

Desenvolvimento e inovação em mineração e metais

Pedro Paulo Dias Mesquita
Pedro Sérgio Landim de Carvalho
Laura Duarte Ogando*

Resumo

O presente artigo tem o objetivo de investigar oportunidades de desenvolvimento e inovação no setor de mineração e metais, diante dos atuais vetores de mudança econômicos, socioambientais e tecnológicos. Os desafios relacionados à redução das taxas de crescimento chinesas, às políticas de desenvolvimento social e redução de riscos e impacto socioambiental e às tecnologias envolvidas na chamada quarta revolução industrial impõem um ciclo contínuo de desenvolvimento e inovação para diversos setores industriais, entre os quais mineração e metais. Empresas e países de maior tradição tecnológica têm investido e desenvolvido novos produtos e processos promotores de maior eficiência operacional e ambiental em toda a cadeia, concentrados principalmente em três eixos: operações mais sustentáveis, automação e controle e novos materiais. No Brasil, o volume e o histórico de atuação no setor, as riquezas em recursos naturais e a base tecnológica, já existente, devem subsidiar a elaboração e a execução de estratégias competitivas fundamentadas em capacitação e desenvolvimento tecnológico capazes de alavancar a participação de empresas e trabalhadores brasileiros em etapas de maior valor na cadeia.

* Respectivamente, economista, gerente e estagiária de economia do Departamento de Indústria de Base da Área de Insumos Básicos do BNDES.

Introdução

Os setores de mineração e de metais enfrentam atualmente um período de grandes desafios, impostos por movimentos estruturais e conjunturais adversos que deverão promover importantes mudanças na dinâmica do setor, principalmente no que se refere ao desenvolvimento e à adoção de novas tecnologias.

Dentre os principais movimentos estruturais a afetar o setor, destacam-se a agenda de promoção de maior sustentabilidade socioambiental e o desenvolvimento de um conjunto de novas tecnologias capazes de transformar as atividades de mineração e desenvolvimento e produção de metais.

As atividades de mineração e metalurgia são, reconhecidamente, de elevado impacto ambiental. No caso da mineração, o enorme tamanho de algumas operações, a quantidade de carga movimentada e os rejeitos gerados têm representado um risco a diversas regiões e populações, eventualmente afetadas por acidentes e mecanismos ineficientes de deposição e monitoramento. Já a metalurgia é um dos setores mais intensivos em energia e emissões de gases de efeito estufa (GEE), sendo alvo direto das ações de preservação do clima em todo o mundo. Ambos os setores também são grandes consumidores de água, recurso que poderá limitar principalmente a expansão de atividades de mineração em algumas regiões.

Depois de importantes ciclos de alta e investimentos, os setores enfrentam atualmente um dos períodos mais difíceis dos últimos vinte anos, com queda abrupta de preços e redução das margens de rentabilidade de suas operações. Trata-se de movimento determinado pela sobreoferta mundial gerada principalmente pela redução das taxas de crescimento da economia chinesa.

Esse conjunto de fatores impõe desafios e oportunidades para as empresas desses setores, que deverão ser capazes de atender aos requisitos de sustentabilidade impostos e desenvolver operações cada vez mais eficientes, que as posicionem à frente de seus competidores. Nesse contexto, há uma tendência para a elevação do conteúdo tecnológico nesses setores, reconhecidos, tradicionalmente, como de baixa intensidade tecnológica.

As novas tecnologias estão sendo adotadas para otimização, controle e automação de operações e viabilização de novos empreendimentos de

lavra e transformação mineral. Tecnologias de *big data*,¹ impressão 3D e novos materiais têm permitido, também, uma redução expressiva do ciclo de desenvolvimento de novos produtos, impulsionando o desenvolvimento de novas ligas metálicas customizadas em parceria com indústrias consumidoras.

Esses setores vivem atualmente um período importante de mudanças que poderão implicar até a reorganização da estrutura produtiva, com avanço de empresas mais tradicionais na incorporação de tecnologias e capacitação para desenvolvimento e melhoria de processos produtivos, bem como a incorporação de etapas produtivas a jusante, buscando diferenciação e enobrecimento do produto e elevação de margens de retorno. Essas rotas de desenvolvimento já são perseguidas por importantes empresas, que buscam o melhor posicionamento de seus negócios à luz das mudanças em curso. Esse se mostra o caminho a ser seguido pelas empresas que pretendem alcançar posição de liderança em médio e longo prazo nesses mercados.

Cadeias de produção: mineração e transformação mineral

O setor de mineração e transformação mineral engloba os processos de exploração, exploração, beneficiamento e processamento de recursos minerais, os quais são concentrações de minério cujas características fazem com que sua extração possa ser técnica e economicamente viável.

Os bens minerais podem ser divididos em duas grandes categorias, que apresentam subdivisões: os minerais não metálicos e os metálicos.

Os bens minerais não metálicos podem ser subdivididos em: (i) rochas e minerais industriais, podendo-se citar a grafita, a magnesita, a crisotila, o calcário, a areia industrial, a barita, a bentonita e a fluorita, entre outras, cujas aplicações são muito variadas, cobrindo, por exemplo, o uso em abrasivos, na agricultura, na produção de cerâmica, na construção civil, na indústria eletrônica, química, metalúrgica, de papel, pigmentos e plásticos; (ii) rochas ornamentais e de revestimento, como granitos, mármore, ardó-

¹ *Big data* é um termo amplamente utilizado na atualidade, na tecnologia da informação (TI), para nomear conjuntos de dados muito grandes ou complexos, com que os aplicativos de processamento de dados tradicionais ainda não conseguem lidar. Os desafios dessa área incluem: análise, captura, curadoria de dados, pesquisa, compartilhamento, armazenamento, transferência, visualização e informações sobre privacidade dos dados.

sias e quartzitos; (iii) materiais para construção civil, como areia, brita e argila; (iv) os agrominerais, como as rochas fosfáticas e o calcário agrícola; (v) minerais energéticos, como o carvão mineral; (vi) as pedras preciosas e semipreciosas; e (vii) água mineral.

Os bens minerais metálicos podem ser distribuídos em três categorias principais: (i) metais ferrosos, entre os quais se citam o ferro, o nióbio, o manganês e o cromo; (ii) metais não ferrosos, como alumínio, cobalto, cobre, chumbo, estanho, metais do grupo da platina, tálio, tântalo, terras-raras, titânio, vanádio, molibdênio e zinco; e (iii) metais preciosos, como o ouro e a prata.

Neste estudo, a ênfase será em mineração de metálicos e sua transformação mineral, ou seja, a obtenção da fase metálica do mineral.

Mineração

Entende-se por mineração a extração e o beneficiamento de minerais que se encontram em estado natural, incluindo a exploração das minas subterrâneas e de superfície e todas as atividades complementares para preparar e beneficiar minérios em geral, na condição de torná-los comercializáveis, sem provocar alteração, em caráter irreversível, em sua condição primária.

A mineração abrange, portanto, o conjunto de atividades necessárias para a obtenção de um produto mineral bruto, de um concentrado ou de um aglomerado, destacando-se as seguintes: (i) a lavra: extração mineral e transporte interno; e (ii) o beneficiamento, que constitui, basicamente, as etapas de cominuição (britagem e moagem), classificação, concentração e/ou aglomeração. O processo de beneficiamento mineral, inclusive na aglomeração, envolve apenas mudanças físicas no minério.

Transformação mineral

A transformação mineral consiste no conjunto de processos para a obtenção de produto por meio de alteração na natureza química do minério beneficiado, como a obtenção do alumínio primário pela bauxita (minério que contém o alumínio) ou do ferro-gusa pelo óxido de ferro.

Em geral, a transformação de minerais metálicos ferrosos ou não ferrosos parte de um óxido que passará por processo de oxirredução, para a obtenção

do metal primário. Os processos mais utilizados na oxirredução dos metais são a pirometalurgia e a eletrometalurgia (processos eletrolíticos). Esses processos são escolhidos em função das características do metal, incluindo a concentração e a temperatura de fusão do metal de interesse. As etapas de pirometalurgia e de eletrometalurgia podem ser precedidas de processos de oxidação, a exemplo da ustulação,² e de processos hidrometalúrgicos,³ para purificação e concentração do óxido a ser reduzido.

Cabe aqui destacar ainda o uso de biotecnologia nos processos de concentração mineral, como a biolixiviação bacteriana, que também pode ser usada no tratamento de rejeitos, tema que será apresentado adiante.

Para ilustrar a definição de transformação mineral, a seguir são sumariados processos de transformação do mineral do ferro, representando a categoria dos metais ferrosos, e do alumínio, representando os metais não ferrosos.

Ferro – pirometalurgia

A transformação mineral do ferro consiste na redução do minério de ferro, geralmente na forma de um óxido de ferro, originando uma liga metálica de ferro-carbono, por meio do uso de um agente redutor – no caso, o elemento carbono. Observe-se aqui a transformação na natureza química do minério de ferro.

Do processo de redução, obtém-se o chamado ferro primário ou ferro de primeira fusão (liga de ferro e carbono). A obtenção do ferro primário pode ser feita por meio de diversas rotas tecnológicas. A mais comumente utilizada é feita por meio de altos-fornos. A redução do minério de ferro beneficiado (na forma de granulado, de sinter ou de pelota) em altos-fornos é feita com uso do coque de carvão mineral como agente termorredutor, tendo como produto o ferro-gusa, que é transformado em aço. O processo é pirometalúrgico, dado que o agente redutor fornece calor (que chega a cerca de 1.600° C, na base do alto-forno), para o derretimento da carga metálica, para que ocorra a reação química de oxirredução.

² Processo de produção de um metal com base em um minério sulfetado, por meio da passagem de uma corrente de ar em um ambiente muito aquecido. Nessas condições, ocorre uma reação entre o enxofre do minério com o oxigênio do ar, liberando o metal ou produzindo uma forma oxidada que passa por processo posterior de oxirredução.

³ O processo hidrometalúrgico envolve a extração de minerais metálicos, em que a principal etapa de separação do mineral de interesse envolve reações de dissolução do minério em meio aquoso. Nesse processo, utiliza-se, geralmente, o ácido para a dissolução, por meio de uma técnica denominada de *lixiviação ácida*.

Alumínio – eletrometalurgia

Depois do processo de mineração da bauxita e seu beneficiamento, segue-se a etapa de refino para a obtenção da alumina, insumo para a produção do alumínio primário. No processo de produção da alumina, adicionam-se soda cáustica, cal e água à bauxita beneficiada. Essa mistura segue para o processo de cozimento, no qual ocorre a formação de aluminato de sódio (NaAlO_2). Essa etapa é conhecida como processo Bayer. Depois dessa etapa, ocorrem a separação da soda cáustica e a formação do hidróxido de alumínio, que segue para um forno, onde é obtida a alumina (Al_2O_3). Esta é então levada às cubas eletrolíticas, para a etapa de eletrólise.

A eletrólise é um processo de separação dos elementos químicos de um composto, pelo uso da corrente elétrica. Primeiramente, procede-se à decomposição do composto em íons (cátions e ânions). Realizada essa dissociação, com a passagem de uma corrente contínua através desses íons, são obtidos os elementos químicos desejados, no caso, o alumínio com alto grau de pureza. O processo de eletrólise da alumina (Al_2O_3) é uma reação química de oxirredução, ou seja, de retirada do oxigênio do composto.

Em geral, os processos de transformação mineral dos metais – além de serem intensivos em energia – envolvem a oxirredução, resultando na emissão de CO_2 . Isso faz com que a indústria metalúrgica responda pela maior parte das emissões industriais de gases de efeito estufa, o que requer o desenvolvimento e a adoção de novas tecnologias, em relação a essa questão e em relação à eficiência energética.

As indústrias mineral e metalúrgica são importantes fornecedoras de insumos para outras importantes cadeias de produção e, portanto, desempenham papel relevante para a promoção de competitividade e sustentabilidade das indústrias de máquinas e equipamentos, de construção, de transportes e de energia, entre outros.

Desafios e macrotendências

Sobreoferta, redução dos preços de mercado, queda das margens de retorno e maior competição no mercado externo são alguns dos principais desafios que as empresas dos setores de mineração e metais precisam superar, a fim de manterem ou conquistarem posições de liderança em seus mercados.

A baixa no ciclo do mercado de *commodities*, conjugada à agenda de promoção de sustentabilidade socioambiental, cada vez mais relevante para os setores, impulsiona as empresas para a adoção de uma agenda contínua de desenvolvimento e melhoria de processos, capazes de reduzir impactos ambientais e elevar o retorno dos empreendimentos, bem como desenvolvimento de novos produtos, com maior grau de diferenciação e maiores margens de retorno. Diante disso, o desenvolvimento e a difusão de novas tecnologias de *big data*, manufatura avançada, impressão 3D e novos materiais possibilitam a abertura de um leque importante de oportunidades de investimento em inovação, na mineração e na metalurgia.

A sobreoferta mundial, a pressão por maior sustentabilidade e a difusão de novas tecnologias são, portanto, pela ótica deste estudo, os três principais fatores a orientar as estratégias das empresas e a dinâmica de mercado, nos próximos anos.

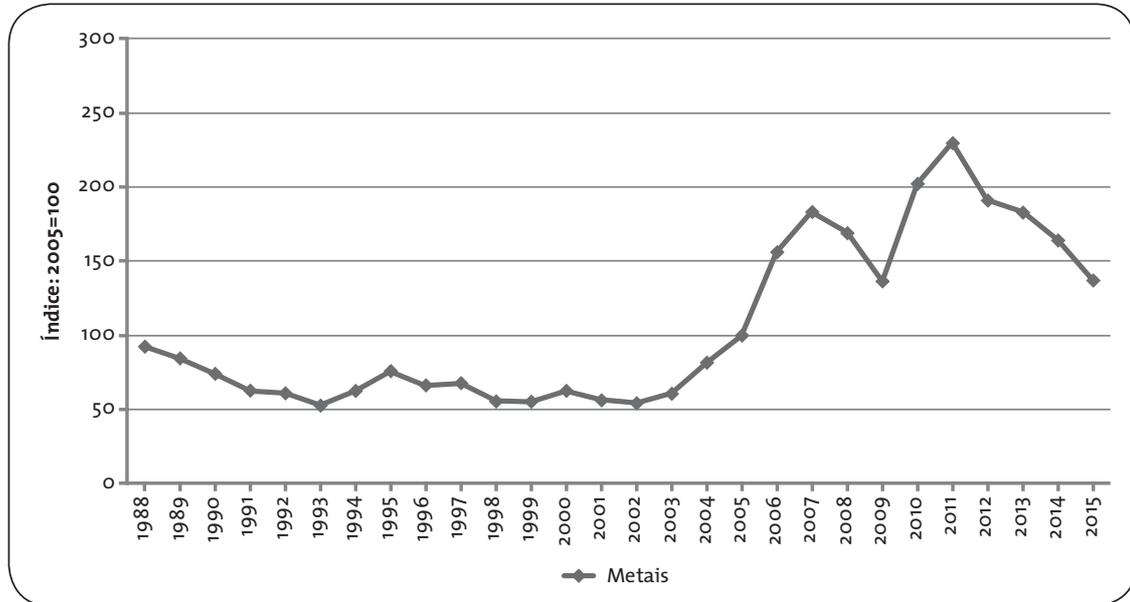
Sobreoferta mundial e fator China

Em relação ao comportamento mundial de mercado, os últimos anos foram marcados por um período de intensa elevação da capacidade produtiva nos setores de mineração e de metais, diante dos movimentos de crescimento persistente da economia chinesa e de sua demanda por metais ferrosos e não ferrosos e, conseqüentemente, de minerais utilizados para produção desses diversos metais. Esse comportamento é bem observado no mercado de aço, que responde por cerca de 90% da produção total de metais, e no mercado de minério de ferro, principal insumo siderúrgico.

A grande elevação da demanda mundial de aço observada de 2000 a 2007 – crescimento médio de 7,3% a.a., de acordo com dados da CRU (2015a) – foi responsável por um conjunto grande de investimentos em novos empreendimentos que entraram em produção nos anos recentes, notadamente marcados pela desaceleração da demanda chinesa e mundial. Os anos de 2014 e 2015 são particularmente marcados por uma mudança expressiva do cenário previsto de desaceleração gradual para uma realidade de retração da demanda e da produção mundial de metálicos, sobretudo de aço. Esse cenário não esperado pelos especialistas de mercado, conjugado à maturação de grandes projetos de adição de capacidade, foi desastroso para o equilíbrio desses mercados, os quais amargaram grandes quedas dos preços dos diversos produtos comercializados e da margem de rentabilidade dos agentes. O Gráfico 1 apresenta a evolução

dos preços dos principais metais e do minério de ferro, mostrando o forte ciclo de alta de 2003 a 2011 e a expressiva queda dos preços nos últimos três anos.

Gráfico 1 | Índice de preço de metais com maior comercialização



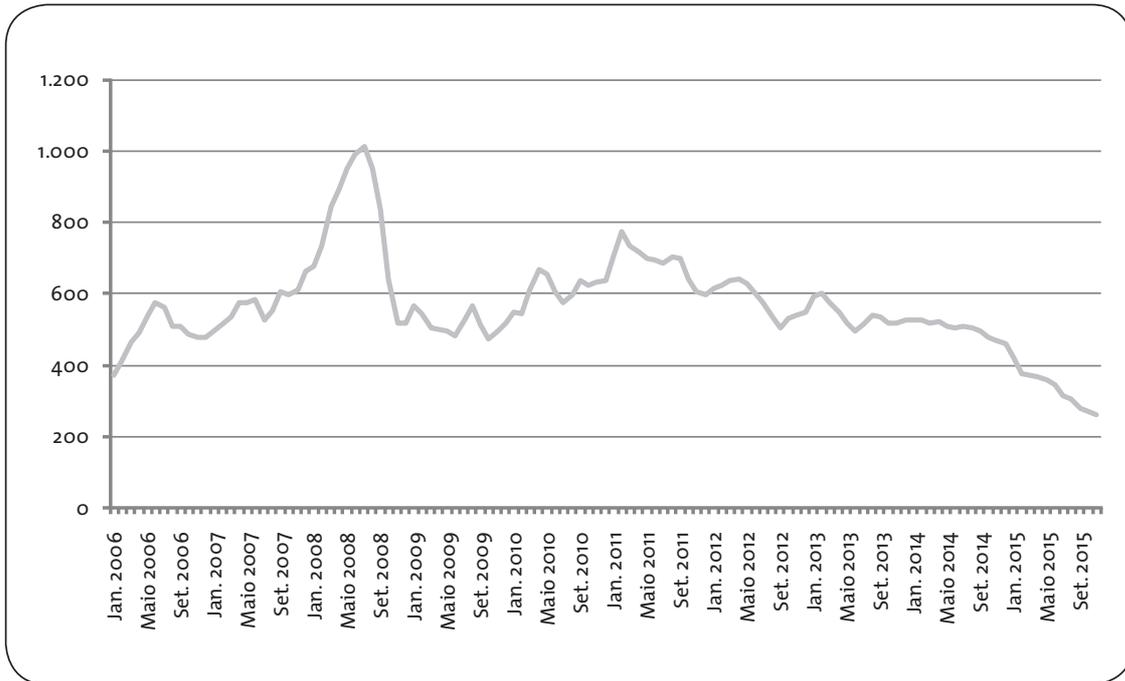
Fonte: FMI (2016).

Nota: Índice de preços dos metais, incluindo cobre, alumínio, minério de ferro, estanho, níquel, zinco, chumbo e urânio.

Na siderurgia, o excesso de capacidade mundial instalada para a produção de aço bruto, em 2015, chegou a cerca de setecentos milhões de toneladas, enquanto os preços amargaram os valores mais baixos dos últimos dez anos. Nos gráficos 2 e 3, apresenta-se o comportamento dos preços de exportação de bobinas a quente e de vergalhões da China, que são bastante representativos no mercado de produtos siderúrgicos.

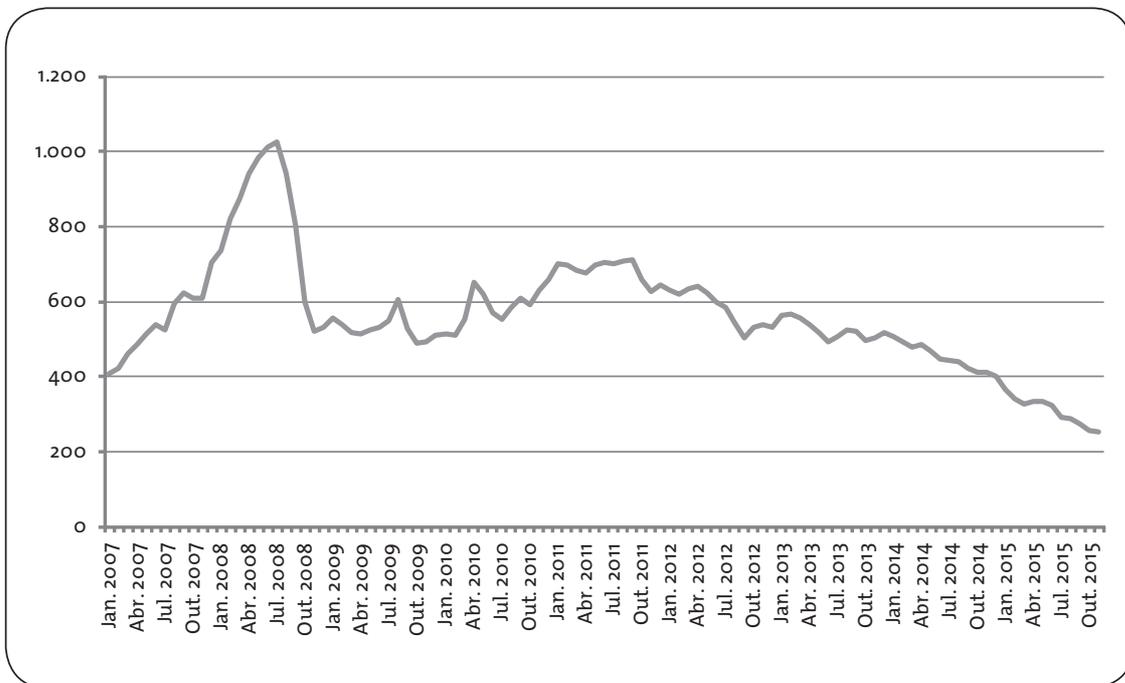
A China é o maior produtor e o maior consumidor de aço do mundo, respondendo por cerca de 50% da produção e do consumo atual. Essa elevada participação torna o comportamento da economia chinesa o principal determinante do comportamento mundial dos mercados de metais e minerais metálicos. Dessa forma, a estabilização das taxas de crescimento chinesas em patamares inferiores ao observado na década anterior, bem como a interrupção do ciclo de crescimento da taxa de formação bruta de capital fixo em relação ao produto interno bruto (PIB), tem impactado negativamente os preços das *commodities* minerais e dos metais no comércio mundial.

Gráfico 2 | Preço de bobinas de aço-carbono laminadas a quente (BQ) – exportação da China (US\$/t)

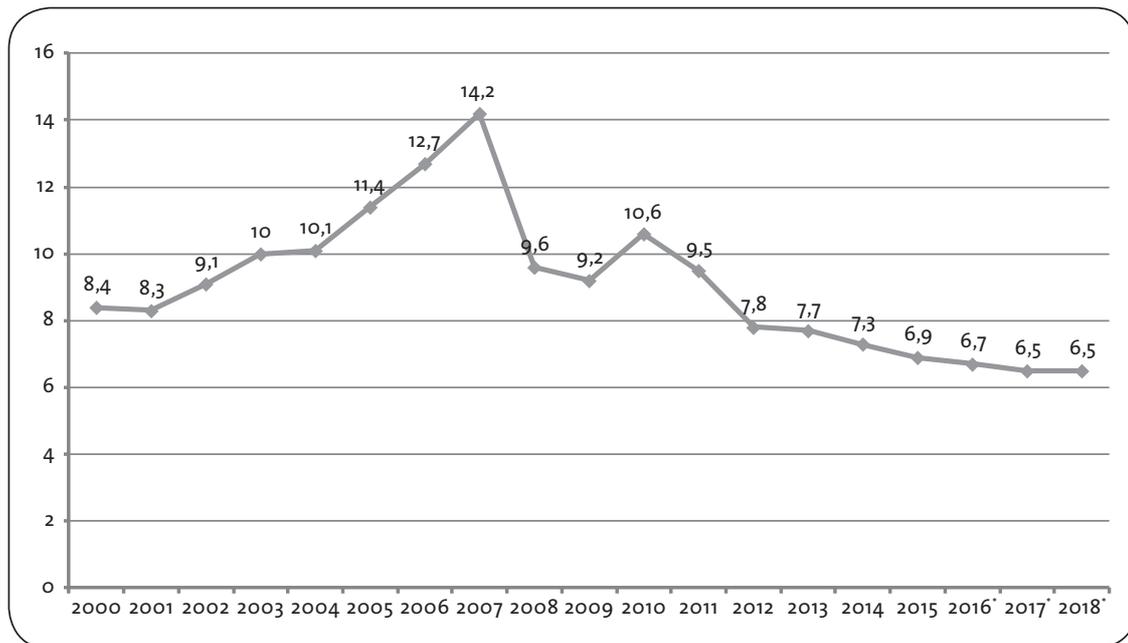


Fonte: SBB Platts (2016).

Gráfico 3 | Preço médio de vergalhão – exportação da China (US\$/t)



Fonte: SBB Platts (2016).

Gráfico 4 | Taxas de crescimento do produto interno bruto chinês (%)

Fonte: Banco Mundial (2016).

* Estimativa.

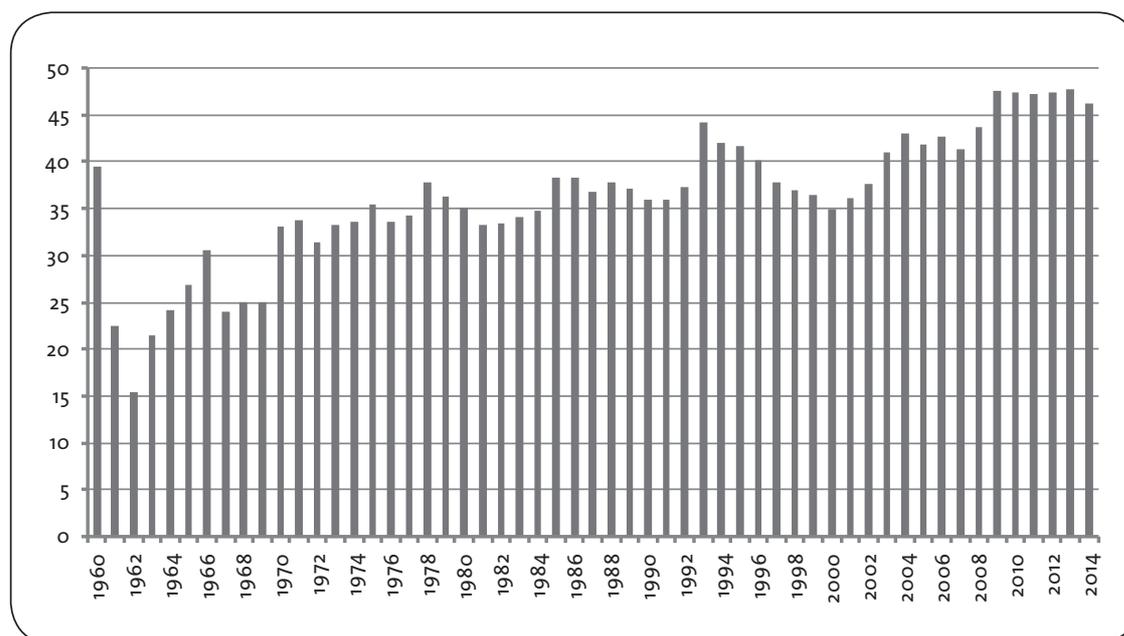
A evolução da economia chinesa, que lhe rendeu o título de motor do crescimento mundial, também lhe conferiu a posição de maior consumidor mundial de *commodities* minerais e metálicas, o que faz com que esse movimento de recrudescimento de suas taxas de crescimento afete de forma bastante abrangente esses mercados. A China representou, nos últimos anos, mais de 50% do consumo mundial das *commodities* dos minerais metálicos mais presentes no mercado. Em 2015, por exemplo, foi responsável por cerca de 60% do consumo mundial e 70% das importações do comércio marítimo de minério de ferro, segundo dados de CRU (2015b).

Se não bastasse o efeito de redução brusca do consumo mundial, a China se tornou exportadora líquida em alguns mercados de metais, o que impõe um enorme desafio para as empresas produtoras dos demais países competirem no mercado internacional. Nesse sentido, o mercado mundial de aço observa uma elevação da penetração das importações chinesas em diversos países, com impacto direto sobre os preços domésticos e margens de retorno.

A estabilização da taxa de formação bruta de capital fixo na China parece ampliar o apetite dos produtores chineses por mercados internacionais e

e elevar a competição em produtos acabados, resultantes de etapas mais avançadas na cadeia produtiva. Tendência refletida no aumento da participação de produtos de ferro fundido, ferro e aço, máquinas e equipamentos mecânicos e máquinas e aparelhos elétricos de origem chinesa nas importações totais brasileiras a partir de 2010, de acordo com dados divulgados pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC), disponíveis no Aliceweb.

Gráfico 5 | Evolução das taxas de investimento na China (% do PIB)



Fonte: Banco Mundial (2016).

As produtoras chinesas de aço operaram o ano de 2014 com margens de retorno negativas, ao passo que houve aumento da produção chinesa de aço no mesmo período. Isso aponta para uma lógica de operação que seria baseada em baixos preços de *commodities* tradicionais utilizadas como insumos em diversas cadeias industriais, com o objetivo de prover maior competitividade de produtos de maior complexidade tecnológica e de produção nos mercados internacionais.

A competição das indústrias chinesas em produtos de cada vez maior complexidade tecnológica impõe um desafio ainda maior a um grande conjunto de empresas líderes mundiais em seus mercados por inovação, aumento de qualidade e redução de custos.

Sustentabilidade socioambiental

Esforços tecnológicos têm sido feitos para reduzir as emissões de GEE. Fontes de energia renováveis, a exemplo da eólica, de biomassa e solar, têm sido mais exploradas, fazendo com que o custo relativo de geração energética de tais fontes tenha se reduzido nos últimos anos. Cabe ressaltar o papel das inovações que proporcionam novas oportunidades de redução de emissões de GEE. A tendência é que, por mais que o custo relativo do uso de processos mais sustentáveis seja mais alto, passem a ser mais adotados, por terem impacto menor no meio ambiente. Ou seja, a importância econômica vem perdendo importância relativamente à questão da sustentabilidade. Por causa do nível de urgência do problema, a tendência é que o ritmo de inovação acerca do tema seja cada vez maior.

Anualmente, todos os países se reúnem desde o tratado de 1994, na Conference of the Parties (COP), para rever a implementação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima⁴ e tomar decisões apropriadas relativas à questão do efeito estufa. Na COP 15, em 2009, foram estabelecidas metas de redução de emissão de GEE até 2020.

Em 2014, um acordo bilateral entre China e Estados Unidos, maior e segundo maior poluidor mundial, respectivamente, foi assinado com o intuito de compensar a não participação desses países na COP 20. Esse foi o primeiro acordo em que a China se comprometeu a reduzir suas emissões, onde as metas traçadas têm como prazo o ano de 2030.

Em 2015, em Paris, ocorreu a COP 21, com participação de todos os 195 países. Além de as metas da COP 15 terem sido revistas, o acordo de Paris é um novo mecanismo legal de compromisso assinado por todos os países para redução da emissão de GEE e para gerir os impactos das mudanças climáticas.

A COP 21 foi marcada por um compromisso mais forte dos países com a redução das emissões nos próximos cinco anos, com o objetivo de alcançar os resultados esperados de longo prazo para a segunda metade do século. Nessa COP, houve uma sinalização para as empresas de energia realizarem futuros investimentos para um mundo de carbono zero, princi-

⁴ UNFCCC (do original em inglês United Nations Framework Convention on Climate Change), tratado internacional resultante da Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CNUMAD), informalmente conhecida como a Cúpula da Terra, realizada no Rio de Janeiro em 1992, no âmbito do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma).

palmente por conta da implementação dos Intended Nationally Determined Contributions (INDC) – em português, Contribuições Nacionalmente Determinadas Pretendidas –, que significam que energias renováveis farão parte de 78% do investimento de novas fontes de geração de energia até 2030, na maioria dos países, contribuindo para a redução do custo de geração energética dessas fontes.

Novas tecnologias

A criação e a difusão de novas tecnologias com ainda maior transversalidade e aplicação em setores tradicionalmente menos intensivos em tecnologia e conhecimento têm promovido um cenário de importante mudança nos setores de mineração e metais.

No cenário atual de difusão das tecnologias de *big data*, internet das coisas, manufatura aditiva e novos materiais, uma série de esforços tem sido empregada no desenvolvimento e na inovação de sistemas e processos mais eficientes de produção. Esses esforços são bem representados pelo conceito alemão de *industrie 4.0* (indústria 4.0) e pelo norte-americano *smart manufacturing* (manufatura inteligente).

A chamada indústria 4.0 faz referência ao que seria uma quarta revolução industrial, baseada principalmente na digitalização e na interconectividade dos sistemas e elos das cadeias de desenvolvimento e produção. Trata-se de conceito derivado dos esforços de desenvolvimento relacionados à manufatura avançada, mas que pretende abranger outros segmentos, como serviços e cidades inteligentes.

De forma semelhante, os esforços norte-americanos para o desenvolvimento da chamada manufatura inteligente envolvem maior aprofundamento e transversalidade da aplicação de tecnologias de informação e comunicação para promoção de maior interconectividade nas diversas etapas de produção e fornecimento. O objetivo é o desenvolvimento de mecanismos que permitam um controle ótimo integrado dos diversos processos, parâmetros e insumos ao longo das cadeias de produção. Esses esforços têm sido suportados por orçamento público federal da National Science Foundation (NSF) e estão parcialmente concentrados em instituições voltadas especificamente para a inovação em processos de produção, a exemplo das instituições apoiadas pela National Network for Manufacturing Innovation (NNMI) e pela Smart Manufacturing Leadership Coalition (SMLC), organização sem fins

lucrativos, que engloba industriais, fornecedores, empresas de tecnologia, universidades, entes de governo e laboratórios, voltados para a adoção e a difusão de sistemas de manufatura inteligente.

As principais áreas de pesquisa envolvidas no desenvolvimento da manufatura avançada são sensores e monitoramento, incluindo novos métodos de mensuração de dados a baixo custo, análise de processos em tempo real e integração com tecnologias de controle; sistemas de controle e automação, envolvendo a integração rápida entre os diversos mecanismos de produção e negócios e modelos de simulação; sistemas digitais para simulação e visualização 3D, capazes de permitir *design* de produto e definição de métodos de produção simultaneamente; além de plataformas digitais, padrões e protocolos de comunicação para suporte a esse fluxo e integração de dados e sistemas digitais e reais.

A busca de oportunidades de adoção desses conceitos e tecnologias é parte dos esforços de desenvolvimento observados, e os setores de mineração e metais representam grandes oportunidades para aplicação e ganhos de produtividade, principalmente considerados também a necessidade de redução de riscos e os impactos ambientais.

Sistemas de sensoriamento, controle e automação estão sendo adotados para desenvolvimento e implantação da chamada mina autônoma. A operação autônoma de equipamentos de lavra e transporte já é uma realidade na mina de Pilbara, na Austrália, da mineradora Rio Tinto. Esse tem sido um alvo das grandes mineradoras na segurança e promoção de eficiência operacional: a integração e a operação automatizadas dos equipamentos da mina, por meio de centros de informação e controle.

No caso do setor de metais, o grande conjunto de processos e parâmetros de produção expõe uma grande oportunidade para controle ótimo dos diversos parâmetros e fluxo de insumos e, conseqüentemente, ganho de eficiência, conferindo maior volume de produção, menos energia consumida e menor volume de emissões de GEE.

Para além das inovações no âmbito de processos de operação e produção, as novas tecnologias (*big data*, impressão 3D) têm impacto no desenvolvimento de novos produtos metálicos. Sistemas com plataformas digitais são utilizados para definição de rotas de desenvolvimento de ligas com base nas características mapeadas de elementos minerais e processos de produção.

Essa tecnologia, associada à maior facilidade de testes dessas ligas em protótipos impressos, tende a acelerar e reduzir custos de desenvolvimento de ligas customizadas.

Por fim, as novas tecnologias têm possibilitado uma fusão cada vez maior entre o processamento digital e o ambiente real, envolvendo desenvolvimento de produtos e processos de produção.

Os setores de mineração e metais enfrentam um período de grandes desafios diretamente relacionados a movimentos determinantes da dinâmica da economia e da organização industrial mundial. Assim, empresas e governos deverão ser capazes de se posicionar e responder da melhor forma a todos esses importantes vetores de mudança.

Eixos de desenvolvimento e inovação

O período de turbulência enfrentado atualmente pelos setores de mineração e metais tende a provocar importantes mudanças nesses mercados e em suas estruturas de produção. Nesse contexto, a liderança nesses mercados deverá ser assumida por aquelas empresas que, além de apresentarem custos de produção competitivos, alcançarem maior sucesso na implementação de suas estratégias de investimento nos três principais eixos de desenvolvimento e inovação a afetarem diretamente o setor minerometalúrgico: processos e operações mais sustentáveis; automação e controle; e novos materiais.

Operações sustentáveis

A pressão atual da sociedade por maior sustentabilidade socioambiental impõe aos setores de mineração e metais uma agenda futura de transformação contínua, quanto à adoção de processos mais eficientes e que promovam a redução e a mitigação de riscos e impactos ambientais.

Mineração

No caso da mineração, essa agenda deverá contemplar soluções para: (i) minimizar o volume de material movimentado da mina e de efluentes não aproveitados; (ii) minimizar o consumo de água; (iii) minimizar os riscos decorrentes dos processos de beneficiamento e da deposição de rejeitos; (iv) minimizar os impactos da mina; e (v) maximizar a satisfação social

decorrente das operações mineiras, de processos de fechamento de mina e da reabilitação de áreas degradadas.

O acidente de elevadas proporções ocorrido no município de Mariana (MG), em novembro de 2015, chama a atenção para o risco de rompimento de barragens de rejeitos presentes na maioria dos empreendimentos de mineração. Essa fatalidade ressalta a urgência de promover uma mineração mais segura e sustentável. A agenda da sustentabilidade na mineração está, atualmente, pressionada, entre outros fatores, pela redução do teor de concentração dos minérios lavrados, com tendência natural de aumento do material movimentado e dos diversos impactos decorrentes dessa movimentação, e pela crise hídrica brasileira, que deverá impor restrição ainda maior para a captação de água.

Para isso, há um movimento de investimento no desenvolvimento e na difusão de tecnologias e processos com foco em: aumento da recuperação dos minérios de interesse, aproveitamento e aglomeração de finos e ultrafinos; recuperação e reaproveitamento de resíduos e elementos dispersos, incluindo processos para destinação alternativa de uso; tecnologias de baixo risco ambiental para deposição de resíduos; recuperação, reutilização, redução ou eliminação de água utilizada nos processos; e monitoramento e controle de barragens e riscos ambientais.

Alguns projetos têm avançado quanto à aplicação de tecnologia de concentração magnética de minérios para maior recuperação de finos e ultrafinos, incluindo processamento de resíduos de pilhas ou barragens. Trata-se de tecnologia que se demonstrou tecnicamente viável, inclusive para a concentração de minério de ferro. Outra oportunidade para a recuperação de elementos antes dispostos em resíduos são tecnologias de pré-tratamento dos minérios para aumento do grau de liberação do elemento de interesse.

Cabe ressaltar que o drástico acidente ocorrido em Mariana faz parte de um conjunto maior de eventos envolvendo o rompimento de barragens de rejeitos de operações de mineração. Por envolver o uso de água, a maioria dos processos tradicionais de concentração mineral gera um rejeito na forma de lama, em geral armazenado em barragens (método mais econômico). O último acidente ocorrido no Canadá, em 2014, levou a um importante debate acerca do uso de barragens e desenvolvimento de tecnologias e métodos alternativos de deposição de rejeitos.

A definição de parâmetros mais rígidos de segurança para a construção de novas barragens já é uma realidade em novos licenciamentos ambientais concedidos no Canadá. Enquanto isso, a eliminação do uso de barragens continua a ser um dos mais importantes desafios para a mineração sustentável. Pesquisadores e engenheiros têm trabalhado no desenvolvimento tanto de processos de concentração sem adição de água quanto de processos alternativos de deposição de rejeitos.

Exemplos bem-sucedidos são o processo de beneficiamento à umidade natural do projeto Ferro Carajás S11D, da Vale S.A., e o método de deposição a seco utilizado na mina de Karara, na Austrália, por meio do qual, depois de um processo de filtragem e prensagem, há recuperação de água e os rejeitos são depositados ao longo de pilhas. No entanto, trata-se, em geral, de métodos de difusão limitada por se adequarem mais facilmente a características específicas das operações em que foram aplicados. Segundo especialistas, o método de deposição a seco utilizado na mina de Karara, localizada na região seca do oeste da Austrália, por exemplo, dificilmente seria viável em regiões mais úmidas.

Outra inovação para deposição a seco de rejeitos foi uma centrífuga decantadora desenvolvida pela empresa Alfa Laval para a mina de carvão Rix's Creek, localizada no Hunter Valley, uma das regiões de maior produção de carvão na Austrália. Os investimentos para redução de riscos relacionados a barragens envolvem ainda a utilização de *softwares* de monitoramento de imagens das superfícies de barragens, a fim de identificar e alertar acerca de eventuais movimentos irregulares.

Vale acrescentar ainda que os rejeitos da mineração, quando expostos ao intemperismo, causam sério problema ambiental, a drenagem ácida de mina (DAM), no qual quantidades consideráveis de metais e outras substâncias podem ser liberadas, contaminando o solo e os recursos hídricos.

O problema pode se agravar quando as atividades de mineração são realizadas em locais com minerais sulfetados, que, quando sujeitos à ação de certas bactérias, transformam-se em ácido sulfúrico, causando a solubilização dos minérios e o agravamento da contaminação. Visando à mitigação desse problema, pesquisas biotecnológicas têm sido desenvolvidas, enfatizando-se o uso de bactérias endógenas específicas, as chamadas bactérias mineradoras, para a oxidação dos minerais sulfetados presentes nos rejeitos, de forma acelerada, controlada e segura, diminuindo o impacto da DAM.

Esse processo, conhecido como biolixiviação, consiste em empilhar o rejeito sobre uma estrutura impermeável e recircular sobre ela uma solução que promova o crescimento de um tipo específico de bactéria, produzindo uma solução ácida e oxidante, chamada de lixívia. Essa lixívia é continuamente recirculada pela pilha, promovendo o enriquecimento de metais solúveis que podem ser posteriormente recuperados, aumentando, assim, a eficiência do processo mineral.

Outra linha de pesquisa que também pode ser abordada, ainda em fase experimental, é a da reciclagem do rejeito. Pesquisadores da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) já detêm tecnologia para transformação de rejeitos e estéreis de minerações de ferro, bauxita, fosfato e calcário em produtos como cimento – para construção de blocos, vigas, passeios, estradas –, areia – que pode alimentar a indústria de vidros e de *chips* de computador – e pigmentos, para a produção de tintas.

No âmbito de grandes projetos de mineração, a agenda de sustentabilidade social também ganha importância na medida em que essas operações impactam a rotina e a qualidade de vida das populações do entorno. A mineração sustentável deve ser capaz de prover benefícios às populações afetadas pelas atividades de lavra e beneficiamento dos minérios, que envolvem, em geral, a transformação de grandes áreas e a intensa movimentação de carga.

Com essa finalidade, as empresas devem procurar investir em projetos capazes de envolver a população local em atividades promotoras de emprego e renda alavancadas pelas operações mineiras. Aqui, a inovação também desempenha importante papel, ao viabilizar, por exemplo, atividades produtivas com participação da população local para transformação de material originalmente descartado em coprodutos, bem como a reabilitação plena de áreas mineradas para uso em agricultura.

Metalurgia

Conforme já comentado, a transformação mineral dos metálicos, em geral, parte de um óxido que passará por processo de oxirredução (reação que libera grande quantidade de CO_2), para a obtenção do metal primário. Isso faz com que o setor metalúrgico seja um dos maiores emissores industriais de GEE. Para ilustrar, podem-se citar: o aço, com uma taxa média mundial de emissões de aproximadamente 1,9 t de CO_2 eq./t aço

(WSA, 2015); e o alumínio, com média mundial de 7,1 t de CO₂ eq./t alumínio primário (ABAL, 2010).

No alumínio, as emissões de CO₂ concentram-se, principalmente, nos processos de produção de alumínio primário e de alumina, que juntos representam cerca de 90% do total, incluindo as emissões diretas de processo e as indiretas, nas quais se incluem as do transporte e as da fonte de energia. Na produção de alumínio primário, em função de vantagem comparativa, obtida principalmente graças à matriz elétrica de base essencialmente hídrica, o Brasil apresenta taxa de emissão de 2,66 t de CO₂ eq./t alumínio primário, muito abaixo da média mundial (ABAL, 2010).

No Brasil, o setor metalúrgico é o maior emissor industrial de GEE e o maior consumidor industrial de energia.

De acordo com dados do balanço energético nacional de 2015 (ano-base 2014), a metalurgia respondeu por 27,9% do consumo industrial de energia (EPE, 2015). O setor foi responsável por 46,6% da emissão total do setor processos industriais em 2012 – dados de estimativas anuais de emissões de GEE no Brasil (MCTI, 2014). Considerando as emissões brasileiras totais, o setor respondeu por cerca de 3,3%.

Dado o caráter intensivo em energia e emissões (com mais de 80% do volume de emissões advindo do consumo de insumos energéticos), os maiores esforços para a promoção de sustentabilidade na metalurgia estão relacionados justamente à redução do consumo e à recuperação de energia e de gases dos processos de produção.

Entre as tecnologias voltadas para a redução do consumo, podem-se citar, por exemplo, os avanços relacionados a processos alternativos de produção de ferro primário, em substituição ao processo convencional de produção por altos-fornos, com grande consumo de insumos energéticos fósseis e elevado teor de emissões. O Brasil tem um projeto em desenvolvimento pela empresa Tecnored, de propriedade da mineradora Vale, que elimina as etapas de sinterização e coqueificação na produção do ferro primário, muito intensivas nas emissões de GEE.

Na indústria de alumínio, a busca por ganhos de eficiência energética está na lista dos principais esforços para a redução dos custos e das emissões de GEE. A Norsk Hydro está testando, nas plantas de Karmoy, na Noruega, a tecnologia HAL4e, recém-desenvolvida pela empresa, para a produção de

alumínio primário. Caso seja bem-sucedida, essa tecnologia demandará um consumo médio de 12,5 kWh/kg de alumínio primário, tornando a Hydro a detentora dos *smelters* mais eficientes do mundo, com consumo 10% abaixo da média mundial.

Na metalurgia, há oportunidades de recuperação de gases ou calor de processo em todas as etapas de produção. Além disso, o aprimoramento das tecnologias de produção tem gerado oportunidades relacionadas também à alimentação de fornos e ao controle e à automação dos fluxos de insumos e produtos, com o objetivo também de prover maior continuidade e integração dos processos e evitar perdas energéticas entre as etapas produtivas.

São apresentados a seguir alguns exemplos de tecnologias e processos promotores de eficiência energética: (i) tecnologia de *heat recovery* (recuperação/aproveitamento de calor) nas diversas etapas de produção; (ii) sistemas para controle em tempo real de variáveis dos processos, como a temperatura, regulando-se em função da necessidade, em vez do uso de aquecimento constante; (iii) aproveitamento de gases de processos; e (iv) novas tecnologias que promovam redução significativa do consumo de energia em fornos elétricos e em processos eletrolíticos, incluindo seus sistemas de automação e controle.

Outro importante vetor de sustentabilidade ambiental da metalurgia está relacionado ao conceito de ciclo de vida de produto e ao desenvolvimento de novos materiais que promovam maior eficiência energética e redução de emissões na fase de uso dos materiais por bens produzidos por cadeias industriais consumidoras de metais. O desenvolvimento e a inovação em novos materiais serão objeto de uma seção específica.

Automação e controle

Automação e controle têm reunido os esforços de grande conjunto de instituições e pesquisadores ao redor do mundo. Sob os conceitos de manufatura inteligente ou indústria 4.0, os avanços são rápidos e observáveis em indústrias e operações de logística. Essa realidade inclui as operações de mineração e metais.

Os equipamentos de mineração autônomos já são uma realidade e os incentivos são grandes, tendo em vista que os gastos com mão de obra representam o maior item de custo por tonelada de produto das grandes mineradoras. Sistemas de automação de veículos e equipamentos responsáveis

pela lavra e pela movimentação de carga nas minas estão disponíveis no mercado, por exemplo, via empresas especializadas em componentes robóticos instalados em veículos para permitir sua automação e controle remoto.

A crescente demanda por tecnologias de informação e comunicação pelos setores de mineração e metais tem aumentado a participação desses setores nos portfólios das maiores fornecedoras mundiais: Microsoft, IBM, Oracle e SAP. Além disso, os principais fornecedores de equipamentos para o setor desenvolveram áreas dedicadas a produtos tecnológicos.

Entre as maiores mineradoras do mundo, a Vale, a Rio Tinto, a BHP e a Fortescue Metals estão avançando na adoção de sistemas autônomos de movimentação de carga. No caso da Vale, com uso exclusivo de correias transportadoras na operação Ferro Carajás S11D, enquanto as mineradoras em Pilbara, Austrália, ampliam a quantidade de caminhões autônomos em operação.

A difusão de tecnologias de automação e controle na mineração tem foco claro de alcançar o mesmo grau de coordenação e produtividade de processos de produção industriais, que já contam com uso intensivo de robôs e centros de controle integrados. Trata-se de um caminho atrativo e necessário diante do novo patamar de preços e, conseqüentemente, contínua pressão por redução de custos de produção que deverá ser, doravante, uma marca dos mercados de *commodities* minerais.

Enquanto as oportunidades de automação e controle na mineração são bastante concentradas na movimentação otimizada de carga dentro da mina, considerando o melhor aproveitamento dos diversos ativos mobilizados, a metalurgia oferece um conjunto maior de parâmetros e oportunidades para a manufatura inteligente.

No setor de metais, o avanço em tecnologias de sensoriamento inteligente, automação e controle de parâmetros e fluxos de insumos nos processos metalúrgicos oferece uma ampla gama de oportunidades de elevação da produtividade das plantas e da qualidade dos produtos.

As oportunidades de processamento automatizado de elevado conjunto de dados de produção possibilita a adoção de sistemas de monitoramento da condição das plantas, o que permite a manutenção preventiva mais eficiente e evita danos de equipamentos e paradas de produção. Além disso, o monitoramento e a disponibilização das informações de rendimento e

qualidade de produto orientam a adoção contínua de medidas de melhoria e ganhos de eficiência.

Vale destacar os sistemas de controle de temperatura e velocidade de entrega de produtos semiacabados para fornos de reaquecimento, sistemas de diagnóstico de lingotamento, com detecção de parâmetros precursores de falhas e tomada de ações preventivas de forma automatizada, sistemas de balanceamento de carga no processo de produção do aço em conversores a oxigênio (*basic oxygen furnace* – BOF).

As tecnologias e os sistemas de automação e controle são desenvolvidos e oferecidos pelos diversos agentes envolvidos no processo de produção, entre os quais as empresas especializadas em tecnologias de automação e controle, fornecedores de equipamentos e de sistemas de produção e produtores de aço. O desenvolvimento ou a incorporação dessas tecnologias figura na estratégia das principais produtoras de aço no mundo.

Novos materiais

O desenvolvimento de novos materiais é uma importante fonte de melhoria na qualidade e na eficiência de produtos já ofertados, no desenvolvimento de novos produtos e mercados e ainda na viabilização de novos processos de produção. Dessa forma, o desenvolvimento de novos materiais representa uma grande oportunidade de geração de valor para toda a cadeia de mineração e metais. Novos materiais, com propriedades superiores a materiais usualmente empregados, criam um conjunto de possibilidades de aplicação e novos desenvolvimentos associados.

A necessidade de diferenciação e de maiores margens de retorno, de redução de consumo e de emissões e de difusão das tecnologias de *big data* e impressão 3D constitui fortes incentivos ao investimento em tecnologia e inovação para desenvolvimento de novos materiais, incluindo novas ligas metálicas.

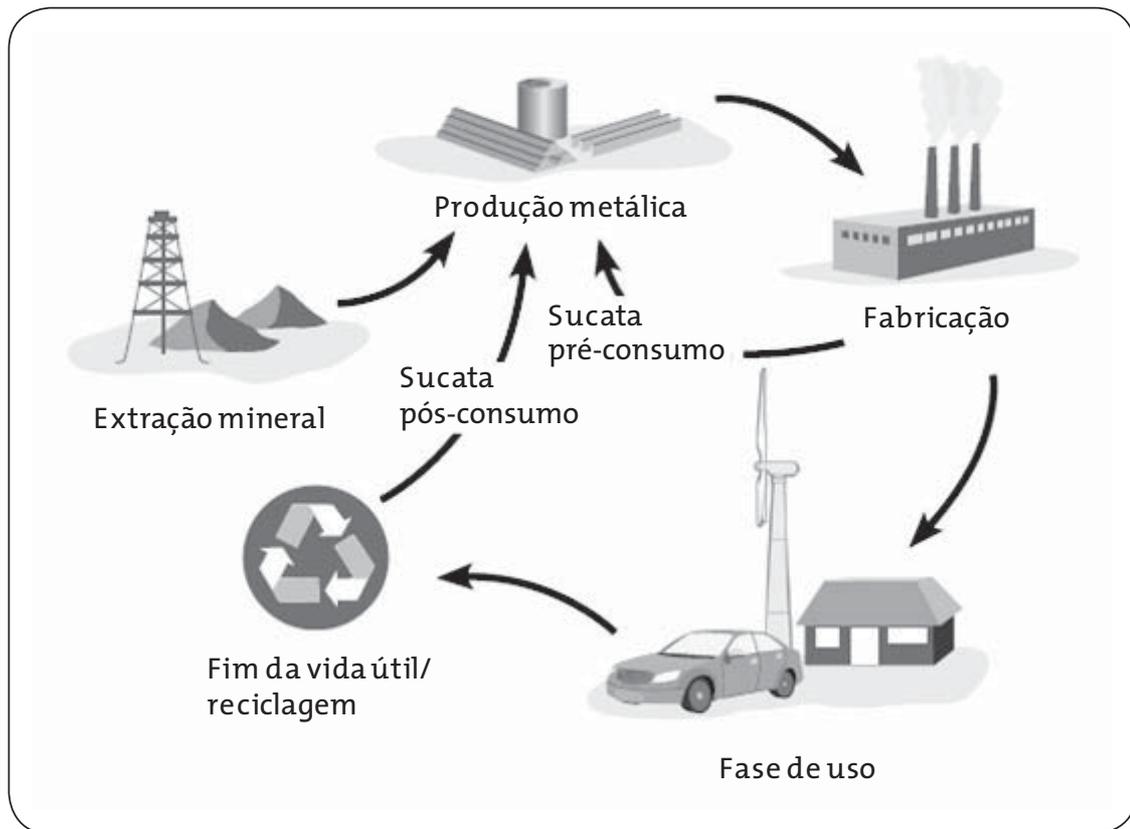
A metalurgia integrou, historicamente, as cadeias dos setores de bens de capital, transportes e construção civil, com oferta de metais padronizados aplicados nesses setores. Nas últimas décadas, tanto o desenvolvimento de novos setores, a exemplo da microeletrônica, quanto a elevação das exigências de produtividade e eficiência de setores tradicionais, como ocorrido no

setor de bens duráveis, têm exigido um esforço cada vez maior de desenvolvimento de novos materiais e de novas ligas metálicas com propriedades especiais. Em alguns setores, isso representa um deslocamento do foco de inovação, antes mais concentrado no *design* e na eficiência eletromecânica de peças e arquiteturas dos bens produzidos, para a estrutura, propriedades e eficiência dos materiais aplicados.

Observa-se a elevação do grau de importância e da aplicação de ligas especiais em diversos setores, com destaque para o grande desenvolvimento aplicado à indústria de semicondutores, à indústria de aeronaves, a energias limpas e ao setor de saúde. Assim, o desenvolvimento de ligas especiais é, atualmente, um dos principais vetores de inovação da metalurgia, atuando no desenvolvimento de ligas capazes de atender a necessidades específicas de diversos setores.

A aplicação de novos materiais e de novas ligas tem o potencial de impulsionar novos setores, promover redução do peso e do volume dos bens fabricados, maior customização às necessidades de cada equipamento, conjugando melhora das propriedades desejadas, aumento da vida útil e redução de consumo de materiais e energia. Dessa forma, as novas ligas trazem grande benefício para consumidores finais e para a sociedade, traduzido em redução de consumo de energia, redução de emissões de GEE, redução de ruídos, maior segurança e maior durabilidade. A inovação na produção de ligas especiais tem ainda por objetivo desenvolver mercado para elementos minerais abundantes, com benefício atual e futuro sobre a balança comercial de países com elevada riqueza mineral, como é o caso do Brasil.

Atualmente, a aplicação de novos materiais metálicos representa um dos principais vetores de redução de consumo de energia e emissões ao longo de todo o ciclo de vida de diversos produtos. Isso ocorre principalmente pela redução da quantidade de material utilizado e respectiva energia empregada até a produção dos metais, pela redução de peso e volume e melhor eficiência operacional de bens finais, com redução de consumo energético e emissões durante a fase de uso. Quando consideradas as diversas fases do ciclo de vida, conforme representadas na Figura 1, os metais apresentam, em geral, a vantagem de serem considerados 100% recicláveis, ou seja, com possibilidade de recuperação de quase 100% dos insumos e da energia empregados na produção primária.

Figura 1 | Ciclo de vida de produtos metálicos

Fonte: WSA (2012).

Tem destaque o desenvolvimento de ligas leves de alta dureza para aplicação na indústria de aviação e automobilística, ocasionando a redução do consumo de combustível, além de materiais mais eficientes para turbinas geradoras de energia, promovendo a expansão das energias limpas.

São muitos os trabalhos e equipes dedicados a pesquisa e desenvolvimento (P&D) em ligas mais leves e resistentes, com fluxo contínuo de descobertas para aplicações variadas. Recentemente, foi divulgado o desenvolvimento de uma liga de magnésio porosa de alta resistência e densidade menor que a da água, capaz, portanto, de flutuar e com potencial aplicação em embarcações.

A maior parte dos materiais utilizados na aviação já corresponde a materiais leves, com destaque para o alumínio, muito utilizado em componentes estruturais. A pressão por maior eficiência energética e redução de emissões também tem impulsionado aplicação crescente de materiais leves na fabricação de veículos, com destaque para aços leves desenvolvidos pelas empresas ThyssenKrupp e ArcelorMittal.

Dentre os produtos ofertados e objeto de P&D contínuo de diversos agentes, destacam-se:

- carbeto de elementos metálicos de alta dureza e resistência à corrosão e a altas temperaturas para aplicação em máquinas e ferramentas de desgaste;
- ligas mais leves, com maior resiliência e capacidade de conformação para aplicação em veículos;
- ligas com menor grau de atrito, maior condutividade térmica, capacidade de absorção de ruídos, e que permitam redução de peso e volume para aplicação em motores e turbinas;
- ligas com maior condutividade e capacidade de conformação para aplicação em semicondutores e eletrônicos;
- ligas com memória de forma e ligas bioabsorvíveis para aplicação em saúde;
- metais e ímãs permanentes de terras-raras para turbinas e motores;
- silício grau solar, ligas de índio e gálio e demais ligas para produção de células fotovoltaicas; e
- ligas de lítio e demais elementos aplicados à produção de baterias acumuladoras.

A transversalidade das tecnologias e aplicações de novos materiais metálicos confere caráter estratégico ao tema, que é objeto de políticas de investimento em PD&I de empresas e países, com foco na geração de mais valor em suas cadeias industriais. Além de presente na estratégia de investimento de grandes produtores de metais e empresas desenvolvedoras de tecnologias industriais, o desenvolvimento de materiais metálicos é, por exemplo, objeto de programa de financiamento com recursos não reembolsáveis da NSF dos Estados Unidos. O Programa de Metais e Nanoestruturas Metálicas (Metals and Metallic Nanostructures – MMN – Program) tem foco em processamento, estrutura e propriedades de metais e ligas e em incentivo ao uso de modelos computacionais para análise e controle de propriedades nas diversas escalas de grandeza. O programa tem o objetivo de avançar no desenvolvimento de materiais com desempenho superior em relação ao

comportamento em condições extremas, densidade magnética, memória de forma e eficiência termoelétrica, entre outros.

O desenvolvimento de novos materiais decorre fundamentalmente do casamento entre oportunidades de ganhos de eficiência e superação de limites aos processos de produção e desenvolvimento de novos bens ou funcionalidades e a P&D de propriedades específicas para atendimento dessas demandas. Nesse processo, portanto, é fundamental a interação entre pesquisadores desenvolvedores de metais, seja de empresas fornecedoras, seja de institutos de pesquisa, e os usuários responsáveis pela aplicação desses materiais em bens finais – principalmente indústrias de bens de capital, energia e transportes.

Vale destacar o apoio do fundo tecnológico BNDES Funtec a projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) de novos materiais metálicos executados em parceria entre instituições brasileiras de pesquisa e empresas. O fundo é responsável pelo financiamento de projetos promotores de capacitação tecnológica e competitiva para desenvolvimento de ligas metálicas e melhoria da eficiência operacional de bens produzidos com base nessas ligas.

Ressalta-se ainda o grande esforço de P&D, nos últimos anos, dos chamados materiais de topologia 2D. A topologia 2D teve como grande marco o isolamento do grafeno,⁵ feito em 2004, pelos pesquisadores da Universidade de Manchester Andre Geim, nascido na Rússia e de cidadania holandesa, e Konstantin Novoselov, também russo, com cidadania britânica.

Os materiais 2D consistem em uma única camada de átomos ou compostos atômicos e apresentam características incomuns, podendo ser usados em aplicações tais como energia fotovoltaica, fotônica, acumuladores de baterias, semicondutores, em materiais compósitos e nos processos de purificação de água. Graças à variabilidade das aplicações, o mercado global desses materiais apresenta grande potencial de crescimento, nos próximos anos.

Os materiais 2D são constituídos de elementos químicos ou compostos, geralmente com ligações químicas covalentes. Os materiais 2D elementares

⁵ O grafeno é uma das formas cristalinas do carbono, assim como o diamante, o grafite, os nanotubos de carbono e fulerenos. O grafeno de alta qualidade é muito resistente, leve, quase transparente, excelente condutor de calor e de eletricidade. É o material mais resistente já obtido, consistindo em uma folha plana bidimensional de átomos de carbono densamente compactados, reunidos em uma estrutura cristalina hexagonal, com espessura de apenas um átomo.

(compostos de um único elemento químico) levam, usualmente, o sufixo eno em seus nomes, como o grafeno (material monocamada de carbono), o fosforeno (monocamada de fósforo), o bororeno (de boro), o siliceno (de silício) e o germaneno (de germânio).

Como exemplos de materiais 2D constituídos de compostos químicos, podem ser citados o grafano (cujo composto é o CH_4), o nitreto de boro hexagonal, o dissulfeto de molibdênio e o disseleneto de tungstênio.

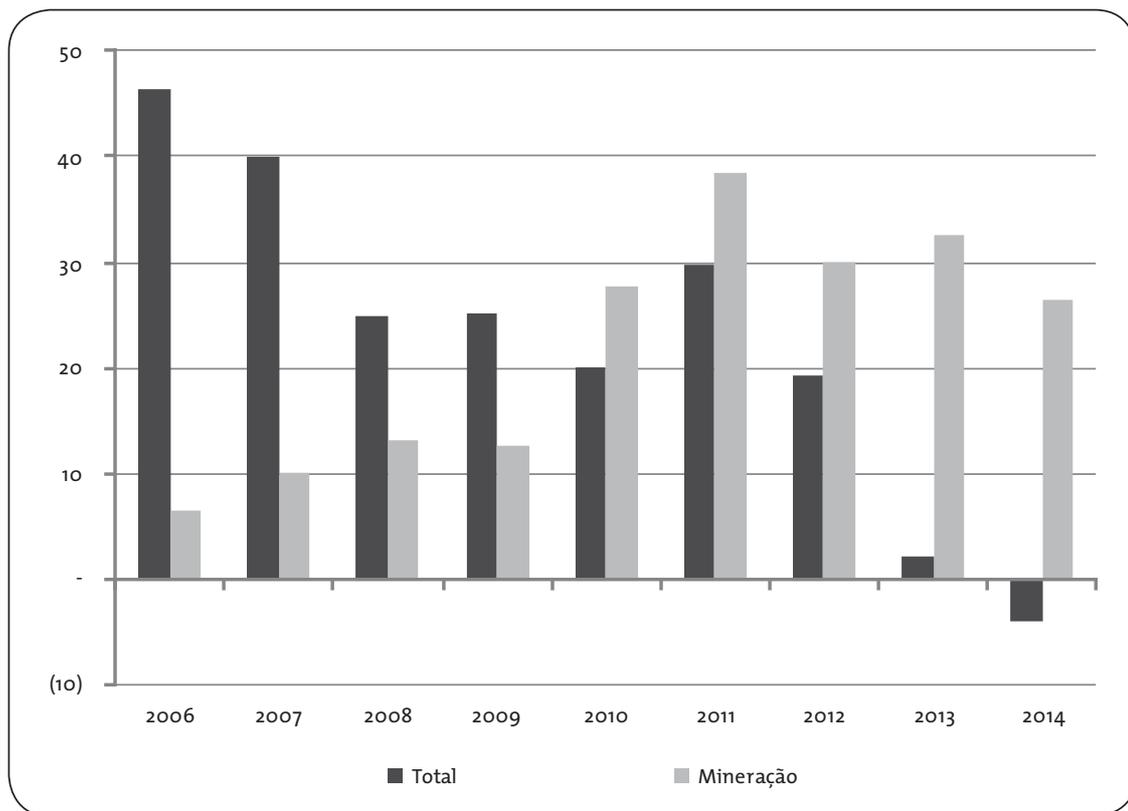
Ainda com relação a esses materiais, sobressaem as mais recentes pesquisas de combinações e empilhamento de camadas de diferentes materiais 2D, em estruturas verticais, chamadas de heteroestruturas de Van der Waals, que conferem outras diversas propriedades ao material obtido.

Cenários e oportunidades para o Brasil

O Brasil tem importantes indústrias de mineração e metalurgia, com destaque para a presença de grandes projetos de mineração de ferro e siderurgia. Importantes fornecedoras de insumos para cadeias de produção a jusante, essas indústrias desempenham papel relevante para a promoção de competitividade e sustentabilidade das indústrias de máquinas e equipamentos, de transportes e de energia, entre outros.

Dados da Associação Brasileira de Máquinas e Equipamentos (Abimaq) indicam que a indústria de transformação brasileira tem perdido competitividade de forma contínua há quase uma década (ABIMAQ, 2012). O período pós-crise financeira internacional registrou uma redução expressiva da participação da indústria de transformação no PIB, de patamar superior a 16%, antes de 2008, para 10,9%, em 2014.

Quanto à mineração mais especificamente, a atividade é importante geradora de divisas para o país, como é possível observar no Gráfico 6. Em 2014, o saldo da balança comercial mineral foi superior a US\$ 26 bilhões. O saldo positivo gerado pelo setor mineral torna-se ainda mais relevante para a balança brasileira no cenário pós-crise financeira internacional, marcado pelo fim do ciclo de *superavits* elevados na balança comercial, superior a US\$ 40 bilhões nos anos pré-crise, com redução brusca em 2008 e redução gradual ano a ano a partir de 2010 até se converter em *deficit* em torno de US\$ 4 bilhões em 2014.

Gráfico 6 | Balança comercial brasileira, da mineração e total (US\$ bilhões)

Fonte: Elaboração própria, com base em dados dos portais do MDIC e do Ibram.

Essa reversão do saldo da balança comercial é retratada pelos *deficits* comerciais com Estados Unidos e União Europeia, grandes consumidores de produtos não primários. A conversão do *superavit* em *deficit*, no período de 2011 a 2014, na balança comercial brasileira, ocorreu com uma redução pronunciada da participação de produtos manufaturados nas exportações brasileiras totais, que caiu de 52% em 2007 para 36% em 2014, indício de perda de competitividade da indústria brasileira, impactada fortemente pela apreciação cambial no período.

Os setores de mineração e metais são importantes geradores de emprego e renda e constituem a principal fonte de arrecadação e vetor de desenvolvimento de regiões vocacionadas. Na atividade extrativa mineral, são mais de 190 mil empregos, enquanto na indústria de transformação mineral o número passa de setecentos mil. A indústria extrativa mineral responde por cerca de 20% do PIB industrial do estado de Minas Gerais e por cerca de 27% do PIB total do Pará.

Diante da relevância na economia brasileira e dos desafios atuais do setor, entende-se que as empresas deverão incorporar ou promover em suas

estratégias competitivas investimentos em tecnologia e inovação voltados para o desenvolvimento de novos processos e sistemas de produção e desenvolvimento de ligas metálicas diferenciadas.

Potencialidades brasileiras

O Brasil é um dos maiores países mineradores do mundo, detentor de grandes reservas e tem participação representativa no setor de metais, situando-se entre os dez maiores produtores mundiais de aço do mundo. De acordo com dados do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2014), o Brasil tem participação representativa nas reservas mundiais de um conjunto importante de minerais metálicos. A Tabela 1 apresenta a relação de alguns minerais nos quais o país tem grande participação em relação à reserva mundial.

Tabela 1 | Posição relativa do Brasil em relação a reservas mais representativas

Posição das reservas do Brasil	Mineral	Participação mundial (%)	Reserva do Brasil (10 ³ t)	Produção mundial a.a. (10 ³ t)	Produção do Brasil a.a. (10 ³ t)	Reservas BR/ produção mundial (anos)
1º	Nióbio	98,2	10.693.520	79.368	73.668	135
1º	Barita	53,3	422.000	8.704	34	48
1º	Grafita natural	50,7	72.064	1.175	92	61
2º	Tântalo	36,3	36.190	635	185	57
2º	Terras-raras	16,1	22.000	112	0,6	196
3º	Níquel	13,7	10.371	2.441	105	4
3º	Estanho	10,0	441.917	235.570	16.830	2
4º	Ferro	13,6	23.126	2.950	386	8

Fonte: DNPM (2014).

Além do nióbio, do qual o Brasil tem quase a totalidade da reserva mundial, há enorme volume de reservas em tântalo, terras-raras⁶ e grafita, minerais com aplicações variadas, inclusive no desenvolvimento de setores da eco-

⁶ As terras-raras compreendem um grupo de 17 elementos químicos metálicos de ampla distribuição na crosta terrestre, mas a baixas concentrações, aplicados, entre outros, na produção de ímãs permanentes de alto rendimento, composição e polimentos de vidros e lentes especiais, luminóforos, ressonância magnética nuclear, cristais geradores de *laser*, supercondutores, corantes e cerâmicas. A sintetização de cada elemento requer alta tecnologia.

nomia do século XXI,⁷ e cujas reservas brasileiras dariam conta de sustentar por mais de cinquenta anos a produção mundial atual. O desenvolvimento e a inovação de novos materiais com base nesses minerais são importantes vetores para o desenvolvimento, por exemplo, de baterias acumuladoras de energia, turbinas geradoras, sistemas de trens de alta velocidade, equipamentos médicos e implantes cirúrgicos. O Brasil também tem as maiores reservas mundiais de quartzo de alta qualidade – mineral processado para obtenção do silício, componente principal das células fotovoltaicas, utilizadas para geração de energia solar.

O volume e o histórico de atuação nesses setores conferem ao Brasil um importante conjunto de capacitações em tecnologias e processos de produção e desenvolvimento de produtos. Trata-se de infraestrutura tecnológica representada por empresas de elevada eficiência operacional e histórico de investimentos em tecnologia e por instituições de pesquisa, mestres e doutores dedicados à engenharia de minas, engenharia de materiais, engenharia elétrica e mecânica. Nesse âmbito, destacam-se a capacitação e a atuação da Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM), do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e de departamentos de engenharia da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para o desenvolvimento de ligas e produtos de terras-raras. Essas organizações reúnem capacitação avançada em tecnologias de análise de propriedades e comportamento de materiais e processos de transformação e purificação de minerais e metais.

Além das organizações citadas, a base tecnológica dedicada aos setores abrange: o Centro de Tecnologia Mineral (Cetem), o Laboratório Nacional Brasileiro de Nanotecnologia (LNNANO), o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ), o Instituto Tecnológico Vale (ITV), departamentos de engenharia da UFMG, a Universidade Federal de Ouro Preto (Ufop), a Universidade de São Paulo (USP), a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), a Pontifícia Universidade Católica (PUC) e o MackGraphe, entre outras. Ressaltam-se as competências em engenharia de minas da UFMG e da Ufop, a experiência do IPT em processos de purificação de metais, os trabalhos de pesquisadores da UFSC em tecnologias de metalurgia do pó e sinterização e o investimento no Centro de Pesquisas Avançadas em Grafeno e Nanomateriais –

⁷ Ou “nova economia”, caracterizada por rápidas transformações, intensivas em conhecimento, e participação cada vez maior de setores de alta tecnologia e economia verde.

MackGraphe, da Universidade Presbiteriana Mackenzie, de São Paulo. O grafeno, a exemplo de outros materiais especiais de carbono, tem um cenário muito promissor quanto à aplicação em diversos setores, conforme já apresentado. Trata-se de material que vive uma verdadeira corrida por patentes, e o MackGraphe nasce já em parceria com um dos maiores especialistas mundiais, o brasileiro Antonio Hélio Castro Neto, da Universidade de Cingapura.

Apoio ao desenvolvimento, sustentabilidade e inovação

Diante das potencialidades dos setores de mineração e metais no Brasil, o governo tem mobilizado uma agenda específica voltada para o apoio ao desenvolvimento da cadeia de mineração e transformação mineral. Essa agenda inclui uma série de metas e iniciativas elencadas no PPA 2016-2019 (MPOG, 2015), relacionadas principalmente ao objetivo de “estimular a agregação de valor ao bem mineral e o adensamento das cadeias produtivas por meio de pesquisa, desenvolvimento tecnológico e inovação no setor mineral” (p. 134). No âmbito dessa agenda, cabe destacar o processo de revisão do marco regulatório da mineração contido no Projeto de Lei 5.807, de 2013.

A mobilização para o desenvolvimento das potencialidades do setor envolveu em 2015 um esforço de identificação de oportunidades em tecnologia e inovação. O trabalho contou com a participação de importantes instituições de governo e rodada de debates com entidades privadas, com o objetivo de suportar ações de apoio ao desenvolvimento, sustentabilidade e inovação no setor de mineração e transformação mineral.

Entre as potenciais oportunidades de investimentos em inovação para desenvolvimento e promoção de sustentabilidade, sobressaem cinco grandes temas, relacionados à produção e à agregação de valor em minerais abundantes no país e/ou de elevado impacto atual e esperado na balança comercial, a processos mais eficientes e sustentáveis e a bens e serviços ofertados ao setor de mineração e transformação mineral:

- a) *Minerais estratégicos “portadores de futuro” – cobalto, grafita, lítio, metais do grupo da platina, molibdênio, nióbio, silício (grau solar), tálio, tântalo, terras-raras, titânio e vanádio*: desenvolvimento tecnológico de métodos de pesquisa mineral e de processos de lavra, beneficiamento e transformação dos minérios selecionados; processos de produção de ligas, compostos e materiais de alto desempenho;

e produtos e aplicações inovadoras. Segundo conceito utilizado no Plano Nacional de Mineração (PNM) 2030, os minerais estratégicos englobam minerais dos quais o Brasil depende de importação em alto percentual para o suprimento de setores vitais de sua economia; minerais que deverão crescer em importância nas próximas décadas por sua aplicação em produtos de alta tecnologia, denominados “portadores do futuro”; e minerais em que o país apresenta vantagens comparativas, a exemplo do nióbio.

- b) *Minerais de elevada dependência externa – fosfato e potássio*: desenvolvimento tecnológico de métodos de pesquisa mineral e processos de lavra, beneficiamento e processamento dos minérios selecionados; fontes alternativas e rotas de processamento para produção de nutrientes de origem mineral (P e K) para agricultura; e produtos fertilizantes minerais mais eficientes e mais adaptados às culturas brasileiras. O fosfato e o potássio são minerais utilizados na produção de fertilizantes, nos quais o país tem forte dependência externa. Em 2015, o *deficit* comercial de fertilizantes ficou no patamar de US\$ 6,5 bilhões.
- c) *Tecnologias e processos mais eficientes de mineração*: oportunidades em tecnologias para superação de problemas técnicos atuais e com objetivo de elevar a produtividade e a sustentabilidade do setor de mineração e transformação mineral. Foram consideradas tecnologias capazes de viabilizar a produção em jazidas até então inviáveis, a exemplo de tecnologias de bioprocessamento, processos hidrometalúrgicos, tecnologias voltadas para utilização mais eficiente e sustentável do carvão nacional e demais tecnologias voltadas para a elevação da recuperação e concentração dos elementos de interesse; além de avanços nas técnicas de exploração mineral, capazes de impulsionar e ampliar o conjunto de informações das riquezas minerais presentes no subsolo nacional.
- d) *Tecnologias e processos para redução e mitigação de riscos e impactos ambientais*: recuperação e reaproveitamento de resíduos; recuperação, reutilização, redução ou eliminação de água utilizada nos processos da mineração; redução ou eliminação do uso de elementos contaminantes na produção e no beneficiamento de minérios; sistemas e tecnologias de baixo risco ambiental para deposição de resíduos; novos sistemas e tecnologias de construção de barragens e monitoramento e controle de riscos ambientais; e mecanismos inovadores de fechamento de mina e reabilitação de áreas degradadas.

- e) *Máquinas, equipamentos, softwares e sistemas para mineração e transformação mineral*: para atividades de exploração mineral; planejamento e otimização de operações de mineração; automação e controle de operações mineiras e de transformação mineral; e lavra, beneficiamento e transformação mineral mais eficientes, incluindo redução do consumo energético e de emissões. O apoio ao desenvolvimento e à produção pioneira de máquinas, equipamentos, *softwares* e sistemas para a mineração e transformação mineral faz parte de uma política maior de adensamento da cadeia no setor.

Em reconhecimento às potencialidades dos setores de mineração e metais, o BNDES disponibiliza um amplo conjunto de mecanismos para apoio às empresas em seus planos de investimento em tecnologia e inovação, incluindo o financiamento de projetos em parceria com instituições de pesquisa. Nesse sentido, foi estabelecido como um dos focos de apoio do fundo tecnológico BNDES Funtec o desenvolvimento tecnológico de processos e produção de ligas, compostos e materiais de alto desempenho, produtos e aplicações inovadoras baseados nas propriedades específicas dos elementos: cobalto; grafita; lítio; metais do grupo da platina; molibdênio; nióbio; silício (grau solar); tálio; tântalo; terras-raras; titânio; e vanádio.

Para apoio à inovação e à sustentabilidade, além do BNDES Funtec, que concede recursos não reembolsáveis, são oferecidas linhas de financiamento com condições diferenciadas: concessão de prazos mais longos de carência e amortização, menores taxas de juros e maior percentual de participação nos investimentos. Além disso, o BNDES ainda apoia empresas e projetos inovadores por meio de participação direta no capital de empresas ou através de instrumentos híbridos de capital e dívida para suporte a projetos específicos. Vale destacar o fundo Criatec III, gerido pela Inseed Investimentos,⁸ que se encontra em fase de investimento até 2019, em micro e pequenas empresas inovadoras nas áreas de novos materiais, nanotecnologia, tecnologias da informação e comunicação, entre outros.

Por fim, para facilitar a conexão entre demandas e ofertas de recursos para inovação, o BNDES e a Finep – Inovação e Pesquisa trabalham para

⁸ Inseed Investimentos – empresa gestora de recursos focada em inovação. Em 2015, foi selecionada pelo BNDES para gerir o Fundo Criatec III. Com capital comprometido inicial de R\$ 200 milhões, o Criatec III é o maior fundo de capital semente do país. A empresa tem sob sua gestão mais de R\$ 465 milhões, em 45 projetos, tendo apresentado taxas de crescimento médio de 46% a.a., desde 2008. A Inseed Investimentos conta com unidades em Belo Horizonte, São Paulo e Curitiba.

a adoção de mecanismo que promova uma comunicação mais direta acerca de oportunidades e focos de interesse para o desenvolvimento do setor de mineração e transformação mineral, envolvendo melhor coordenação de diversos instrumentos de apoio, promoção de maior colaboração entre empresas e instituições de pesquisa e oferta mais perene de recursos.

Conclusão

O ambiente de desafios e mudanças na economia mundial impõe claramente estratégias de inovação e implantação de novas tecnologias para o desenvolvimento futuro de setores industriais e, particularmente, os setores de mineração e metais, com foco em ganhos de eficiência operacional e promoção de sustentabilidade socioambiental em toda a cadeia de valor de mineração e metais.

A incorporação de novas tecnologias causará grande impacto sobre os processos de produção e desenvolvimento de produtos e demandará elevada capacitação tecnológica das empresas e organizações que vislumbrem uma posição em etapas de maior valor na cadeia. O presente estudo demonstra haver vetores bem definidos de investimento para o desenvolvimento e a inovação em mineração e metais. Os esforços de desenvolvimento de tecnologia e inovação são cada vez maiores, e empresas e organizações mais capacitadas tecnologicamente estão promovendo um ciclo de inovações contínuas nesses setores. A difusão das tecnologias de *big data*, internet das coisas, manufatura aditiva e novos materiais promove ainda a redução dos prazos de desenvolvimento de novos processos e produtos e, conseqüentemente, elevação do ritmo de inovações.

Para avanço nessas trajetórias de desenvolvimento e inovação, já objeto de grandes investimentos de empresas de países mais avançados, empresas e instituições de pesquisa brasileiras devem avaliar oportunidades de investimento em tecnologias que aproveitem e desenvolvam as potencialidades do país. O Brasil tem grande volume e histórico de atuação em mineração e metais, grandes reservas minerais de qualidade mundial e importante conjunto de capacitações tecnológicas. Essas características devem subsidiar a elaboração e a execução de estratégias competitivas que alavanquem a participação de empresas e trabalhadores brasileiros em etapas de maior valor na cadeia.

A diversidade de aplicações de produtos metálicos, a elevação da complexidade das tecnologias envolvidas e a maior insegurança dos mercados exigem cada vez maior coordenação entre os agentes em diversas etapas da cadeia, inclusive para o desenvolvimento conjunto de tecnologias e mercados.

A turbulência do mercado, que envolve a ampliação do conjunto de tecnologias aplicadas aos setores, torna o momento atual decisivo para posicionamento futuro das indústrias e dos trabalhadores brasileiros na cadeia de valor minerometalúrgica. Nesse contexto, somente o sucesso de estratégias fundamentadas em capacitação e desenvolvimento tecnológico poderia impulsionar o posicionamento em etapas de maior valor, menos suscetíveis às volatilidades de *commodities* minerais e metálicas.

Para isso, o BNDES coloca-se como um importante parceiro das empresas brasileiras mineradoras e produtoras de metais para o financiamento de planos de desenvolvimento e inovação que elevem produtividade e eficiência operacional e ambiental, no âmbito de suas estratégias de construção de capacidades e vantagens competitivas sustentáveis.

Referências

ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. *Anuário estatístico de 2010*. São Paulo: Abal, 2010.

ABIMAQ – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS. *A competitividade da indústria de transformação e de bens de capital*. 2012. Disponível em: <<http://www.abimaq.org.br/Arquivos/Html/DEEE/A%20competitividade%20da%20ind%C3%BAstria%202004-11%20%28vers%C3%A3o%204%20-%2012.04.09%29.pdf>>. Acesso em: 24 fev. 2016.

BANCO MUNDIAL. World DataBank. *Global Economic Prospects*. 2016. Disponível em: <<http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=global-economic-prospects>>. Acesso em: 5 jan. 2016.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. Projetos de Lei e Outras Proposições. *PL 5807/2013*. Disponível em: <<http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=581696>>. Acesso em: 5 jan. 2016.

CRU INTERNATIONAL. *Crude steel market outlook*. CRU, 2015a.

_____. *Iron ore market outlook*. CRU, 2015b.

DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. *Sumário mineral 2014*. Brasília, 2014.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanco Energético Nacional 2015: ano-base 2014*. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2016.

FMI – FUNDO MONETÁRIO INTERNACIONAL. *IMF Primary Commodity Prices*. Monthly Data. 2016. Disponível em: <<http://www.imf.org/external/np/res/commod/index.aspx>>. Acesso em: 22 fev. 2016.

MCTI – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. *Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil*. 2. ed. 2014. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0235/235580.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2016.

MPOG – MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E GESTÃO. *Plano Plurianual 2016-2019*. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.planejamento.gov.br/secretarias/upload/arquivo/spi-1/ppa-2016-2019/ppa-2016-2019-ascom-3.pdf>>. Acesso em: 5 jan. 2016.

SBB PLATTS – STEEL BUSINESS BRIEFING PLATTS. *Preços do aço Platts SBB*. 2016. Disponível em: <<https://www.steelbb.com/pt/steelprices/flat/>>. Acesso em: 5 jan. 2016.

WSA – WORLD STEEL ASSOCIATION. *Steel solutions in the green economy: wind turbines*. 2012. Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/worldsteel-wind-turbines-web/document/Steel%20solutions%20in%20the%20green%20economy:%20Wind%20turbines.pdf>>. Acesso em: 23 fev. 2016.

_____. *Sustainable steel: policy and indicators 2015*. 2015. Disponível em: <<http://www.worldsteel.org/mwg-internal/de5fs23hu73ds/progress?id=ZC8mw04biQq8OJDzhLYI60LhYXs9OGIN1mEj1ZIJ4Js,&dl>>. Acesso em: 23 fev. 2016.

Sites consultados

ALICEWEB2 – <<http://aliceweb.mdic.gov.br/index/home>>.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO –
<<http://www.ibram.org.br/>>.

MDIC – MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E
COMÉRCIO EXTERIOR – <<http://www.mdic.gov.br/>>.