

A FERRAMENTA DE MODELAGEM NUMÉRICA E SUA APLICAÇÃO NA FABRICAÇÃO DE AÇOS¹

Leonardo Barboza Trindade²

Ismael Lis Alves Daoud³

José Ernesto de Azevedo Nadalon⁴

Rafael Skrzek Sicorski⁵

Antônio Cezar Faria Vilela⁶

Resumo

O objetivo deste trabalho é mostrar a aplicabilidade da ferramenta de modelagem numérica na fabricação de aços, bem como apresentar os modelos mais recentes desenvolvidos em pelo LASID/UFRGS. Serão destacados estudos em lingotamento contínuo e de operações realizadas durante o refino secundário. A modelagem numérica consiste, basicamente, em resolver equações diferenciais através de um método numérico. Dentre os mais conhecidos, cita-se o método de volumes finitos e o método de elementos finitos, tradicionalmente utilizados na solução de problemas fluido-dinâmicos e eletromagnéticos, respectivamente. A modelagem de um processo pode ser dividida em etapas: análise do problema físico, onde o modelador verifica as aproximações necessárias; pré-processamento, onde as características geométricas e fenomenológicas são inseridas; a solução do problema e o pós-processamento, onde os resultados são analisados. Na metalúrgica secundária, os modelos de escoamento na panela com a injeção de argônio têm sido de grande valia na compreensão de fenômenos como, arraste e emulsificação de escória e os tempos necessários para dissolução de ligas e para a remoção de inclusões. No lingotamento contínuo, a modelagem numérica tem sido empregada com sucesso na otimização do escoamento em distribuidores e no projeto e desenvolvimento de peças refratárias, como inibidores de turbulência e válvulas submersas. Equipamentos até então pouco conhecidos, como os agitadores eletromagnéticos, foram modelados e seus efeitos sobre a qualidade do aço puderam ser desvendados.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo; Modelagem numérica; Dinâmica dos fluidos computacional; Modelos matemáticos.

THE NUMERICAL TOOL AND ITS APPLICATION IN THE STEELMAKING PROCESS

Abstract

The aim of this paper is to show the numerical modeling tool application in the steelmaking processes and the latest advances developed at LASID/UFRGS. Studies in continuous casting and secondary refining operations will be shown. The numerical modeling consists, basically, of solving the differential equations that govern the phenomena through a numerical method. The most usual ones are the finite volume method and the finite element method, traditionally used on the fluid flow and electromagnetic problems, respectively. The numerical modeling of a process can be divided in steps: problem analysis, in which the approximations and assumptions are done; the pre-processing, in which the geometric and phenomenological characteristics are inserted; the problem solution and the post-processing, in which the results are analyzed. In the secondary metallurgy, the gas-stirred ladle models have been used in the understanding of drag and emulsification slag phenomena, as well as in the mixture time and inclusion removal evaluation. In the continuous casting, the numerical modeling has been used successfully in the tundish flow optimization, in refractory parts projects, such as turbulence inhibitors and nozzles. The electromagnetic stirrers, little known till now, were modeled and their effects on the steel quality were clarified.

Key words: Continuous casting; Numerical modeling; Computational fluid dynamics; Mathematical models.

¹ XXXVII Seminário de Aciaria – Internacional, 21 a 24 de maio de 2006, Porto Alegre/RS - Brasil

² Físico - Dr. Eng. Metalúrgica, Diretor Geral da STE – Science Technology & Engineering

³ Engenheiro Mecânico – Mestrando PPGEM/UFRGS, bolsista da Capes

⁴ Engenheiro Civil – Mestrando PPGEM/UFRGS, bolsista do CNPq

⁵ Engenheiro Mecânico – Mestrando PPGEM/UFRGS, bolsista do CNPq

⁶ Engenheiro Metalúrgico, Dr.-Ing., Professor do DEMET/PPGEM/UFRGS, Coordenador do LASID

1 INTRODUÇÃO

O emprego da ferramenta de modelagem numérica e dos modelos matemáticos na siderurgia teve seu início por volta dos anos 80. Um dos precursores no uso desta técnica foi o pesquisador Julian Szekely,⁽¹⁾ com ênfase nos fenômenos fluido-dinâmicos e térmicos que fazem parte do processo de fabricação de aços e ligas metálicas e não metálicas.

No Brasil, a modelagem numérica de fenômenos de escoamento aplicada à siderurgia surgiu nos anos 90, com trabalhos direcionados ao estudo e caracterização do escoamento em distribuidores⁽²⁻⁵⁾ e moldes⁽⁶⁻¹³⁾.

A motivação principal para o uso da ferramenta de modelagem numérica está na relação entre as variáveis de escoamento e a qualidade do aço. É de conhecimento geral, por exemplo, que as trajetórias das inclusões presentes no banho são fortemente influenciadas pelo escoamento e, portanto, sujeitas aos efeitos de modificadores de fluxo e inibidores de turbulência.⁽⁵⁾

Mais recentemente, por volta dos anos 2001 e 2002, iniciaram-se alguns estudos⁽⁸⁻¹²⁾ envolvendo fenômenos acoplados magneto-fluido-dinâmicos, inerentes ao processo de agitação eletromagnética do aço, que pode ser tanto empregado na panela como no molde. Um dos objetivos destes modelos foi avaliar o efeito da agitação eletromagnética sobre a remoção de inclusões no molde, bem como os efeitos térmicos.

Com o rápido crescimento da capacidade computacional e dos recursos dos softwares de modelagem, os problemas modelados também aumentaram de dificuldade, principalmente no que diz respeito à geometria dos “reatores”, cada vez mais complexa, e à solução de problemas multifásicos. Estes últimos, por sinal, são bastante freqüentes no processo de fabricação de aços, onde o exemplo mais simples é a escória que protege o banho nas diferentes etapas do processo.

Outro exemplo clássico de escoamento multifásico é a agitação do banho através da injeção de argônio. Na panela a injeção tem como objetivo homogeneizar química e termicamente o aço, além de atuar na remoção de inclusões. No molde é empregada como redutora da formação de *clogging* e na remoção de inclusões. A etapa de refino secundário é talvez uma das mais complexas em termos de fenômenos, pois envolve no mínimo três fases, aço-escória-argônio e mais uma fase dispersa, que seriam as inclusões. Aliado a tudo isto, existem os fenômenos termodinâmicos, que têm fundamental importância na qualidade do produto e que dependem muito das condições do escoamento. Este problema, por sinal, é um dos temas futuros na área de modelagem numérica de fenômenos de escoamento.

Não se pode desvincular da modelagem numérica os métodos experimentais, ou modelos físicos, como são comumente chamados. São eles que dão a base para a criação dos modelos matemáticos e servem como meio de validação dos resultados numéricos.

A idéia deste artigo surgiu da necessidade de se fazer uma revisão dos principais trabalhos desenvolvidos no LASID/UFRGS na área de modelagem numérica na siderurgia.

Como isto, pretende-se dar uma visão global do atual estado da arte e em que direção estão sendo desenvolvidos os mais recentes estudos.

2 A MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica consiste basicamente em resolver as equações diferenciais de um determinado fenômeno físico através de um método numérico. As equações diferenciais surgem do balanço de grandezas que são conservadas dentro de um determinado domínio. Exemplos destas são as equações de balanço de momentum e massa, tradicionalmente conhecidas, na área de fluidos, como equação de Navier-Stokes e da Continuidade.

Na sua forma geral, a equação de balanço pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i \phi_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_i \rho_i \phi_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_i \Gamma_{\phi_i} \frac{\partial \phi_i}{\partial x_j} \right] + \alpha_i S_{\phi_i}$$

A variável ϕ pode representar diferentes grandezas físicas, como \vec{V} , T , k , ε , \vec{B} , \vec{A} etc, dependendo do problema que se está analisado.

O método numérico mais usual empregado na solução de problemas de escoamento é o de volumes finitos. Este método caracteriza-se pela integração da equação de balanço de momentum ou energia sobre o volume de controle. Este método tem sido tradicionalmente empregado na solução de problemas fluido-dinâmicos pelos mais diversos pacotes numéricos.

O método de elementos finitos, por outro lado, tem sido utilizado na solução de problemas estruturais e eletromagnéticos, tendo como “vantagem” inicial a versatilidade na construção das malhas. Atualmente ambos os métodos permitem o uso de malhas hexaédricas e tetraédricas, facilitando em muito a construção das malhas em geometrias cada vez mais complexas.

Um dos grandes avanços, em termos de modelos matemáticos, têm sido feitos na solução dos problemas de turbulência. Modelos tradicionais, como o k-epsilon, limitados em termos de aplicação, foram sendo substituídos por outros mais complexos e abrangentes, como o modelo de Tensão de Reynolds. Outros ainda são mais poderosos, porém com um alto custo computacional, como é o caso do modelo LES – *Large Eddy Simulation*.

A solução de escoamento multifásicos também teve grandes avanços, principalmente em fenômenos que envolvem bolhas e partículas dispersas em meios líquidos, através de modelos de arrasto entre fases, como Grace, Ishii-Zuber, Schiller-Naumann etc.

Escoamentos bifásicos de superfície livre, que pode ser o caso do aço-escória, podem ser aproximados por modelos homogêneos, que reduzem significativamente o tempo computacional do modelo.

O cálculo da concentração de um traçador em distribuidores de aço pode ser feito através da adição de um escalar passivo ou pelo método lagrangeano, permitindo que se possa validar o escoamento calculado numericamente com dados experimentais obtidos via modelo físico.

A solução da trajetória de inclusões a partir de um escoamento previamente calculado tem sido tradicionalmente resolvida pelo método Lagrangeano, onde a trajetória de cada partícula é calculada a partir do balanço de forças que age sobre a mesma.

Mais recentemente, a concentração de partículas no banho foi resolvida através das equações de balanço de momentum e massa, permitindo assim a interação com outras fases dispersas no banho, como é o caso da colisão entre bolhas e inclusões.

Com este modelo foi possível avaliar o efeito da injeção de argônio na remoção de inclusões.

O acoplamento entre modelos fluido-dinâmicos e termodinâmicos já é uma realidade, pois a solução da concentração de espécies químicas no banho pode ser calculada de formas simples e rápida.

Enfim, cada vez mais os pacotes numéricos englobam modelos matemáticos complexos e que podem ser aplicados aos problemas siderúrgicos.

3 APLICAÇÕES NA FABRICAÇÃO DO AÇO

Os resultados aqui apresentados são oriundos, em grande parte, dos projetos de pesquisa do LASID, nos cerca de 9 anos de atuação nesta área.

Um dos primeiros trabalhos desenvolvidos com o uso da ferramenta de modelagem numérica envolveu a construção de um modelo de escoamento para um distribuidor de lingotamento contínuo.^(2,3) O objetivo era avaliar a eficiência de uma barreira na limpeza do aço, medida indiretamente através da caracterização por volumes e tempos característicos. A Figura 1 mostra as duas curvas obtidas com e sem o uso de barreira e os planos de vetores de velocidade na região de interesse.

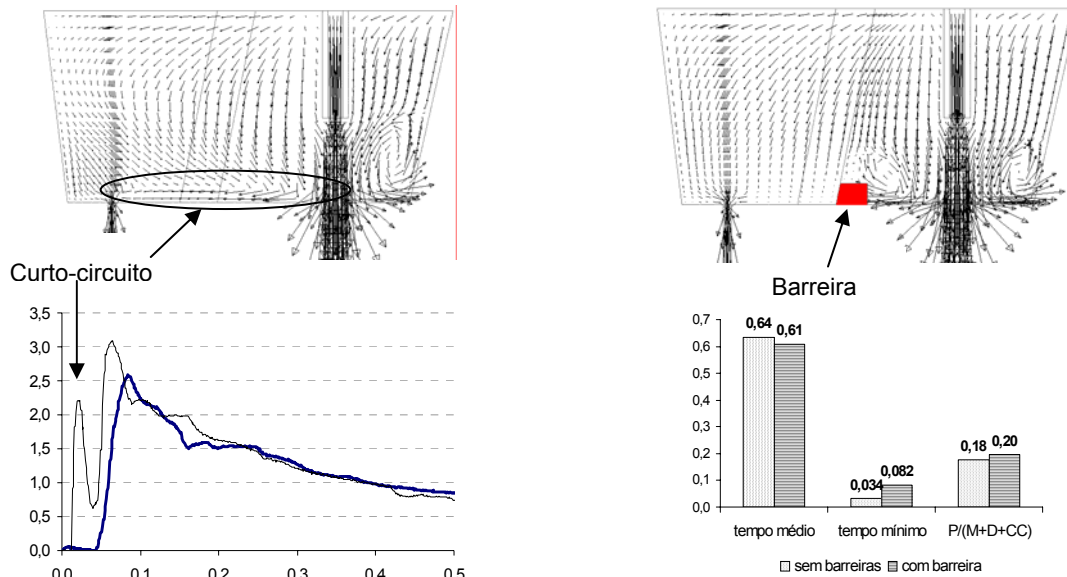


Figura 1. Análise típica do escoamento em um distribuidor: campo de vetores, curvas DTR e quantificação dos volumes característicos.

Outro importante trabalho envolveu a modelagem física e numérica do escoamento em um molde de tarugos, onde o objetivo era avaliar as condições críticas para ocorrência do arraste e emulsificação da escória.^(6,7) A validação do modelo numérico foi feita através das linhas de corrente e de um ensaio com corante, conforme Figura 2. A emulsificação da escória foi realizada somente em modelo experimental, com o uso de querosene pigmentado. Foi determinada a velocidade crítica de lingotamento acima da qual ocorre o arraste e emulsificação de escória.

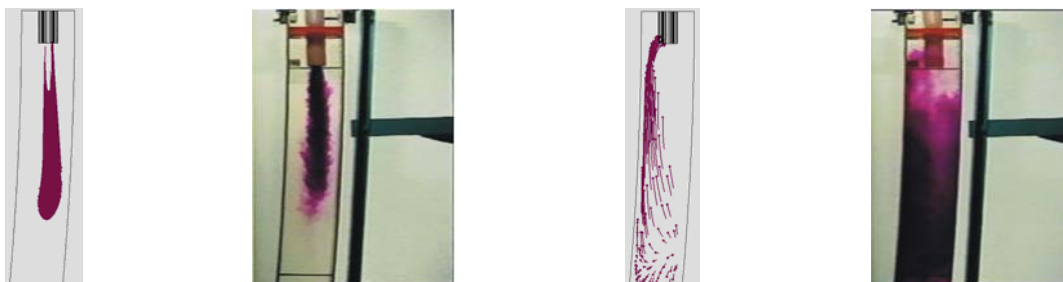


Figura 2. Linhas de corrente e trajetória do escoamento via ensaio de corante.

Uma das limitações do modelo físico de escoamento do molde é não poder avaliar os efeitos da agitação eletromagnética. Para tal, foi construído um modelo numérico do agitador eletromagnético, ver Figura 3, e seus efeitos no escoamento calculados e quantificados.⁽⁸⁻¹²⁾ Foi possível determinar que o agitador não causa perturbação significativa no menisco a ponto de arrastar escória.

O efeito da agitação eletromagnética sobre a trajetória e remoção de inclusões foi analisado através do modelo Lagrangeano. Observou-se que a agitação ajuda a remoção de inclusões pela escória e concentra as mesmas nas regiões centrais do tarugo.

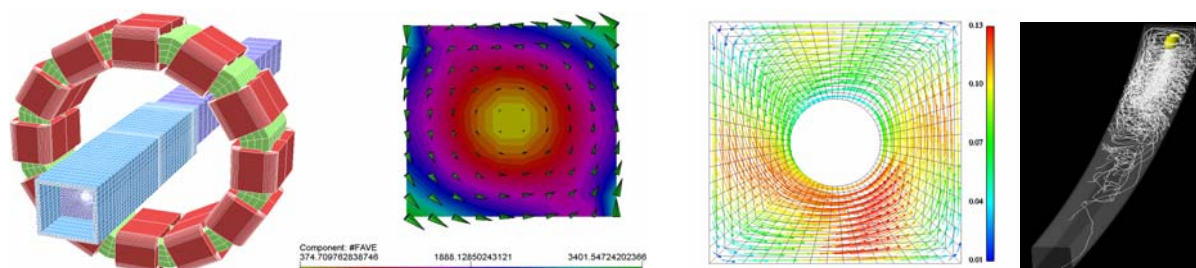


Figura 3. Geometria e malha do modelo do agitador no molde, campo de forças no plano localizado no centro do agitador, campo de velocidade no menisco e trajetória das inclusões.

Atualmente estão sendo realizados estudos que tem por objetivo simular a camada de escória e verificar o efeito da agitação sobre a mesma. Pretende-se também investir em modelos que possam prever o comportamento de pequenas bolhas de gás e como estas são influenciadas pelo agitador eletromagnético.

Os efeitos da agitação eletromagnética sobre a redução do sobre-aquecimento também podem ser avaliados com o uso da ferramenta de modelagem numérica.

Tradicionalmente o lingotamento contínuo de placas tem sido alvo de vários estudos^(13,14) envolvendo simulação numérica em sistemas de válvulas-gaveta⁽¹³⁾ e moldes.⁽¹⁴⁾ Os trabalhos envolvendo válvula-gaveta buscam identificar regiões de recirculação e baixa pressão nas regiões de estrangulamento, principalmente quando se trabalha com a válvula 50-60% fechada. As regiões de baixa pressão estão ligadas a problemas de vedação e entrada de ar na válvula. Nas regiões de recirculação podem ocorrer acúmulo de inclusões e levar a formação de *clogging*. Desta forma, a ferramenta de modelagem ajuda a identificar as condições fluido-dinâmica do escoamento aço-argônio no interior da gaveta, como se pode ver na Figura 4.

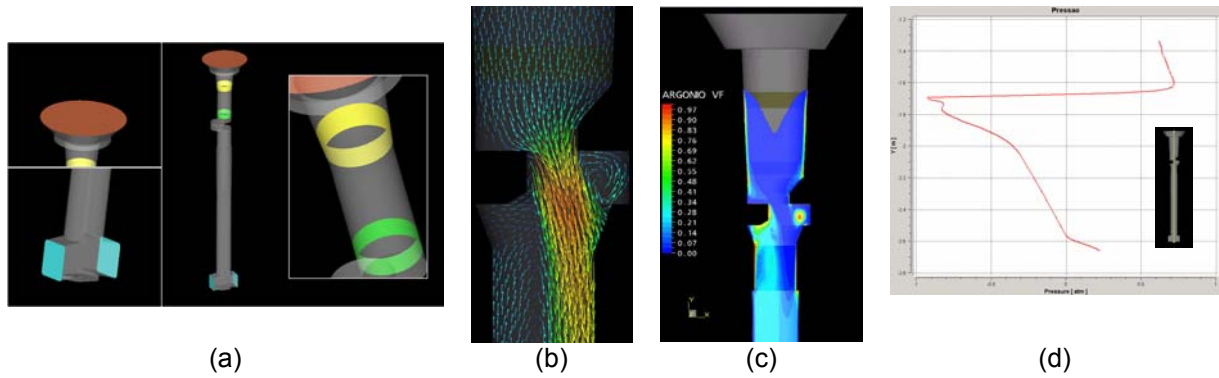


Figura 4. (a) Geometria da válvula gaveta, (b) vetores de velocidade, (c) mapa de fração volumétrica de argônio na região da gaveta e (d) perfil de pressão no interior da válvula ao longo da mesma. Cortesia: Magnesita e ESSS

Na região do molde o controle do jato proveniente da válvula submersa é de suma importância para a qualidade do aço. Excesso de turbulência, elevação e velocidade no menisco podem acarretar problemas de arraste e emulsificação de escória, lubrificação e inclusões no produto final. Os modelos numéricos têm sido muito úteis na quantificação e visualização destes fenômenos, permitindo que se possa minimizá-los em função das diferentes variáveis de processo, como, velocidade de lingotamento, vazão de argônio, ângulo de saída do jato etc.

A Figura 5, abaixo, mostra um exemplo de escoamento em um molde de placa.

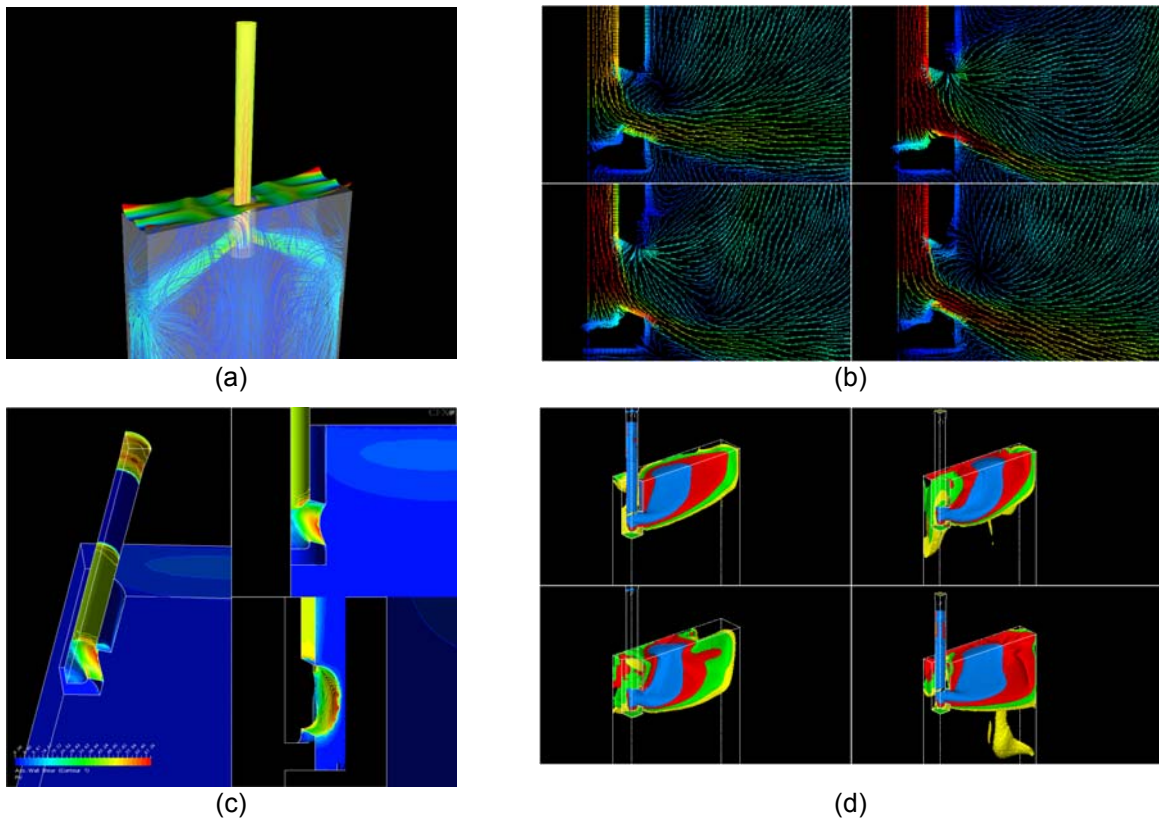


Figura 5. (a) Linhas de corrente e perturbação da interface, (b) vetores de velocidade no plano de simetria, (c) tensão de cisalhamento junto às paredes da válvula e (d) iso-superfícies de argônio. Cortesia: Magnesita e ESSS

Alguns trabalhos podem envolver fenômenos térmicos e de escoamento atuando simultaneamente, permitindo-se obter correlações com problemas de trincas e fissuras, típicos do lingotamento de placas.

Essa revisão encerra-se com a etapa de refino secundário na panela, talvez uma das mais ricas em fenômenos fluido-dinâmicos, térmicos e termodinâmicos.

Os primeiros estudos e modelos objetivaram avaliar os tempos de mistura das ligas injetadas durante o processo de refino pós-vácuo.^(15,18) Inicialmente tais modelos envolveram a solução do escoamento aço-argônio através de modelos matemáticos aproximados, conhecidos como *Quasi Single Phase*. Esta aproximação não resolve as equações de escoamento para a fase gasosa e, portanto, não permite uma adequada representação da região da *plume* ou coluna de bolhas. A aproximação Lagrangeana para as bolhas foi uma das alternativas para contornar este problema, se tornando, em alguns casos, válida, porém com limitações. Entre estas pode-se citar a impossibilidade de interação com modelos de *Free Surface*, de interação entre partículas dispersas, etc.

O modelo mais próximo da realidade física do problema é o de Euler-Euler.⁽¹⁵⁻¹⁸⁾

Nesta formulação as equações de cada uma das fases é resolvida separadamente, ligadas entre si pelos termos de arrasto e interface. Existem também uma série de modelos de interface para cálculo dos coeficientes de arrasto para as bolhas, dependendo do regime de turbulência na qual as mesmas se encontra. Cita-se, por exemplo, os modelos de Grace, Ishii-Zuber, Schiller-Naumann, entre outros.

A formulação euleriana permite também a simulação de escoamentos trifásicos, como por exemplo, a “abertura de olho” na camada de escória devido a injeção de argônio.⁽¹⁶⁾ Tal fenômeno é extremamente complexo e de fundamental importância para as reações termodinâmicas e para a qualidade do aço. Sabe-se que uma agitação suave da interface metal-escória propicia uma maior cinética nas reações de refino, porém, uma excessiva agitação pode levar ao descobrimento do aço e, conseqüentemente, a oxidação do mesmo. A agitação em excesso também pode levar a emulsificação de escória, gerando inclusões ao produto final.

A Figura 6 mostra resultados de modelamento experimental e numérico, respectivamente, do escoamento água-ar-querosene em uma panela em escala 1:3.

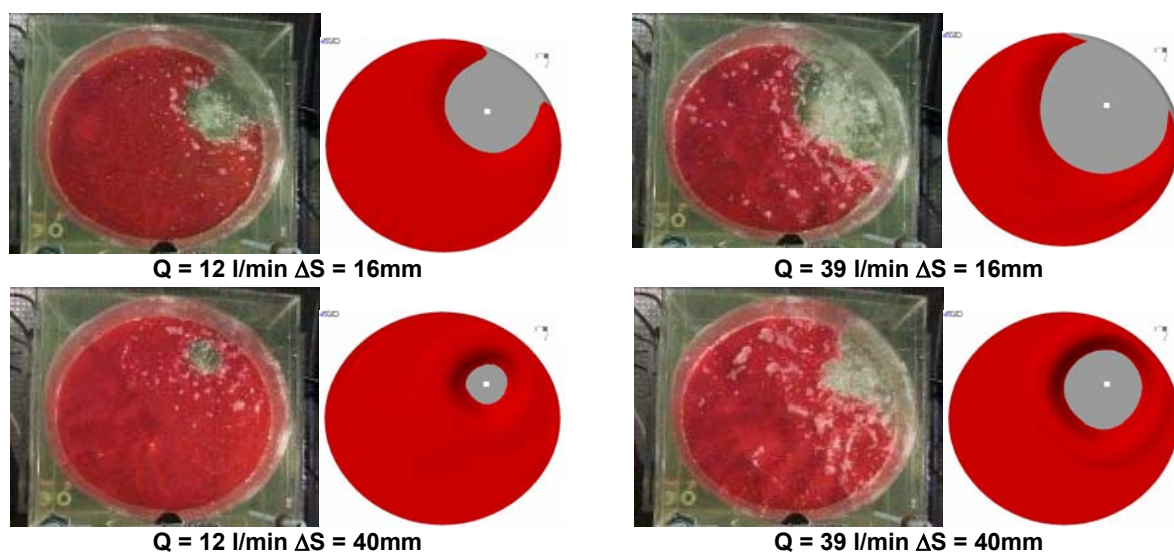


Figura 6. “Abertura de olho” na camada de querosene em função da vazão de ar (Q) e da espessura do óleo (ΔS).

O uso de um ou mais *plugs* de injeção de argônio foi avaliado numericamente em recente artigo publicada na ABM.⁽¹⁷⁾ Nesse trabalho a influência de mais pontos de injeção foi avaliada em função das variáveis como volume estagnado e tempo de homogeneização, como se pode ver na Figura 7.

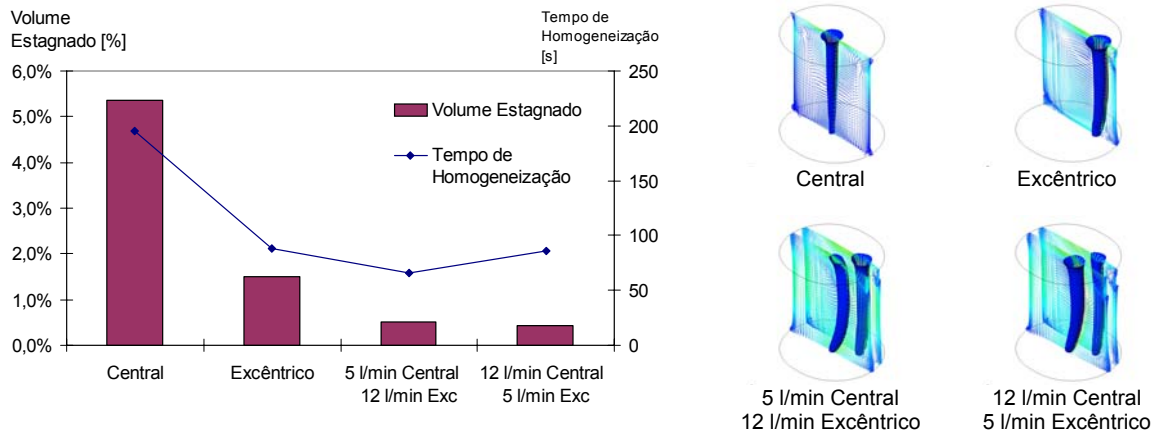


Figura 7. Efeito do uso de um ou mais *plugs* de injeção no tempo de homogeneização e no percentual de volume estagnado.

Outro fenômeno de interesse é o efeito da agitação por gás nas perdas térmicas e no desgaste dos refratários. Tais variáveis de processo podem ser quantificadas através da modelagem numérica e, portanto, otimizadas em função dos objetivos de cada usina. Recentemente, um trabalho de pós-doutorado⁽²⁰⁾ teve como objetivo desenvolver um modelo numérico para a remoção de inclusões em uma panela siderúrgica agitada por argônio. Tal modelo fez uso das mais recentes equações e formulações matemáticas para o cálculo da remoção por bolhas, equações estas obtidas para problemas de flotação de partículas na área de mineralogia. Alguns resultados são apresentados na Figura 8. Na Figura 8 (a) é mostrada a remoção para partículas de $50\mu\text{m}$ e vazão de ar de 20 NI/min, calculada numericamente e comparada com dados obtidos via modelo físico. Os resultados mostram uma excelente concordância entre os modelos. A interação bolha-inclusão é um processo extremamente complexo, porém sua compreensão é de fundamental importância para a definição e escolha dos parâmetros de operação da etapa de refino. Sabe-se, por exemplo, que o tamanho de bolha ideal está por volta de 5mm, diâmetro este praticamente impossível de se obter com os atuais dispositivos de injeção e com as condições de escoamento encontradas na panela. A Figura 8 (b) mostra o efeito do diâmetro de bolha, de 5mm e 30mm, sobre a remoção de inclusões de $50\mu\text{m}$.

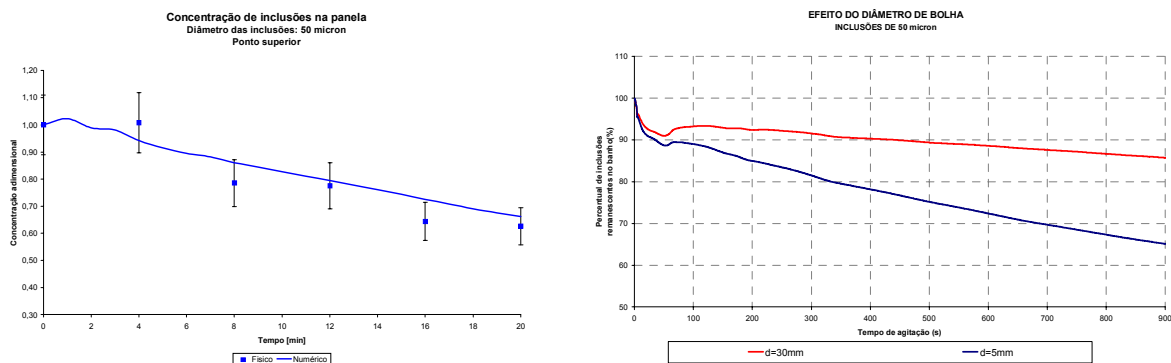


Figura 8. (a) Concentração de partículas em função do tempo de agitação: vazão de 20NI/min, partículas de $50\mu\text{m}$. (b) Efeito do diâmetro da bolha no percentual de inclusões removidas.

A Figura 9 mostra os mapas de velocidade, fração volumétrica de argônio e concentração de inclusões no mesmo instante de tempo.

Percebe-se que o aço líquido se movimenta devido à ascensão das bolhas de argônio injetadas pelo *plug* poroso, localizado no centro da panela, ver Figura 9(a). A região de fração volumétrica de argônio mais elevada, observada na Figura 9(b), também é conhecida como *plume* ou coluna de bolhas.

É nessa região onde irá ocorrer a maior probabilidade de colisões entre bolhas e inclusões e também as maiores chances de adesão e remoção pelas bolhas. O mapa de concentração de inclusões, mostrado na Figura 9(c) ajuda a compreender melhor onde estão as regiões de menor e maior concentração de inclusões.

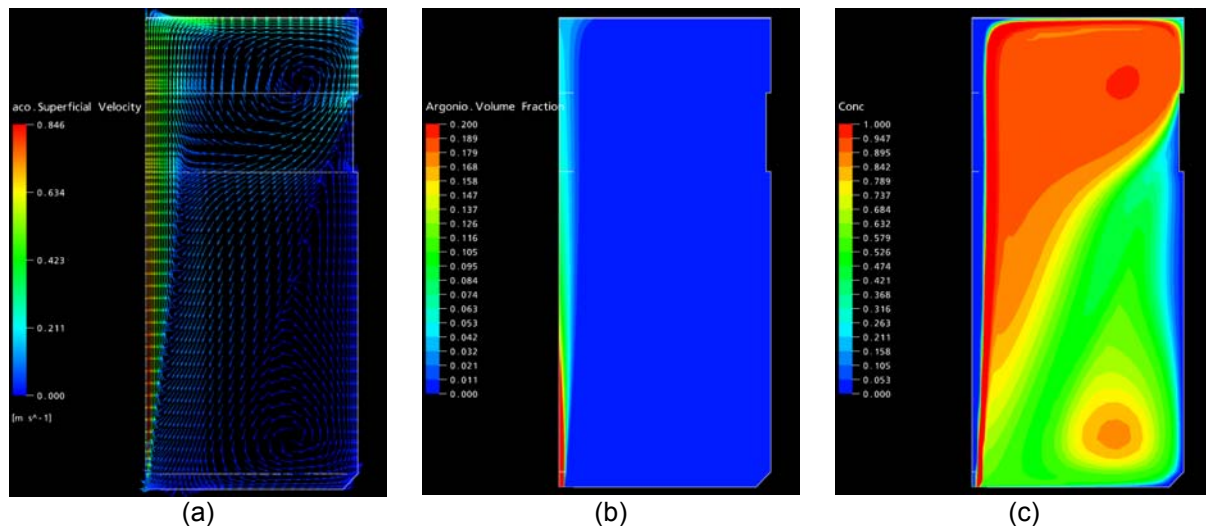


Figura 9. (a) Campo de velocidade; (b) Mapa de fração volumétrica de argônio e (c) Mapa de concentração adimensional de inclusões.

4 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

A siderurgia de certa forma ainda é uma área nova em termos de aplicação da ferramenta de modelagem numérica, se comparada à indústria aeronáutica, aeroespacial e petroquímica, por exemplo. Portanto, espera-se ainda grandes avanços em termos de conhecimento e novos modelos matemáticos para a compreensão e otimização dos processos metalúrgicos. A termodinâmica computacional, aliada aos fenômenos termo-fluido-dinâmicos, deverá ter grandes avanços. Da mesma forma, os fenômenos envolvendo múltiplas fases, como escória, inclusões, aço e argônio, deverão sofrer avanços em termos de fundamentos e novos modelos. Como resultado, a indústria siderúrgica poderá reduzir seus custos de produção, devido ao maior controle do processo, e aumentar a qualidade do produto, originada pelos investimentos em novas tecnologias para produção de aços de qualidade superior.

Nesses nove anos o LASID permitiu que, além das atividades de pesquisa relatadas, fossem formados recursos humanos em nível de pós-graduação e o surgimento da empresa STE (Science Technology & Engineering), sediada na Incubadora Tecnologia Hestia do Centro de Tecnologia da UFRGS.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a Gerdau Aços Especiais Piratini pelo apoio e incentivo nestes mais de 10 anos de parceria e a Magnesita S.A., pelos recentes

investimentos na área de modelagem numérica, tanto em seu Centro de Pesquisa, quanto nas empresas parceiras, ESSS e STE. Da mesma forma, agradecem aos órgãos de financiamento a pesquisa, CNPq, Finep e Fapergs, pelo apoio em projetos de pesquisa e bolsas de estudo, e aos alunos e pesquisadores que nesses anos colaboraram com o Laboratório de Siderurgia da UFRGS.

REFERÊNCIAS

- 1 SZEKELY J. **Metallurgical Transactions B**, Vol 19B, August, 1988, p. 525-540.
- 2 WOLLMANN A. et al. In: JORNADAS SAM 98 – IBEROMET V, Rosário, Argentina, 1998, Tomo I, p. 23-26.
- 3 TRINDADE L. B. et al. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 1999.
- 4 BORDIN F. et al. In: XXXI SEMINÁRIO DE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS, 2000, Vitória. São Paulo: ABM, 2000. p.
- 5 DAOUD I. L. A. et al. In: 15º CONFERENCIA DE ACERÍA, San Nicolás, Argentina, November, 2005.
- 6 TRINDADE L. B. et al. In: 53º CONGRESSO ANUAL DA ABM, Belo Horizonte, MG, 1998, p. 415-430.
- 7 FREITAS S. L. et al. In: XXX SEMINÁRIO DE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS, ABM, Vitória, ES, 1999, p. 333-342.
- 8 TRINDADE L. B. et al. In: XXXII SEMINÁRIO DE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS, ABM, Salvador, BA, 2001, p..
- 9 TRINDADE L. B. et al. In: 13º SEMINARIO DE ACERÍA e 3º SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DO IAS, Buenos Aires/Argentina, 2001.
- 10 TRINDADE L. B. et al. In: XXXIII SEMINÁRIO DE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS, ABM, Santos, SP, 2002.
- 11 TRINDADE L. B. et al. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE MAGNETISMO, Gramado, RS, 2002.
- 12 TRINDADE L. B. et al. **IEEE Transactions on Magnetism**, Vol. 38, No. 6, November 2002.
- 13 NADALON J. E. A. et al. In: 15º CONFERENCIA DE ACERÍA, San Nicolás, Argentina, November, 2005
- 14 Magnesita S. A. Relatório Interno, 2005.
- 15 TRINDADE L. B. et al. In: XXXIV SEMINÁRIO DE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS, Belo Horizonte, MG, 2003.
- 16 TRINDADE L. B. et al. In: XXXV SEMINÁRIO DE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS, Salvador, BA, 2004.
- 17 SICORSKI R. S. et al. In: 15º CONFERENCIA DE ACERÍA, San Nicolás, Argentina, November, 2005.
- 18 SICORSKI R. S. et al. In : XXXVI SEMINÁRIO DE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS, Vitória, ES, 2005.
- 19 TRINDADE L. B. Modelo de remoção de inclusões em uma panela siderúrgica. Relatório Interno. Gerdau Aços Especiais Piratini. 2005.