A maior parte dos problemas de qualidade relacionados às inclusões na aciaria aparece durante as operações de transferência. O arraste de escória entre vasos é uma fonte

importante de inclusões. Entre o distribuidor e o molde, o uso de válvulas tampão é um método barato e eficiente de controle de vazamento; o jato desprotegido é adequado para aços de qualidade mais baixa, quando algum arraste de ar pode ser aceitável. Lingotamento com válvula submersa reduz drasticamente o arraste de ar, diminui a turbulência superficial e é essencial para aços de elevada limpeza. O arraste de ar ainda pode ocorrer se existirem vazamentos, trincas ou vedação inadequada nas juntas do bocal ou se este material se tornar poroso. Se a pressão interna do bocal cair abaixo da pressão atmosférica, o ar será aspirado por um destes caminhos. Isto pode ser medido por meio da absorção de nitrogênio, mas o oxigênio reage e forma inclusões. O escoamento no molde é muito importante por ser o último passo no processamento do líquido: problemas de escoamento no molde podem ocasionar vários defeitos que não podem ser corrigidos. O menisco é onde a superfície do produto final é formada e, talvez, seja o local mais importante de todo o processo. Os problemas de escoamento que conduzem a problemas relacionados a inclusões estão ilustrados na **figura 3**. Como apenas cerca de 20% das inclusões que entram no molde podem ser removidas na região escória-metal, em geral é

**Figura 2** | Fenômenos que influenciam a limpeza do aço no distribuidor[5]



**Figura 3** | Representação esquemática dos fenômenos que ocorrem na região do molde de uma máquina de lingotamento contínuo de placas



melhor projetar o escoamento para otimizar a turbulência superficial e minimizar transientes, mantendo uma interface estável, com velocidade na superfície superior entre 0,2 e 0,4 m/s[5]. A remoção de inclusões internas deve ser realizada melhorando as condições de escoamento do aço antes de entrar no molde e evitando obstruções de válvula.

O padrão estável de escoamento no molde deve ser otimizado e controlado através do projeto da válvula e das condições de operação. O efeito de cada parâmetro, individualmente, é discutido em detalhe em outra publicação.[6] O efeito dos vários parâmetros de escoamento sobre os fluxos dirigidos a superfícies e os defeitos correspondentes são resumidos na **figura 4**. [7] Atingir estes objetivos algo contraditórios exige projeto e otimização do sistema de escoamento como um todo. Uma dada geometria de válvula pode ser a ideal apenas para uma faixa definida de condições de processos. Modelos físicos, computacionais e experimentos industriais[6] devem ser combinados para determinar a geometria da válvula e os parâmetros de lingotamento que conduzam a um escoamento controlado e condições definidas de lingotamento, para produzir aço de elevada limpeza interna, alta qualidade, livre de defeitos.

**Figura 4** | Resumo do efeito dos parâmetros de escoamento sobre o escoamento dirigido a superfície e efeitos na qualidade do produto[7]



## REFERÊNCIAS

- [1] OGAWA, K., "Slag Refining for Production of Clean Steel," in Nishiyama Memorial Seminar, Vol. 143/144, Iron and Steel Institute of Japan, [ISS, Tokyo], 1992, 137–166.
- [2] MATSUNO, M., Y. KIKUCHI, M. KOMATSU, M. ARAI, K. WATANABE and H. NAKASHIMA, "Development of New Deoxidation Technique for RH Degassers," I & Steelmaker, Vol. 20 (7), 1993, 35–38.
- [3] MIKI, Y., B.G. THOMAS, A. DENISSOV and Y. SHIMADA, "Model of Inclusion Removal During RH Degassing of Steel," Iron and Steelmaker, Vol. 24 (8), 1997, 31–38.
- [4] KUCHAR, L. AND L. HOLAPPA, "Prevention of Steel Melt Reoxidation by Covering Powders in Tundish," in 76th Steelmaking Conference Proceeding, ISS, Warrendale, PA, 1993, 495–502.
- [5] KUBOTA, J., K. OKIMOTO, A. SHIRAYAMA and H. MURAKAMI, "Meniscus Flow Control in the Mold by Travelling Magnetic Field for High Speed Slab Caster," in Mold Operation for Quality and Productivity, A.W. Cramb and E. Szekeres, eds., Iron and Steel Society, [Warrendale, PA], 1991.
- [6] ZHANG, L. and B.G. THOMAS, "State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness," ISIJ International, Vol. 43 (3), 2003, 271–291 e Thomas, B.G. and L. Zhang, "Mathematical modeling of fluid flow in continuous casting," ISIJ International (Japan), Vol. 41 (10), 2001, 1181–1193.
- [7] HERBERTSON, J., Q.L. HE, P.J. FLINT and R.B. MAHAPATRA, "Modelling of Metal Delivery to Continuous Casting Moulds," in Steelmaking Conf. Proc., Vol. 74, ISS, Warrendale, PA, [Washington, D.C.], 1991, 171–185.
- [8] BAI, H., "Argon Bubble Behavior in Slide-Gate Tundish Nozzles During Continuous Casting of Steel Slabs," PhD Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2000.

# Inclusões não-metálicas e a termodinâmica computacional

**A termodinâmica computacional é uma ferramenta muito importante para a previsão e controle da composição química e fração volumétrica de inclusões não metálicas**

**André Luiz Vasconcellos da C. e Silva**  
andrecs@ibqn.com.br

Professor da Escola de Engenharia Industrial  
Metalúrgica de Volta Redonda–EEMVR  
Universidade Federal Fluminense–UFF  
Diretor Técnico do Instituto Brasileiro  
da Qualidade Nuclear–IBQN

**ABSTRACT** *Non-metallic inclusions are formed close to equilibrium in steelmaking. Computational thermodynamics is a powerful tool in adjusting process variables to tailor these inclusions to achieve desirable properties as well as in predicting the formation and changes occurring to these particles.*

Durante décadas, inclusões não-metálicas em aços foram vistas como decorrentes de dois problemas quase independentes: o primeiro, associado à interação mecânica e fluidodinâmica do aço com escória, refratários e outros materiais (inclusões exógenas) e o segundo, um “mal menor” associado à remoção de solução de elementos que seriam muito mais negativos às propriedades dos aços se precipitados de outra forma ou mantidos em solução, tais como oxigênio e enxofre, (inclusões endógenas).[1]

Dois fatos importantes alteraram este cenário: a dramática melhoria nas técnicas para o controle das inclusões destacou a importância das inclusões endógenas restantes, e a demanda dos usuários por aços cada vez melhores aumentou a consciência sobre a importância das inclusões sobre as propriedades do aço.

A elevada temperatura em que se passam os processos de refino e lingotamento dos aços indica que os métodos termodinâmicos podem ter aplicação quase direta aos problemas de aciaria, em vista da cinética acelerada.

Entretanto, a aplicação da termodinâmica à previsão e controle de inclusões não-metálicas foi, durante longo tempo, limitada pela complexidade dos cálculos necessários e pela carência de dados confiáveis para a realização de tais cálculos, como discutido a seguir.

Os processos de aciaria envolvem sistemas muito complexos, multicomponentes e, em geral, duas ou mais fases. Estes processos não são facilmente tratáveis pelos métodos simplificados de cálculo termodinâmico desenvolvidos antes da década de 1970. Nos problemas relacionados à gênese e ao controle de inclusões não-metálicas, estes métodos foram (e são) efetivos na previsão de apenas alguns equilíbrios relevantes para a gênese de inclusões, especialmente as desoxidações simples. As duas dificuldades que limitam a aplicação destes métodos simplificados e recomendam a busca por uma técnica alternativa são: (a) a dificuldade da descrição do comportamento termodinâmico das espécies dissolvidas em escórias ou nas inclusões não-metálicas e (b) as consideráveis interações entre solutos no aço, especialmente quando o efeito de elementos como cálcio e magnésio dissolvidos no aço são importantes.

Termodinâmica Computacional[2]

O conceito termodinâmico fundamental para a aplicação da termodinâmica computacional é a percepção de que em um sistema multicomponente, multifásico, em temperatura e pressão constantes, as fases presentes, suas composições e quantidades se ajustarão de forma a atingir um mínimo para o valor da energia livre de Gibbs do sistema (**figura 1**).

Assim, existem duas questões importantes na termodinâmica computacional:

- a) como descrever a energia livre de Gibbs de cada fase possível, em função da temperatura, pressão e composição química e;
- b) como calcular a combinação de fases, suas composições e quantidades que resultarão em um mínimo da energia livre de Gibbs do sistema.

FIGURA 1

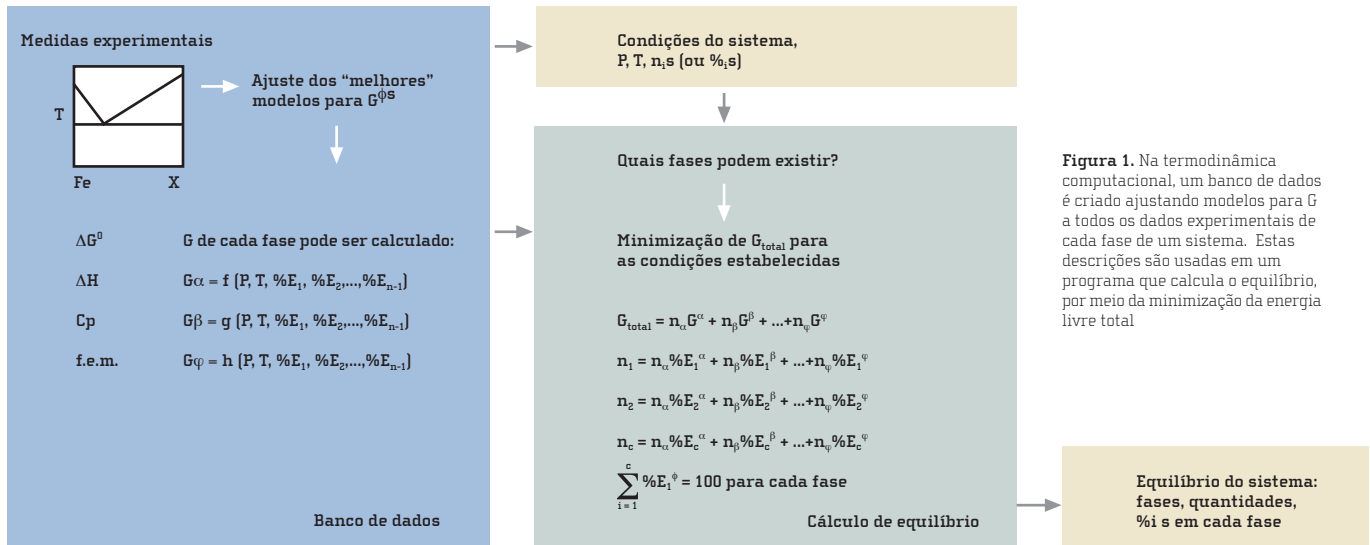


Figura 1. Na termodinâmica computacional, um banco de dados é criado ajustando modelos para  $G$  a todos os dados experimentais de cada fase de um sistema. Estas descrições são usadas em um programa que calcula o equilíbrio, por meio da minimização da energia livre total

A segunda questão é um problema matemático e não de termodinâmica e sua compreensão não é crítica para o emprego da técnica.

A primeira questão envolve a escolha dos modelos matemáticos que descrevam de forma satisfatória o comportamento das soluções reais e o ajuste dos coeficientes dos modelos às medidas experimentais. Ajustados os coeficientes de determinado modelo à determinada fase, a informação é armazenada, (em geral como descrição da energia livre de Gibbs das fases, em função da composição química, temperatura e pressão), em "bancos de dados" termodinâmicos.

### Controlando a formação de óxidos adequados ao produto:

Aços para cordoalha de pneus e aços para molas são alguns produtos que, nas últimas décadas, se beneficiaram da engenharia de inclusões (por exemplo[3]). A termodinâmica computacional pode ser uma ferramenta muito útil no processo de engenharia de inclusões.

Um objetivo, nestes aços, é evitar a formação de inclusões de baixa deformabilidade (alto ponto de fusão). Identificados os óxidos com baixo ponto de fusão, pode-se estabelecer como objetivo a precipitação de inclusões com tais composições (figura 2).

Se as inclusões se precipitarão em equilíbrio com o aço, é possível calcular a composição do aço que conduzirá a precipitação das inclusões selecionadas, na temperatura desejada. O ajuste da composição do aço, entretanto, não depende apenas de adições a serem realizadas. O teor de alumínio requerido do aço, por exemplo, pode ser tão baixo que uma escória precise ser projetada, para uso no forno panela, de forma a garantir que o aço tenha esta composição. A figura 2 apresenta um exemplo do efeito de algumas variáveis importantes da escória sobre a composição do aço, no projeto de uma escória para um processo.[4]

### Formando inclusões líquidas

A formação de inclusões líquidas durante o processamento do aço é, freqüentemente, um importante objetivo metalúrgico, tanto para favorecer o coalescimento e remoção destas inclusões como para evitar o entupimento de válvulas no lingotamento. Sob este último aspecto, o potencial do tratamento do aço com cálcio foi reconhecido há várias décadas (por exemplo[5]), em função da formação de compostos de baixo ponto de fusão no sistema  $CaO-Al_2O_3$  (figura 3a). O ajuste da composição química do aço de modo a garantir a formação destes compostos é complexo, especialmente em vista do número de variáveis

...

FIGURA 2

Figura 2. Exemplo de projeto de inclusões: um aço para molas deve ter inclusões de baixo ponto de fusão no sistema MnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>. A composição determinada limita os teores de alumínio, drasticamente. A escória [no sistema CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>] capaz de produzir esta composição é então calculada

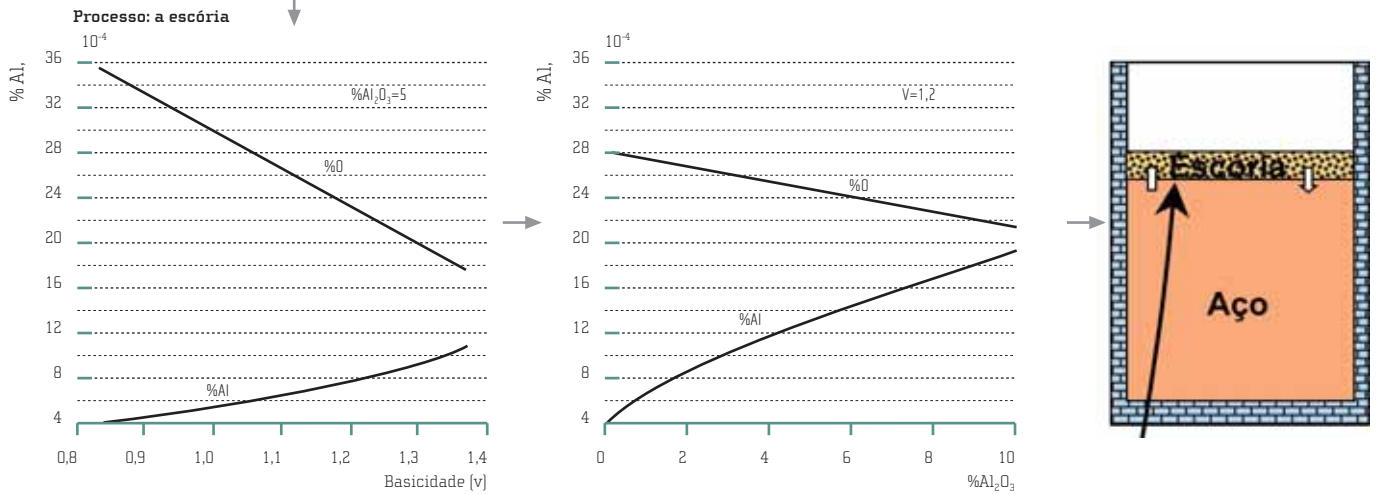
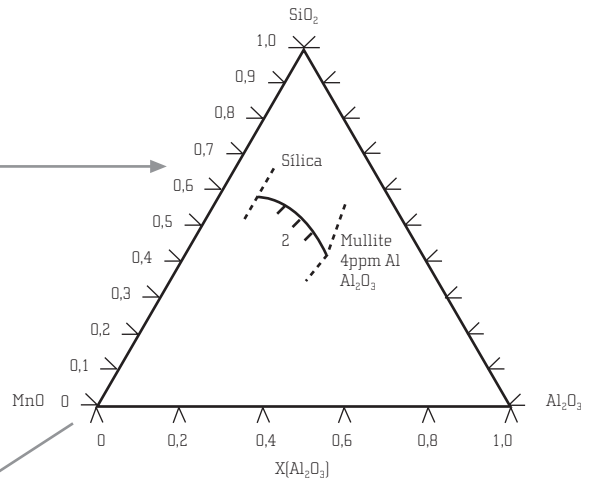
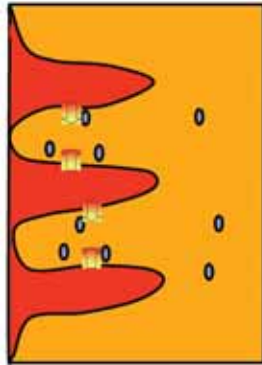
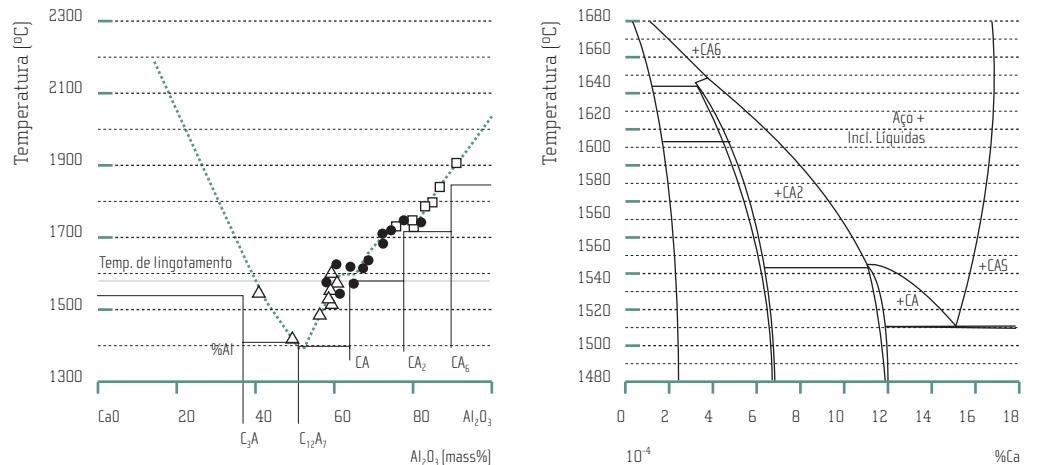


FIGURA 3

Figura 3. (a) Diagrama CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> indicando as regiões onde existem misturas líquidas de óxidos e os resultados de lingotamento. (b) Fases presentes em equilíbrio com um aço contendo 0,02%Al, 0,02%S e 20ppm O<sub>t</sub>, em função do teor de cálcio e da temperatura

Entupimento de bocal □  
Estável ●  
Erosão do varão △



relevantes. Por meio da termodinâmica computacional é possível avaliar as condições em que inclusões líquidas são formadas para um determinado aço e avaliar o efeito das diversas variáveis sobre a “janela” de lingotabilidade (Figura 3b).[4]

Ajustando a composição e quantidade de inclusões em aços de elevada limpeza o teor de oxigênio total é muito próximo do valor em equilíbrio termodinâmico na temperatura de refino. Além da necessidade de prever o teor de oxigênio nestas condições, é importante avaliar a possibilidade de precipitação de inclusões indesejáveis, contendo MgO. Como o magnésio se dissolve no aço como resultado do equilíbrio metal-escória, é possível prever o efeito da composição da escória sobre a composição do aço líquido e controlar o teor de magnésio, evitando a formação destas inclusões. A Figura 4 apresenta um exemplo de resultados deste tipo de cálculo, mostrando o efeito do teor de MgO da escória de forno panela sobre os teores de

elementos relevantes para a formação de inclusões, assim como os resultados de composição química medidos e calculados.[2]

Embora não seja capaz de prever a distribuição final e o tamanho das inclusões não-metálicas, a termodinâmica computacional é uma ferramenta muito importante para a previsão e controle da composição química e fração volumétrica destas inclusões.

Com esta ferramenta, ações de engenharia de inclusões se tornam possíveis, permitindo que o processamento do aço seja ajustado para produzir as inclusões desejadas (ou menos indesejáveis). A evolução dos modelos de difusão acoplados à termodinâmica computacional permite antever a capacidade de (a) estimar a distribuição final no produto fundido, por meio de modelamento da segregação e precipitação na solidificação e (b) avaliar as transformações que as inclusões sofrerão durante o processamento, especialmente a “cristalização” no interior das inclusões.

## REFERÊNCIAS

[1] COSTA E SILVA, A., *Refino dos Aços—Avanços e Perspectivas*, in *Aços*, Perspectivas para os próximos 10 anos. I. Bott, R.P.R. and P. R., Editors. 2002: RECOPE, Rio de Janeiro. p. 55-68.

[2] COSTA E SILVA, A. *Aplicações da termodinâmica computacional a aciaria*. in XXXVI Seminário de Fusão Refino e Solidificação dos Metais-Internacional, 2005. Vitória, ES, Brazil: ABM São Paulo Brazil.

[3] OSHIRO, T., T. IKEDA, H. MATSUYAMA, S. OKUSHIMA, Y. OKI, and N. IBARAKI, *Verbesserung der Dauerhaltbarkeit von Ventiltfederdraht*. Stahl und Eisen, 1989. 10(21): p. 1011-1015.

[4] OERTEL, L. AND A. COSTA E SILVA, *Application of thermodynamic modeling to slag-metal equilibria in steelmaking*. CALPHAD, 2000. 23(3-4): p. 379-391.

[5] PELLICANI, F., F. VILLETTE, and J. DUBOIS. *The production of clean, isotropic steel by means of calcium treatment with the Affival cored-wired*. in ScanInject 4. 1986. Lulea, Sweden: MEFOS, Lulea, Sweden.

FIGURA 4

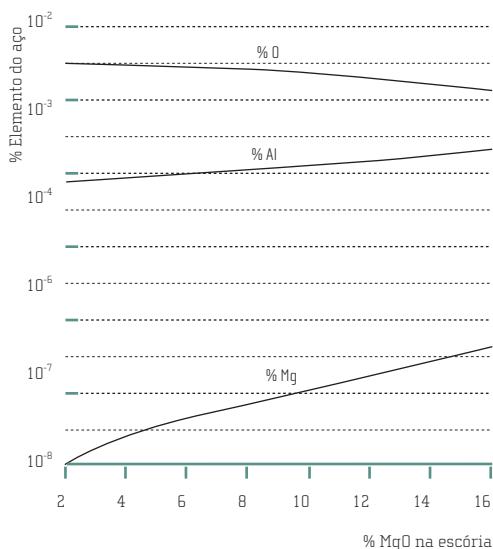


Figura 4. (a) A composição da escória define os teores de Al, O e Mg no aço. (efeito do MgO indicado, apenas).

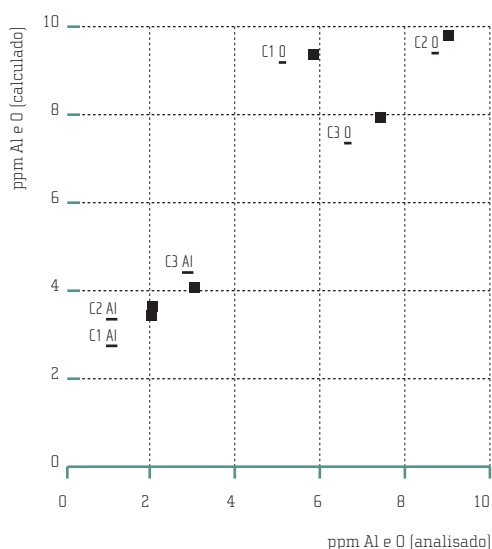


Figura 4. (b) Os resultados calculados e medidos apresentam boa correspondência, para um aço produzido industrialmente