O IMPACTO DO CFD NA METALURGIA, DOS AVANÇOS E DESAFIOS ÀS PERSPECTIVAS FUTURAS

João Vitor Vasconcelos Zardini, Sayd Farage David, Leandro Marochio Fernandes

Instituto Federal do Espírito Santo, Rodovia ES-482 Fazenda Morro Grande, ES, 29311-970 - Cachoeiro de Itapemirim - ES, Brasil, jvzardini@gmail.com, saydfd@ifes.edu.br, leandro.mfernandes@ifes.edu.br.

Resumo
A simulação computacional tem transformado a metalurgia, um campo essencial da indústria moderna. A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) emergiu como uma ferramenta crucial para simular e analisar fenômenos complexos, aplicados desde o design de aeronaves até os processos de fundição. Este artigo revisa sistematicamente a literatura sobre o uso de CFD na metalurgia, abordando os fundamentos teóricos, suas aplicações industriais, desafios e perspectivas futuras. A pesquisa utilizou bases de dados como Science Direct e ResearchGate, além de obras clássicas. A aplicação de CFD mostrou-se promissora para otimizar processos, reduzir custos e desenvolver novos materiais na metalurgia. No entanto, ainda existem desafios técnicos significativos, como a complexidade dos escoamentos multifásicos. A conclusão aponta para o futuro, onde a integração entre CFD e inteligência artificial poderá gerar inovações substanciais e melhorar a eficiência dos processos na indústria metalúrgica.
Palavras-chave: Dinâmica dos fluidos computacional (CFD). Metalurgia. Engenharias.

Área do Conhecimento: Engenharias - Engenharia Mecânica.

Introdução

A metalurgia, um dos pilares da indústria moderna, busca constantemente processos mais eficientes, sustentáveis e precisos. A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) emergiu como uma ferramenta interessante para atender essa demanda, revolucionando a compreensão e otimização de processos metalúrgicos. Essa tecnologia permite simular fenômenos complexos, como escoamento de metais líquidos e transferência de calor, otimizando processos, reduzindo custos e desenvolvendo novos materiais (Fortuna, 2020; Jianping Zhang e Plikas, 2017).

O uso de CFD tem mostrado benefícios significativos na indústria metalúrgica. Por exemplo, simulações de ventilação em fornos otimizaram a distribuição de calor e reduziram pontos frios, melhorando a eficiência energética e a qualidade do produto final (Jianping Zhang e Plikas, 2017). Ademais, a simulação detalhada de processos de fundição contínua e soldagem a laser aumentou a precisão no controle da taxa de resfriamento e na qualidade das peças produzidas (Han et al., 2021).

No entanto, a complexidade dos processos metalúrgicos, que envolvem escoamentos multifásicos, reações químicas e transformações de fase, impõe desafios significativos à modelagem precisa por CFD (Zhu, 1998; Chattopadhyay e Guthrie, 2014). Este artigo revisa sistematicamente a literatura sobre as aplicações de CFD na metalurgia, discutindo os fundamentos teóricos, as aplicações industriais, os desafios e as perspectivas futuras dessa tecnologia para o setor.

Metodologia

Este estudo foi conduzido através de uma revisão sistemática da literatura, focando nas aplicações de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) na metalurgia. Foram consultados artigos científicos relevantes de caráter internacional, obtidos das bases de dados *Science Direct* e *ResearchGate*, bem como obras de referência no campo, incluindo Cottrell (2019), Verhoeven (2007), Ghosh e Chatterjee (2008), além de trabalhos recentes como Han et al. (2021). A seleção dos materiais foi baseada na relevância para os tópicos de modelagem de processos metalúrgicos e otimização por meio de CFD. A análise focou em identificar os avanços metodológicos, desafios e as tendências na integração de CFD na metalurgia. Nenhum dado experimental foi gerado; portanto, o estudo se limitou à compilação

e síntese de informações existentes, visando apresentar uma perspectiva atualizada sobre o estado da técnica.

Resultados e Discussão

A metalurgia é a ciência que transforma minérios em materiais metálicos com propriedades específicas, essenciais para a indústria e a sociedade moderna. Essa área do conhecimento pode ser dividida em três grandes ramos: química, mecânica e física (Cottrell, 2019).

A metalurgia química se concentra nas reações químicas que transformam minérios em metais puros, enquanto a metalurgia mecânica estuda o comportamento dos metais quando submetidos a diferentes processos de fabricação. Por sua vez, a metalurgia física investiga a estrutura interna dos metais e como ela influencia suas propriedades (Cottrell, 2019; Verhoeven, 2007; Ghosh; Chatterjee, 2008).

Diante da vasta gama de aplicações da metalurgia e da complexidade dos processos envolvidos, a compreensão aprofundada desses fenômenos se torna fundamental para o desenvolvimento de novos materiais e a otimização dos processos de produção (Cottrell, 2019; Ghosh; Chatterjee, 2008).

A compreensão dos processos metalúrgicos é crucial para desenvolver novos materiais com propriedades específicas, como alta resistência, leveza e resistência à corrosão. Essa capacidade de adaptar os materiais às necessidades das diferentes aplicações é o que torna a metalurgia uma área em constante evolução e fundamental para o progresso tecnológico.

Porém, os processos metalúrgicos são regidos por uma física intrincada, tais como o escoamento de metais líquidos e a transferência de calor, exigindo emprego de ferramentas avançadas, como a Dinâmica dos Fluidos Computacional, que por sua vez permite simular e analisar esses processos, aprimorando a produção e desenvolvendo novos materiais com propriedades sob medida.

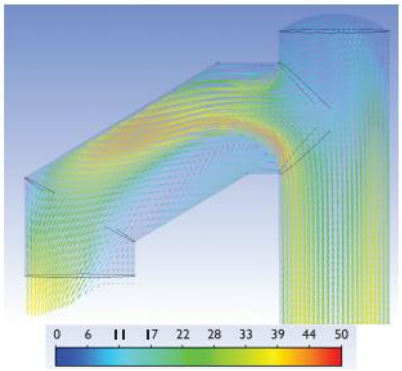
O CFD, é uma poderosa ferramenta de simulação numérica que encontra aplicações em diversos campos, desde a análise de fluxos sanguíneos em biomedicina até a gestão de resíduos em engenharia ambiental, do design de aeronaves supersônicas ao processo de fundição, prevendo a formação de porosidade, inclusões e defeitos, *e.g.* (Zawawi *et al.*, 2018; Chattopadhyay; Isac; Guthrie, 2010). A técnica surge como alternativa às limitações das análises teóricas devido à própria natureza intrincada dos problemas, além de reduzir os custos altos das técnicas experimentais (Fortuna, 2020).

A Dinâmica dos Fluidos Computacional quando aplicada a metalurgia, tem mostrado potencial, ao aprimorar processos e projetos, aumentando a eficiência, reduzindo custos e garantindo a qualidade dos produtos. Por exemplo, a aplicação de CFD em processos de ventilação de fornos demonstrou ser eficaz na otimização da distribuição de calor e na redução de pontos frios, melhorando a eficiência energética e a qualidade do produto final (Jianping Zhang; Plikas, 2017).

A aplicação de CFD na indústria metalúrgica também tem raízes tanto na otimização de processos quanto na garantia da sua segurança operacional. Através de simulações detalhadas, a CFD permite prever e mitigar riscos, como vazamentos de metal líquido em fornos de fusão e a exposição a gases tóxicos em ambientes de trabalho (Jianping Zhang; Plikas, 2017). Ao modelar cenários de emergência e otimizar sistemas de ventilação, a CFD contribui para a criação de ambientes de trabalho mais seguros e processos mais confiáveis. A análise de ventilação, por exemplo, permite garantir a remoção eficiente de contaminantes e a manutenção de condições ambientais adequadas (Zhu, 1998). Observe a Figura 1, de onde tem-se o modelo computacional utilizado para simular o escoamento de gás nas coifas do sistema de despoeiramento primário dos convertedores LD da ArcelorMittal Tubarão, a fim de prever as falhas por desgaste nas paredes (Sartim *et al.*, 2012).

O projeto de equipamentos metalúrgicos também se beneficiou da aplicação de CFD, uma vez que a tecnologia permite a criação de designs mais eficientes e seguros, auxiliando na identificação de pontos críticos e na otimização do fluxo de materiais e de calor. A aplicação da técnica no projeto de cadinhos e fornos tem resultado em melhorias na eficiência térmica e na uniformidade da distribuição de temperatura (Chattopadhyay; Isac; Guthrie, 2010). As simulações permitem identificar áreas de alta concentração de tensão térmica, possibilitando ajustes no projeto para minimizar riscos.

Figura 1 - Campos de velocidade na região central da curva de saída da coifa do convertedor.

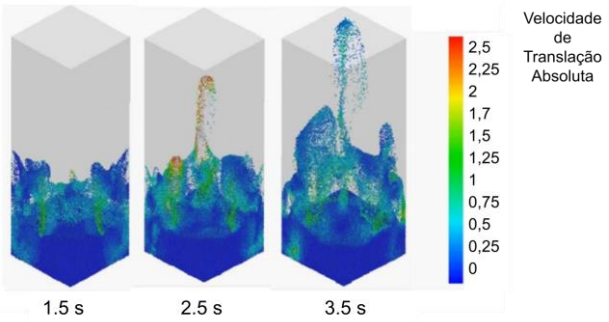


Fonte: Adaptado de Sartim *et al.*, (2012).

Outro exemplo é o uso de CFD no design de sistemas de injeção de gases em convertedores de aço, otimizando a posição e o ângulo dos bicos de injeção, que por sua vez resultam numa melhor mistura de gases com o metal líquido e uma maior eficiência no processo de refino (Chattopadhyay; Guthrie, 2014). Isso não só melhora a qualidade do aço produzido, como também reduz o consumo de energia e os custos operacionais.

Beloglazov e Kuskova (2017) simularam o sistema de torrefação de concentrados metalúrgicos em leito fluidizado usando a ferramenta integrada de CFD-DEM. As simulações realizadas revelam a importância da distribuição do fluxo de gás na mistura das partículas e a necessidade de considerar a cinética da reação para obter resultados precisos. A simulação pode ser vista na Figura 2, que ilustra o comportamento de mistura de aproximadamente 400.000 partículas esféricas em um leito fluidizado com três injetores. A escala de cores representa a velocidade de translação absoluta das partículas.

Figura 2 - Comportamento de mistura de partículas em leito fluidizado com 3 injetores simulados.

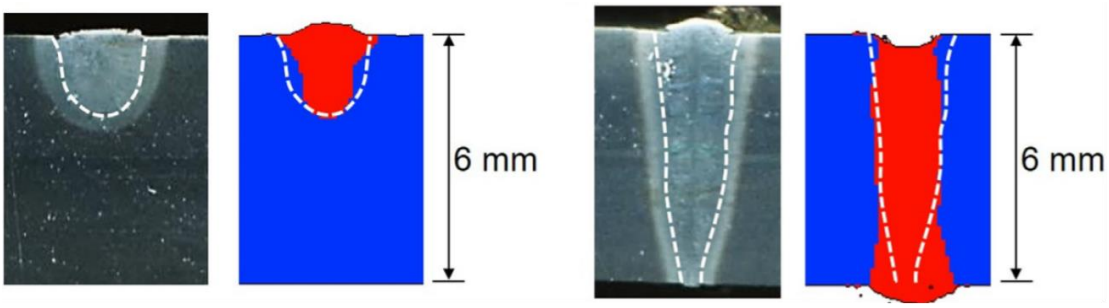


Fonte: Adaptado de (Beloglazov; Kuskova, 2017).

Em processos como a fundição contínua, a simulação possibilita ajustes precisos em parâmetros operacionais. Ao simular a solidificação do metal líquido, a CFD permite uma maior otimização da taxa de resfriamento e da composição do metal, por exemplo (Li *et al.*, 2011).

Já Han *et al.*, (2021) combinaram duas técnicas de análise numérica (CFD e FEM) para obter uma solução detalhada do processo de soldagem a laser com a técnica keyhole, desde o aquecimento do metal até o resfriamento e solidificação, onde os dados de temperatura da simulação em CFD foram alimentados na análise por elementos finitos (FEM). A Figura 3 ilustra o resultado da simulação em CFD, que foi capaz de prever com precisão o comportamento da soldagem a laser em diferentes condições de pressão, permitindo entender a dinâmica da poça de fusão. Isso é importante porque permite aos engenheiros otimizar o processo de soldagem e garantir a qualidade das peças fabricadas, auxiliando no desenvolvimento de processos de fabricação mais eficientes e confiáveis.

Figura 3 - Comparação do formato da poça de fusão experimental e da simulação em CFD, na pressão atmosférica padrão de 101.325 Pa à esquerda e na pressão subatmosférica de 3.000 Pa à direita.



Fonte: Adaptado de Han *et al.*, (2021).

A modelagem de turbulência via CFD também apresentou avanços em processos metalúrgicos. Nos últimos 25 anos, novas abordagens para a modelagem da turbulência, como a *Large Eddy Simulation* (LES) e o *Direct Numerical Simulation* (DNS), foram desenvolvidas, proporcionando uma representação mais precisa dos fenômenos turbulentos em comparação com os modelos tradicionais de Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS). Essas técnicas permitem uma compreensão mais detalhada do comportamento do escoamento turbulento em processos como a fundição e a solidificação de metais (Chattopadhyay; Isac; Guthrie, 2010).

A modelagem de reações químicas complexas em processos metalúrgicos foi igualmente aprimorada com o desenvolvimento de novos algoritmos e métodos numéricos. A implementação de modelos cinéticos detalhados permite a simulação precisa das interações químicas que ocorrem durante o processamento de metais, como a oxidação e a redução em altos-fornos e convertedores de aço (Jianping Zhang; Plikas, 2017).

Outras aplicações envolvem a mineração, onde o CFD otimiza a separação de minerais por tamanho e reduz a poluição por poeira em processos de descarga, em altos fornos, para otimizar a combustão, reduzir a formação de incrustações e controlar a qualidade dos produtos, na produção de metais, simulando outros processos além da fundição, como o refino e a solidificação. A técnica similarmente é utilizada em processos de eletrometalurgia, como a produção de alumínio, para simular o comportamento de plasmas e otimizar a eficiência energética (Johansen, 1997).

Embora a integração do CFD na metalurgia tenha apresentado grandes avanços, é importante ressaltar que o mesmo enfrenta desafios igualmente significativos. A complexidade inerente aos processos metalúrgicos, caracterizados por escoamentos multifásicos, transferência de calor e massa, reações químicas e transformações de fase, exige modelos numéricos sofisticados e recursos computacionais robustos. A modelagem precisa da turbulência, presente em muitos processos, também representa um desafio, com os modelos atuais apresentando limitações em sua captura.

Apesar do processo de fundição se beneficiar das técnicas de CFD, suas análises muitas vezes são simplificadas. A transferência de calor do processo precisa ser modelada juntamente com as reações químicas que ocorrem no banho de metal e o escoamento do metal líquido. A precisão da modelagem é essencial para prever a qualidade do produto, mas a complexidade física envolvida torna esta uma dura tarefa (Jianping Zhang; Plikas, 2017).

Além disso, os materiais metalúrgicos muitas vezes apresentam propriedades termofísicas que variam com a temperatura e a composição, complicando ainda mais a modelagem. A necessidade de representar essas variações em modelos CFD de forma precisa é uma dificuldade, exigindo tanto o desenvolvimento de modelos quanto a validação extensiva com dados experimentais (Li *et al.*, 2011).

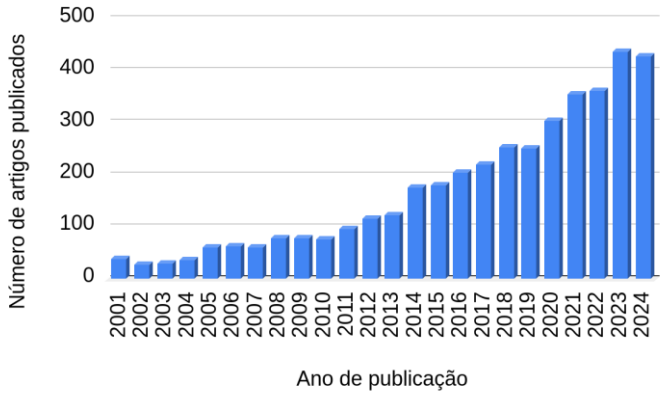
No geral, a análise numérica por CFD detalhadas exigem grande poder computacional e tempo de processamento, o que pode ser um limitante em ambientes industriais que demandam decisões rápidas. As restrições de hardware podem impedir simulações em escala real, comprometendo a precisão dos resultados. O avanço tecnológico e a otimização de algoritmos são essenciais para superar essas barreiras (Zhu, 1998; Chattopadhyay; Isac; Guthrie, 2010).

Um ponto importante em CFD é a validação dos modelos, pois é fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados das simulações. No entanto, a obtenção de dados experimentais precisos em processos metalúrgicos é desafiadora devido às condições extremas a que estão sujeitos. A integração desses dados com os modelos CFD é complexa, exigindo um profundo conhecimento tanto dos métodos experimentais quanto das técnicas de simulação, especialmente considerando as diferenças nas escalas temporais e espaciais. O desenvolvimento de métodos robustos para essa

integração é crucial para melhorar a precisão e a aplicabilidade dos modelos (Chattopadhyay; Guthrie, 2014; Jianping Zhang; Plikas, 2017).

Apesar dessas adversidades, o campo da CFD na metalurgia tem demonstrado um crescimento contínuo, impulsionado pelos avanços tecnológicos, como o barateamento e aumento da capacidade computacional, e pela compreensão cada vez mais aprofundada dos fenômenos metalúrgicos. Essa tendência é corroborada pelos dados da *Science Direct*, apresentados na Figura 4, que revelam um aumento significativo, em torno de 9 vezes, no número de publicações sobre o tema dada a escala temporal pesquisada.

Figura 4 - Número de publicações de artigos relacionados ao tema “CFD in metallurgy” ao longo dos anos.



Fonte: Autores.

Observa-se desta forma, que a aplicação de CFD na metalurgia tem um futuro promissor, com potencial para revolucionar a indústria. Para maximizar esse potencial, alguns autores como Johansen (1997), Chattopadhyay *et al.*, (2010), Zhu (1998) recomendam se concentrar nas áreas:

- **Modelos multifásicos avançados:** Simulação mais precisa de interações complexas entre diferentes fases.
- **Simulações acopladas:** Integração da CFD com outras ferramentas de simulação para uma compreensão mais abrangente e precisa dos processos.
- **Aprendizado de máquina:** Criação de modelos mais precisos e eficientes através de algoritmos de ML, permitindo a identificação de padrões complexos e a predição de falhas.
- **Sustentabilidade:** Otimização de processos para reduzir o impacto ambiental e aumentar a eficiência energética.
- **Simulação em tempo real:** Monitoramento e controle mais eficientes dos processos metalúrgicos, permitindo ajustes imediatos e otimização da produção.

Destacam-se também outras áreas como o desenvolvimento de novos modelos e algoritmos para simulação de fenômenos físicos complexos, como a modelagem de nanoescala e microescala e/ou a melhoria dos modelos de turbulência e das reações químicas (Jianping Zhang; Plikas, 2017).

Em suma, a CFD continuará a ser uma ferramenta indispensável para a indústria metalúrgica, oferecendo novas oportunidades para inovação e eficiência. A pesquisa contínua e o desenvolvimento de novas técnicas e tecnologias serão essenciais para superar os desafios existentes e maximizar os benefícios do uso de CFD aplicado à metalurgia.

Conclusão

A integração da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) em processos metalúrgicos inaugurou uma nova era de precisão, eficiência e inovação. Ao fornecer insights detalhados sobre fenômenos complexos de fluxo de fluidos, transferência de calor e transporte de massa, a CFD se tornou uma ferramenta indispensável para otimizar operações, reduzir custos e melhorar a qualidade do produto. Para o futuro, a integração do CFD com inteligência artificial e aprendizado de máquina permitirá a criação de sistemas inteligentes capazes de prever o comportamento do material e otimizar os

parâmetros do processo em tempo real. Esses avanços não apenas incorrerão em substanciais inovações, mas também contribuirão para uma cadeia de suprimentos mais sustentável e resiliente.

Referências

BELOGLAZOV, I. I.; KUSKOVA, Y. V. Simulation of Roasting Metallurgical Concentrates in Fluidized Bed Using CFD-DEM. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 221, n. 1, p. 012017, 2017.

CHATTOPADHYAY, K.; GUTHRIE, R. I. L. Chapter 4.3 - Computational Fluid Mechanics. *In*: SEETHARAMAN, S. (org.). **Treatise on Process Metallurgy**. Boston: Elsevier, 2014. p. 453–496. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080969848000094. Acesso em: 6 ago. 2024.

CHATTOPADHYAY, K.; ISAC, M.; GUTHRIE, R. I. L. Applications of Computational Fluid Dynamics (CFD) in iron- and steelmaking. **Ironmaking & Steelmaking**, [*s. l.*], v. 37, n. 8, p. 554–561, 2010.

COTTRELL, A. **An introduction to metallurgy**. [*S. l.*]: CRC Press, 2019.

FORTUNA, A. D. O. **Técnicas Computacionais Para Dinâmica dos Fluidos. Conceitos Básicos e Aplicações**. 2ª ediçãoed. São Paulo, SP: EDUSP, 2020.

GHOSH, A.; CHATTERJEE, A. **Iron Making And Steelmaking: Theory And Practice**. [*S. l.*]: PHI Learning Pvt. Ltd., 2008.

HAN, S.-W. *et al.* Coupled simulation of thermal-metallurgical-mechanical behavior in laser keyhole welding of AH36 steel. **Materials & Design**, [*s. l.*], v. 212, p. 110275, 2021.

JIANPING ZHANG, W. J.; PLIKAS, T. Application of computational fluid dynamics for solving ventilation problems in metallurgical industrial processes. **International Journal of Ventilation**, [*s. l.*], v. 16, n. 3, p. 200–212, 2017.

JOHANSEN, S. Applications of computational fluid dynamics in optimisation and design of metallurgical processes. **Modeling, Identification and Control**, [*s. l.*], v. 18, 1997.

LI, L.-B. *et al.* Application of CFD numerical simulation technology in metallurgy. **Gangtie Yanjiu Xuebao/Journal of Iron and Steel Research**, [*s. l.*], v. 23, n. 12, 2011.

SARTIM, R. *et al.* SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DOS GASES DE EXAUSTÃO DOS SISTEMAS DE DESPOEIRAMENTO PRIMÁRIO DOS CONVERTEDORES BOF DA ARCELORMITTAL TUBARÃO. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, [*s. l.*], v. 9, n. 2, p. 148–154, 2012.

VERHOEVEN, J. D. **Steel metallurgy for the non-metallurgist**. [*S. l.*]: ASM International, 2007.

ZAWAWI, M. H. *et al.* A review: Fundamentals of computational fluid dynamics (CFD). **AIP Conference Proceedings**, [*s. l.*], v. 2030, n. 1, p. 020252, 2018.

ZHU, M. Status and application of computational fluid dynamics in process metallurgy. [*s. l.*], v. 33, p. 29–32, 1998.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do IFES - Campus Cachoeiro de Itapemirim junto ao trabalho.