

# INOVAÇÕES A PARTIR DO USO DE SOLUÇÕES COMPUTACIONAIS: UMA VISÃO GERAL FOCADA NA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO\*

Luiz Gustavo Franco Amaral<sup>1</sup>

## Resumo

As recentes tragédias que ocorreram em território brasileiro tiveram impacto maior do que o apresentado nos grandes jornais e levou toda uma indústria a questionar a tecnologia e técnicas que eram até então praticadas no ramo de mineração. Com isso, existe a perspectiva de novos projetos e inovações nos mais variados ramos da engenharia. A presente publicação apresenta tecnologias de âmbito computacional para apoio na tomada de decisões de projetos de engenharia voltados ao setor de mineração e tem como objetivo a exploração dos benefícios obtidos a partir do uso de tecnologias atuais no segmento. Trabalhos recentes são referenciados com o intuito de propagar não só a metodologia empregada nestas pesquisas, como também proporcionar ao leitor o panorama geral da indústria e das empresas que investem em tecnologia para apoiar sua tomada de decisões nos mais diferentes projetos e principalmente os resultados e ganhos aos produtos e processos obtidos por conta dessa prática.

**Palavras-chave:** CAE; FEA; CFD; DEM.

## INNOVATIONS FROM THE USE OF COMPUTATIONAL SOLUTIONS: AN OVERVIEW FOCUSED IN THE MINING INDUSTRY

### Abstract

The recent tragedies that occurred in Brazilian territory had a greater impact than that presented in the major newspapers and led an entire industry to question the technology and techniques that were previously practiced in the mining industry. With this, there is the prospect of new projects and innovations in the most varied branches of engineering. This publication presents computational technologies to support the decision making of engineering projects aimed at the mining sector and explores the benefits obtained from the use of current technologies in the mining sector. Recent works are referenced in order to propagate not only the methodology employed in these researches, but also to provide the reader with an overview of the industry and companies that invest in technology to support their decision making in the most diverse projects gains on products and processes obtained through this practice.

**Keywords:** CAE; FEA; CFD; DEM.

<sup>1</sup> Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia Aerodinâmica, Business Developer, ESSS – Engineering Simulation and Scientific Software, São Paulo, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O setor de mineração ganhou destaque nos holofotes brasileiros após as recentes tragédias envolvendo barragens, despertando a atenção não só do grande público como também dos principais órgãos reguladores. Como consequência discute-se a revisão de todo o segmento. Deste modo, se faz necessária a readequação às leis e toda a cadeia produtiva deverá reinventar-se e adaptar-se com os padrões exigidos na atualidade de maior especificidade técnica. Com isso, uma necessidade latente passa a ser despertada e as tragédias galgam o papel de divisores de águas pois muitas técnicas empregadas atualmente em território brasileiro seguem padrões antigos e tidos como obsoletos em diversos outros países. Com isso, o setor enfrentará pressão para atualizar-se e um enriquecedor cenário para inovações pode ser consolidado.

O estado da arte do setor contempla o uso dos mais avançados recursos computacionais para a predição de fenômenos e apoiar a tomada de decisões técnicas dos projetos. Dentre as diversas tecnologias que podem beneficiar esta indústria como um todo, destacam-se o método dos elementos finitos, junto do método de volumes finitos e do método de elementos discretos. Esta publicação tem o objetivo de explorar possibilidades obtidas a partir do uso destes recursos evidenciando os ganhos que este mercado pode obter com a adoção da tecnologia CAE – *Computer Aided Engineering* / Engenharia Assistida por Computador– proporcionando melhor rentabilidade, qualidade e segurança em seus projetos.

## 2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos é uma abordagem de resolução de equações diferenciais parciais que constituem a base de diferentes áreas, como mecânica dos sólidos, troca de calor, fluidodinâmica e análise eletromagnética. Atualmente a tecnologia é conhecida principalmente nos âmbitos de análise estrutural e eletromagnetismo. A abordagem mecânica possibilita a obtenção de tensões e deformações às quais uma estrutura mecânica está sujeita quando submetida a determinado carregamento.

### 2.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO

Datado a partir do início da década de 40, conforme apresentado por Courant [1], o método de elementos finitos foi criado com o intuito de possibilitar a resolução de problemas de análise estrutural com grande nível de dificuldade, que até então era um impeditivo para projetos de alta complexidade. O método se constitui a partir da adaptação de um problema físico em um modelo matemático, que receberá hipóteses simplificadoras e respeitará as leis estabelecidas na mecânica dos sólidos. Como exemplo, segue a Figura 1.

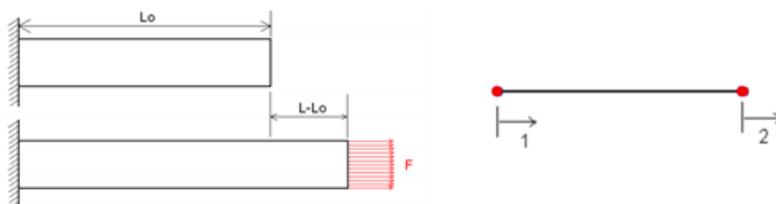


Figura 1. Modelo físico vs (*versus*) modelo discreto.

Para o problema definido, as equações comuns à mecânica dos sólidos serão resolvidas a partir de uma etapa chamada discretização, em que um modelo discreto será estabelecido para a resolução das equações abaixo listadas. Neste modelo

discreto, as definições das condições de operação do problema podem ser estabelecidas e utilizadas em ferramentas computacionais para a obtenção de resultados após o cálculo das Equações 1 e 2.

$$K_s = \sum_{i=1}^N K_e \quad (1).$$

$$[K_s]\{u\} = [F] \quad (2).$$

*Finite Element Analysis* (FEA), conhecida em português como Análise de Elementos Finitos, é a área da engenharia que determina a partir de um domínio discreto com definição de propriedades de material, geometria do dispositivo e carregamentos e apoios, qual será o nível de sollicitação mecânica desta geometria quando em operação e possibilita a compreensão de tensões e deformações envolvidos.

## 2.2 O USO DA TÉCNICA FEA EM MINERAÇÃO

No âmbito de simulação estrutural, muitos equipamentos são projetados a partir da tecnologia por conta da agilidade e versatilidade quando usada principalmente nas etapas preliminares de desenvolvimento de um novo conceito. Seu uso permite que diferentes projetos sejam criados para rápida análise e comparação de resultados, sendo empregada em diversos setores distintos.

## 2.3 EQUIPAMENTOS PESADOS

O setor de mineração possuiu uma particularidade quando comparado com demais indústrias: as massas e quantidades envolvidas no processo são de grandes proporções, exigindo que os equipamentos utilizados no processo sejam “enormes” por natureza. Neste segmento de máquinas pesadas, é comum se deparar com grandes caminhões capazes de transportar centenas de toneladas. Neste sentido, projetos especiais são mandatórios junto de avançado planejamento. Assim, existe o desafio da engenharia de projetar equipamentos cada vez mais leves, porém que sejam capazes de transportar ainda mais carga, em menos tempo e com menos paradas para manutenção. Por conta disto, companhias de peso contemplam o objetivo de realizar simulações para dispensar o uso de protótipos físicos, extremamente custosos, para projetos preliminares ainda durante as etapas de *design*, como apresentado por Pokras [2]. A Figura 2 ilustra diferentes aplicações comuns a equipamentos pesados.

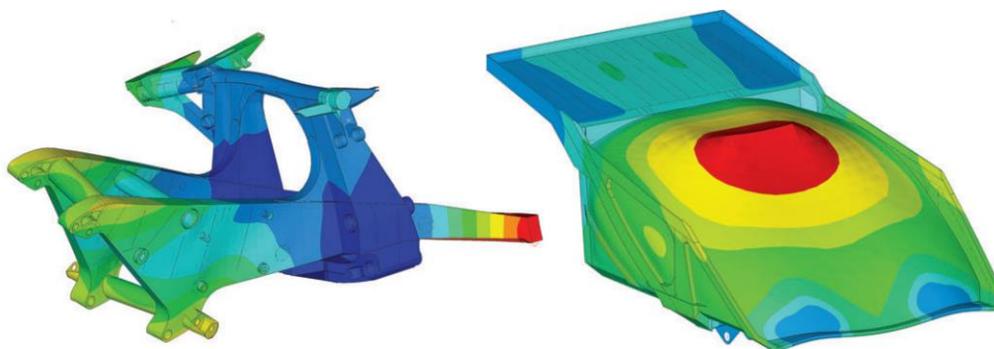


Figura 2. Chassi de caminhão (esquerda) e caçamba (direita) sob grandes cargas [2].

## 2.4 ESTUDOS DE FADIGA E MECÂNICA DA FRATURA

O carregamento alternado e variável, muito comum em diversos equipamentos de mineradoras como escavadeiras, perfuratrizes e carregadeiras, é um mecanismo associado ao fenômeno de fadiga no qual a falha mecânica pode ser caracterizada por trincas ou até mesmo ruptura completa do equipamento após determinado número de ciclos cuja intensidade da carga não oferece riscos ao se contrastar o nível de tensão resultante da operação com os limites admissíveis do material e geometria.

Assim, muitos estabelecem que a fadiga é o principal fenômeno de falha mecânica e grande atenção é dedicada ao fenômeno com o objetivo de mitigar seu impacto. A partir da Figura 3 demonstra-se um estudo computacional de uma escavadeira de mineração.

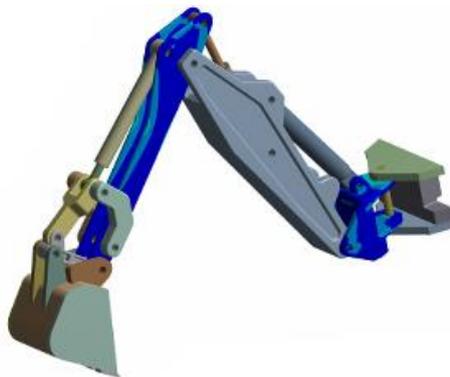


Figura 3. Análise numérica em uma escavadeira [3].

## 2.5 MECÂNICA DA FRATURA, SOLDAS, VIBRAÇÕES, ENTRE OUTROS

De forma análoga, a análise estrutural fornece grande versatilidade para o estudo de fenômenos e processos distintos muito comuns à indústria e possibilita maior compreensão e prevenção contra desvios. Conforme a Figura 4, uma análise comum de soldas.

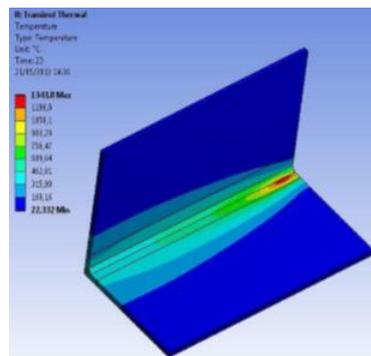


Figura 4. Análise do processo de soldagem, de pesquisa feita por Vetturazzi et al [4].

## 2.6 OTIMIZAÇÃO DE RECURSOS

Especialistas no segmento utilizam simulação para reduzir de forma significativa o tempo dispendido pela equipe no desenvolvimento de um novo projeto. Em uma pesquisa em parceria com a ESSS, a Vale apresenta como grande diferencial dos equipamentos deste setor seu grande porte, de modo que a fabricação de um único protótipo pode custar milhões [5]. Enquanto que o uso de um laboratório virtual possibilita diversas alterações de projeto com baixos custos, viabilizando atualizações nos equipamentos com grandes margens de retorno de

investimento. A Figura 5 apresenta uma grelha de aço de alta resistência que tirou grande proveito do recurso em seu desenvolvimento.

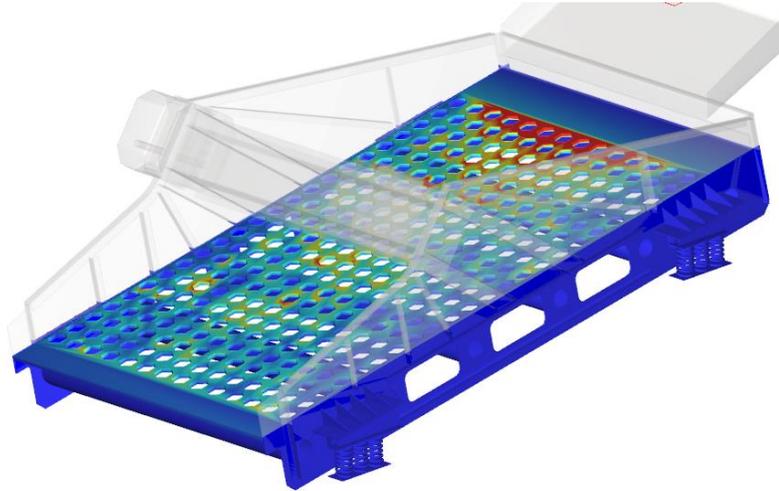


Figura 5. Grelha de aço de Alta resistência [6].

### 3 MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

O método dos volumes finitos é um método de resolução das equações governantes do escoamento na forma de equações parciais diferenciais. Sua aplicação ocorre nos mais diversos segmentos, como no setor aeroespacial, automotivo, biomédico, energético, processos químicos, componentes eletrônicos entre outros, e pode ser utilizado em todas as etapas do processo de engenharia, desde o conceito e projeto de novos produtos até a fase de otimização, tratamento de falhas e reprojetos.

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO

Com o intuito de descrever brevemente os conceitos fundamentais deste método, utiliza-se o volume de controle na Figura 6, originalmente apresentado por Versteeg e Malalasekera [7].

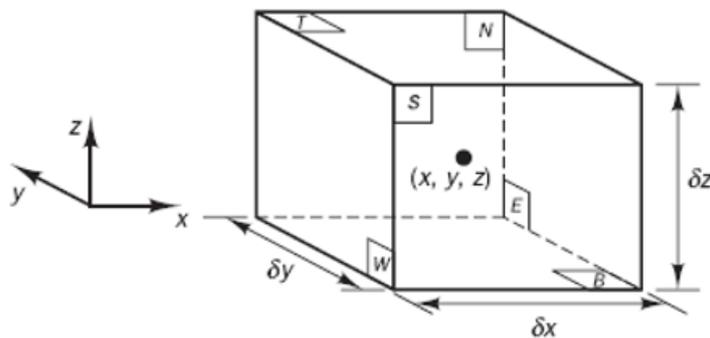


Figura 6 - Volume de controle infinitesimal [7].

O balanço pode ser realizado neste volume aplicando-se a equação geral do transporte, na qual são contempladas a conservação de massa, quantidade de movimento das três dimensões e energia.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi v \cdot dA = \oint_A \Gamma_\phi \nabla_\phi \cdot dA + \int_V S_\phi dV \quad (3).$$

A partir de uma etapa chamada discretização, um modelo discreto será estabelecido para a resolução da equação geral do transporte acima listada. Neste modelo discreto, as definições das condições de operação do problema podem ser estabelecidas e utilizadas em ferramentas CFD para a obtenção de resultados.

*Computational Fluid Dynamics*, conhecida em português como Dinâmica dos Fluidos Computacional, é a área da engenharia que determina através de soluções numéricas aproximadas as equações gerais da mecânica dos fluidos (continuidade, quantidade de movimento e energia). O desenvolvimento inicial dessa técnica data da década de 1960, como apresentado por Runchal [8], que varreu a trajetória acadêmica de Brian Spalding, o criador do método. Esta técnica utiliza a teoria de transporte, transferência de calor, reações químicas e demais fenômenos fluidodinâmicos para auxiliar a indústria na pesquisa e desenvolvimento de projetos.

### 3.2 O USO DA TÉCNICA CFD EM MINERAÇÃO

No âmbito de simulação fluidodinâmica, diversos aspectos distintos podem ser analisados para a prevenção de fenômenos, mitigar riscos ou assegurar a devida qualidade ambiental de modo a reduzir a insalubridade a profissionais que adentrem nas minas. A seguir, alguns exemplos de aplicações atuais desempenhadas pelo setor.

### 3.3 VENTILAÇÃO DE MINAS

A ventilação forçada no interior de minas pode ser realizada com o intuito de fornecer o fluxo de ar necessário para o interior da mina para diluição de gases nocivos e controle térmico. Conforme Figura 7, fabricantes de sistemas de ventilação utilizam a técnica para prever e melhor dimensionar perda de carga do sistema, minimizar turbulências indesejadas que resultam em vibrações ou ruídos excessivos. Também se torna possível as alterações dos protótipos virtuais com o objetivo de otimizar o equipamento.

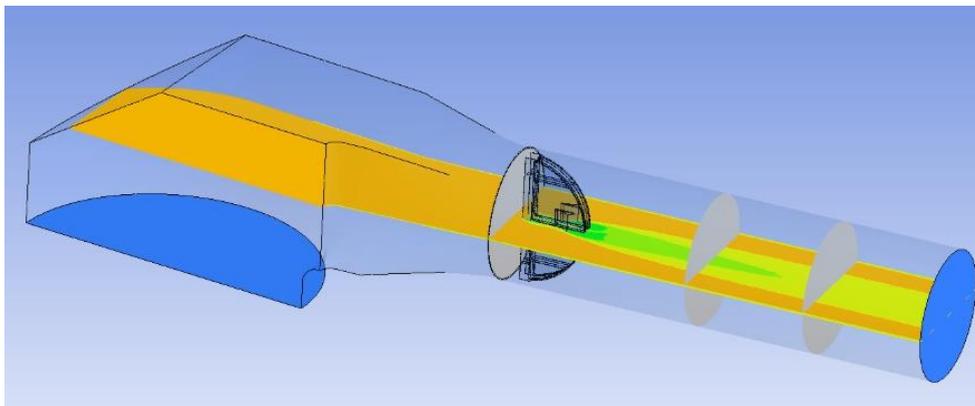


Figura 7. Sistema de ventilação comum de minas.

### 3.4 DISPERSÃO DE GASES

Estendendo o assunto de ventilação, controlar a dispersão de gases insalubres e poeira no interior de minas é um dos papéis mais críticos para assegurar a qualidade de trabalho dos mineradores. Além dos riscos aos trabalhadores, zonas com grande concentração de gases como o metano ainda são propícias a explosões e oferecem grande risco à operação como um todo. Para entender comportamentos do escoamento e de poeira, a modelagem numérica a partir do uso de CFD se tornou uma etapa mandatória, como apresenta Ren e Wag [9], para prestar apoio a

experimentos e testes em campo, atuando como uma poderosa ferramenta de predição de fenômenos.

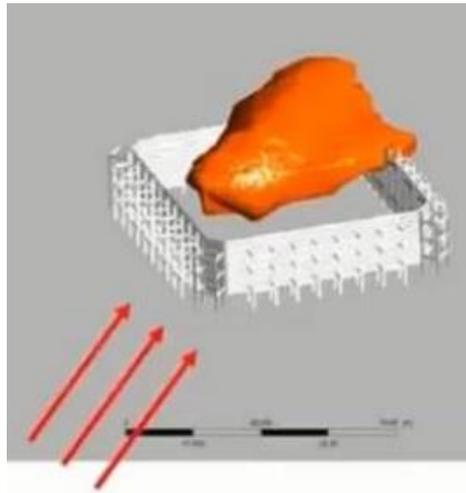


Figura 8. Exemplo de dispersão de gases submetida a escoamento forçado.

### 3.5 COMBUSTÃO E PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIO

Grande atenção é dedicada a análises de combustão e propagação de incêndios pois é comum o surgimento de bolsões de gases inflamáveis no interior de minas, como o gás metano. Além de representarem grande risco aos mineradores, a possibilidade de incêndios pode comprometer equipamentos e o processo produtivo.

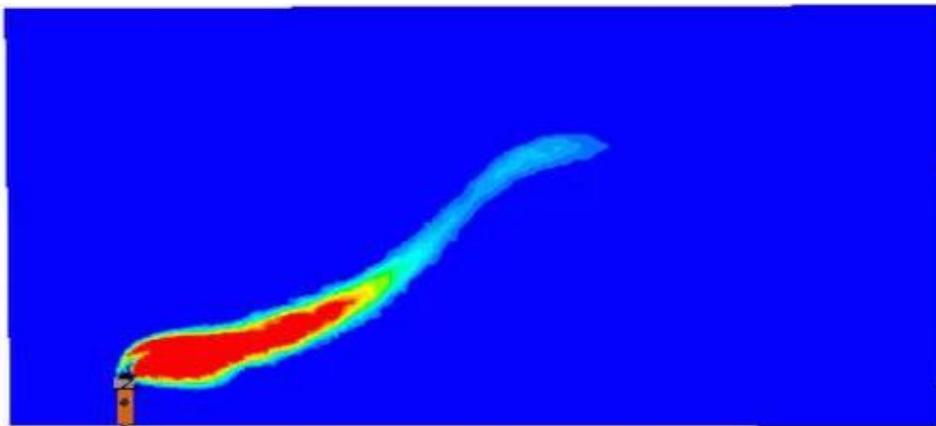


Figura 9. Propagação de chama após início do fenômeno de combustão.

### 3.6 SEPARAÇÃO DE REJEITOS

Na mineração uma etapa de grande importância ao processo é a separação sólido líquido, que tem o objetivo de separar o fluido conhecido como polpa (mistura de água, material particulado e demais rejeitos) para que estes materiais sejam encaminhados aos respectivos processos. O processo é realizado em um equipamento, normalmente de grandes dimensões, conhecido como Espessador. Estudos em Espessadores são realizados para melhorar a homogeneidade da separação e aprimorar a eficiência do processo, resultando em menor quantidade de espuma bem como redução de zonas mortas de escoamento. Como o consumo energético deste equipamento, segundo Marcos Lopes, pode chegar próximo de 40% [10] do total gasto em todo o beneficiamento mineral, a otimização do equipamento é uma preocupação constante das mineradoras.

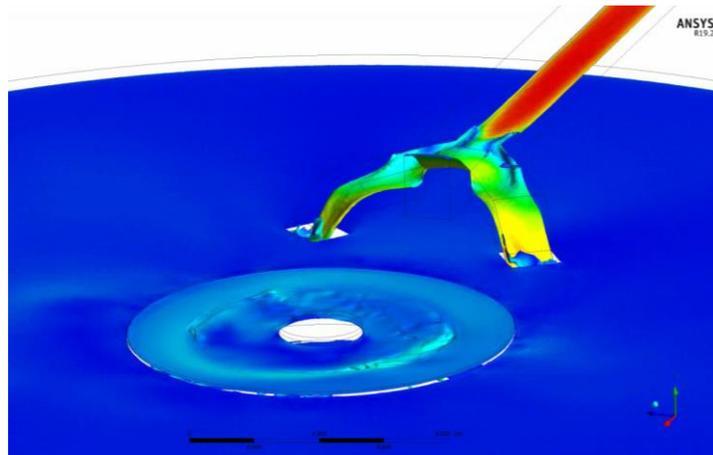


Figura 10. Espessador de rejeitos.

## 4 MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

O método dos elementos discretos é uma abordagem de resolução para partículas que modela a movimentação e rotação de cada partícula de modo individual e possibilita a interação destas partículas. É um método útil na predição de condições de operação de equipamentos e análise do escoamento de material granulado, comumente observados em indústrias como a de mineração, agrícola, farmacêutica, química e alimentícia.

### 4.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO

O método dos elementos discretos surgiu no final da década de 60, em paralelo ao advento do método dos volumes finitos, e foi desenvolvido num primeiro momento para resolução de problemas envolvendo rochas. Ao final do século XX o conceito já havia sido expandido e passou a ser empregado para abordar maior gama de aplicações. A ferramenta permite o deslocamento, rotação e desprendimento de corpos discretos finitos, reconhecendo o contato destes corpos. Williams apresenta que diferente dos métodos previamente abordados, DEM (*Discrete Element Method*) não é um método contínuo, ou seja, cada partícula é tratada de modo individual para as quais as equações governantes do método são calculadas [11].

Os fundamentos de DEM baseiam-se na resolução de duas equações fundamentais nas quais o movimento de cada partícula é descrito pelas leis de movimento de Newton descritas abaixo.

$$\sum \vec{F}_i = \vec{F}_{Body,i} + \vec{F}_{Surface,i} = m_i \frac{d}{dt} \vec{v}_i \quad (4).$$

$$\sum \vec{M}_i = \vec{M}_{Body,i} + \vec{M}_{Surface,i} = \vec{I}_i \cdot \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} + \vec{\omega}_i * (\vec{I}_i \cdot \vec{\omega}_i) \quad (5).$$

Essencialmente uma partícula pode apresentar movimentos de translação e/ou rotação, além da inerente interação que partículas apresentam umas com as outras e com geometrias ao longo da análise. A complexidade deste tipo de estudo, que normalmente considera em sua resolução um grande número de partículas (atualmente são comuns estudos com milhões de partículas), se beneficia do alto recurso computacional existente, de modo que o processamento em paralelo é peça fundamental para a resolução de problemas reais e com alto nível de complexidade.

Ferramentas modernas tiram proveito da tecnologia GPU para acelerar a velocidade de cálculo e consequentemente reduzir o tempo de resposta destes estudos.

#### 4.2 O USO DA TÉCNICA DEM EM MINERAÇÃO

No âmbito de simulação de elementos discretos é comum o estudo de equipamentos para identificação de carregamentos e cargas oriundas do escoamento do material particulado, bem como a predição de fenômenos como corrosão, abrasão, entupimento de linhas e uniformização de distribuição. Abaixo, seguem alguns exemplos de aplicação atuais desempenhadas pelo setor.

#### 4.3 ANÁLISE DE QUEBRA DE PARTÍCULADO

Estudos em moinhos e britadores são muito comuns devido ao alto custo de operação destes dispositivos, por conta de seu consumo energético e frequência de manutenção. Com o objetivo de aprimorar a eficiência destes equipamentos diversas variáveis necessitam ser analisadas, como as propriedades das rochas envolvidas, velocidade de operação, nível de ocupação entre outros. A justificativa para este tipo de investigação se dá por conta da economia expressiva que pode ser obtida a partir de pequenos aprimoramentos. A tecnologia possibilita melhor compreensão do resultado do processo, predição de potência consumida e versatilidade para testar projetos diferentes e avaliar o impacto destas modificações.

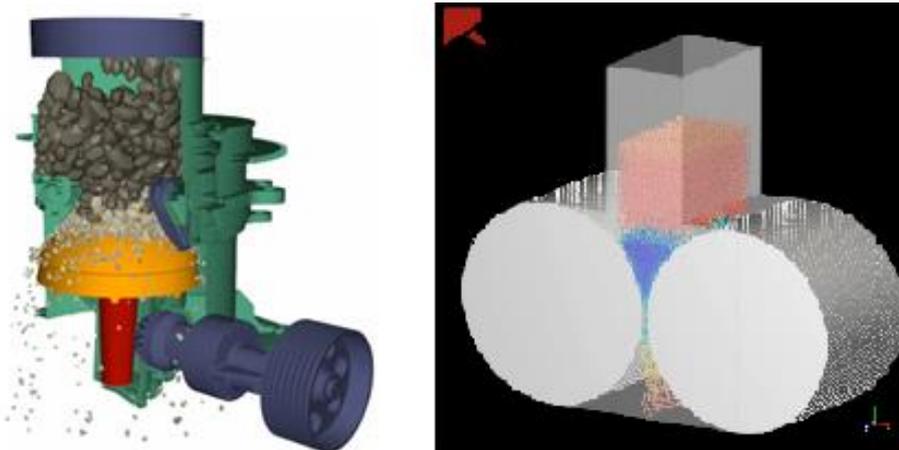


Figura 11. Simulação de britadores em operação.

#### 4.4 PREDIÇÃO DE EFICIÊNCIA DE TRANSPORTE

Outro assunto de extrema importância, que se não tratado com a devida atenção pode ser tornar um gargalo para todo o processo, é o transporte de minerais. Chutes, peneiras vibratórias, misturadores e elevadores de canecos frequentemente são revisitados por equipes de processo e projeto para aprimorar o fluxo de material e assegurar maior vazão, ao mesmo tempo em que a eficiência do transporte também deve ser alta. A partir de estudos de elementos discretos torna-se possível a mensuração de vazão, distribuição de particulado entre outros dados de zonas de interesse, possibilitando assim a análise da eficiência do produto. Com o uso de protótipos virtuais pode-se prever o impacto de modificações geométricas para o processo e o impacto econômico de cada alteração.

Uma questão também analisada neste âmbito é a eficiência de transporte de um equipamento novo vs um equipamento usado, para auxiliar engenheiros a elaborar projetos mais robustos e com manutenções preventivas melhor definidas.

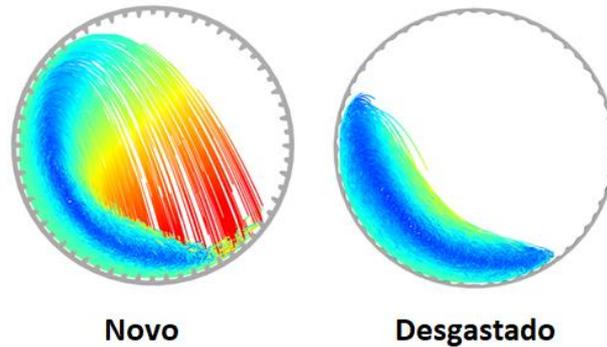


Figura 12. Fluxo de particulado de equipamento novo vs antigo (desgastado).

#### 4.5 DESGASTES ORIUNDOS DO TRANSPORTE E MANUSEIO

Conforme mostrado anteriormente, produtos novos (e ideais, conforme o projeto) tendem a apresentar dados de operação muito distintos de máquinas antigas. Isso ocorre por conta de desgastes naturais sofridos pelos equipamentos durante seu uso. A severidade de trabalhar com minerais exerce grande impacto em todos os equipamentos da cadeia e proporcionam diversos desafios às mineradoras, desde técnicas para maximizar o uso do maquinário e diminuir a incidência de paradas para manutenção preventiva até investigações de novos materiais e ligas que maximizariam a resistência à erosão e abrasão.

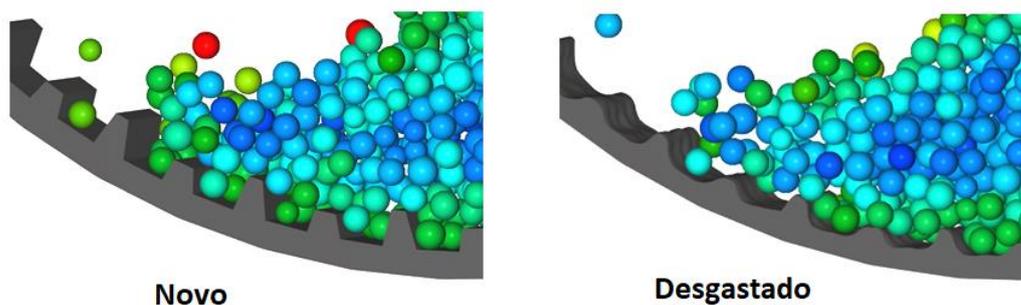


Figura 13. Comparativo de equipamento ideal vs desgastado.

### 5 ACOPLAMENTO DE METODOLOGIAS

Retornando a um assunto já citado nesta publicação, o estado da arte de técnicas computacionais para geração de valor no setor de mineração utiliza todas as análises previamente demonstradas para aprimorar equipamentos-chave no processo. É importante que não se assuma a ideia de que estes estudos são independentes e não comunicáveis, pois o atual poder de processamento possibilita os chamados estudos multifísicos, nos quais estas tecnologias podem operar em conjunto de modo a aumentar o nível de fidelidade da simulação a ser realizada.

Um exemplo de aplicação pode ser vista abaixo, no qual se utilizou o método dos elementos discretos para compreensão das cargas envolvidas durante a operação de uma peneira vibratória. Os dados então levantados são utilizados em uma análise de mecânica estrutural para prever a resposta do equipamento a este carregamento em específico, possibilitando que análises como fadiga, mecânica da fratura e vibrações sejam realizadas em conjunto para maior acuracidade da análise. O mesmo tipo de estudo é realizado para caminhões; para prever os esforços envolvendo distribuição de cargas durante o abastecimento, transporte e desabastecimento; bem como pode ser realizado em todos os aparatos explorados

neste documento para predição de vida, coeficientes de segurança, resistência entre outros.

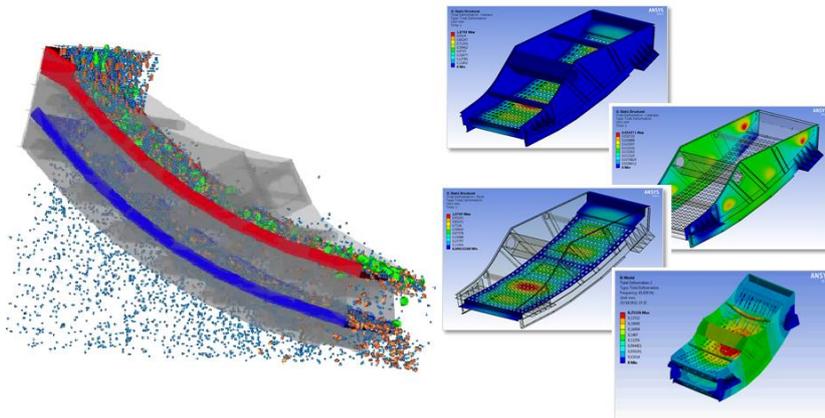


Figura 14. Análise de peneira vibratória com acoplamento DEM-FEA.

O mesmo recurso pode ser visto também sob a ótica de fluidos para avaliar o impacto da presença do meio fluido no processo. Pesquisadores exploram as possibilidades deste tipo de aplicação para análises térmicas ou transporte de material particulado quando submerso em determinado fluido. Estudos recentes, como o de Gruble [12], se apoiaram nesta possibilidade para encontrar soluções em operações de equipamentos pesados, como o trabalho que avaliou e propôs melhorias para o manuseio de cargas que liberam grande quantidade de poeira, prejudicial tanto para mineradores quanto a questões ambientais.

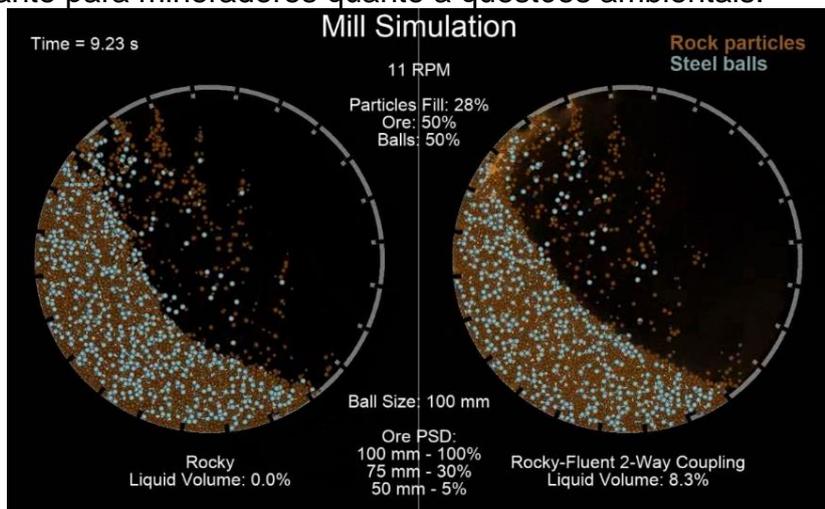


Figura 15. Análise de moinho com acoplamento CFD-DEM.

## 6 CONCLUSÕES

Este artigo demonstrou o papel chave que métodos numéricos estabelecem no processo de mineração, servindo como ponto de apoio de engenheiros para revisão de projetos existentes, otimização de novos projetos e ferramenta de apoio para a tomada de decisão de problemas reais enfrentados em campo.

Em tempos nos quais o poder de processamento deixou de ser um limitante, seja pela popularização de *clusters* de alto desempenho, tecnologia GPU ou a possibilidade de realizar cálculos de engenharia pela nuvem, profissionais contam com a tecnologia CAE como um instrumento de inovação que possibilita que barreiras estabelecidas outrora sejam quebradas e que projetos mais baratos, robustos e eficientes sejam obtidos. Como consequência, a popularização da

tecnologia CAE possibilita que estudos avançados deixem de ser exclusivos de institutos de pesquisa de alto nível tecnológico e permite que essa ferramenta esteja à disposição de profissionais da indústria quando no campo, para apoiá-los em suas decisões do cotidiano.

Espera-se que este compilado de aplicações que podem ser exploradas com técnicas de simulação sejam úteis para apresentar a grande versatilidade e previsibilidade fornecidos pelas ferramentas para o aumento de geração de valor do negócio. O atual momento no qual o mercado de mineração se encontra em é precursor para diversas inovações importantes no segmento que não ficarão restritas apenas aos grandes *players*, mas também para toda a indústria de base que fornece para este setor. As ferramentas computacionais terão papel fundamental para esta revolução tecnológica e possibilitam a reinvenção e inovação do setor para acompanhar as novas exigências técnico-sociais que podem ser contempladas no horizonte. O mercado que não se reinventa fica para trás e certamente, a indústria de mineração passará em breve por um período muito aquecido com novidades e bastante trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 Courant, R. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. Bulletin of the American Mathematical Society. 49. 1943.
- 2 Pokras, V. Designing Gigants for Tough Work. ANSYS Advantage, 2009.
- 3 ANSYS Product Page; [Acesso em 15/05/2019] <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical-premium/mechanical-premium-capabilities>
- 4 Vetturazzi, R., Boniati, D. L., Acosta, V. H. V. Distorções em estrutural Soldadas: Avaliação Comparativa entre o método de Elementos Finitos e a Análise Real. ESSS Technical Article, Caxias do Sul.
- 5 Soluções ANSYS e Rocky DEM geram economia para a Vale. ESSS estudo de caso. 2016
- 6 Folha de São Paulo. São Paulo; [Acesso em 20/05/2019] <https://www1.folha.uol.com.br /mercado/ 2014/11/1551200-vale-recebe-premio-da-industria-sueca-de-aco.shtml>
- 7 VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An introduction to computational fluid dynamics. 2nd ed. Harlow: Pearson Education 2007
- 8 RUNCHAL, A. K., Brian Spalding: CFD and reality: a personal recollection. International Journal of Heat and Mass Transfer, v.52, p.4063-4073, 2009,
- 9 Ren, T., Wag, Z. CFD Modelling of Ventilation, Dust and Gas Flow Dispersion Patterns on a longwall face. Proceedings of the 11th International Mine Ventilation Congress, Science press beijing 2018.
- 10 Técnico de Mineração. Cricipuma. SC; [Acesso em 10/05/2019] <https://tecnicoeminerao.com.br/separacao-solido-liquido-tipos-de-espessadores/>
- 11 Williams, J. R., Hocking, G., Mustoe, G. G. W. The Theoretical Basis of the Discrete Element Method. Numerical Methods of Engineering, Theory and Applications. January 1985..
- 12 Grübler, C., Kessler, F., Prenner, M. Analyses of Dust Emission in Bulk Material Handling Apparatuses by DEM-CFD: Basics, Approaches & Prospects. Powder, Granule and Bulk Solids: Innovations and Applications conference, 2016