

## **DA CARROÇA AO TRUCKLESS: A INOVAÇÃO TECNOLÓGICA AMBIENTAL EM INDÚSTRIAS EXTRATIVAS DE MINÉRIO**

MARIA TEREZA SARAIVA DE SOUZA

Centro Universitário da FEI, PPGA– Programa de Pós-Graduação em Administração, Brasil  
mtereza@fei.edu.br

RENY APARECIDA GALVÃO

Universidade Mogi das Cruzes - UMC, PROGRAD e PROPPGE, Brasil  
reny@umc.br

### **RESUMO**

A indústria extrativa de mineração é muitas vezes considerada de baixa tecnologia e baixa inovação. Isto se deve ao indicador convencional na literatura de inovação, que define se uma indústria é de alta, média ou baixa tecnologia por meio da intensidade de despesas em P&D expressas em percentagem de volume de negócios (Upstil, & Hall, 2006). Nesse contexto, o objetivo dessa pesquisa é analisar a evolução das inovações ambientais na indústria extrativa de minério de ferro para reduzir os impactos ambientais significativos responsáveis por grandes acidentes. Para tanto, foi realizada uma pesquisa qualitativa exploratória, cuja abordagem metodológica utilizada para a pesquisa de campo foi o estudo de caso único realizado em duas unidades de análise da maior mineradora brasileira, que constituiu a amostra teórica sobre a qual os dados da pesquisa foram coletados. Dessa forma, o estudo de caso comparativo dessas unidades possibilitou a compreensão da evolução das inovações ambientais do setor, por meio da avaliação de uma planta mais antiga, que sofreu várias inovações incrementais, e de outra que foi inaugurada recentemente com tecnologias ambientais de ponta. Os investimentos em inovação possibilitaram uma operação de maior eficiência e menor impacto ambiental ao longo das últimas décadas. O sistema de reaproveitamento de minério permitiu reprocessar mais 5,2 milhões de toneladas de minério ultrafino depositado nas barragens, que, sem esta tecnologia, seria desperdiçado. Por outro lado, o armazenamento de rejeitos em barragens é um dos fatores responsáveis pelos grandes acidentes ambientais do setor. A planta S11D, com a extração a seco, não há lavagem do minério e, portanto, não há barragens de rejeito, o que possibilitou a redução de impacto, somado a retirada dos caminhões fora de estrada e outras tecnologias ambientais.

**Palavras chave:** Inovação Tecnológica Ambiental. Indústria Extrativa. Empresas Potencialmente Poluidoras

## 1. INTRODUÇÃO

A extração de recursos naturais criou legados de impactos sociais e ambientais de longo prazo em muitas partes do mundo. Na indústria de mineração, os impactos ambientais associados ao uso da água e energia estão entre os mais importantes, levando a um grande desafio ambiental e necessitando de uma seleção adequada das tecnologias disponíveis (de Faria et al., 2009). Pelas operações terem um tempo de vida finito, a mineração não é uma atividade sustentável e a dependência dos recursos não-renováveis não pode continuar indefinidamente (Sterman *et al.*, 2012). Uma boa gestão das atividades mineradoras poderá contribuir com descobertas tecnológicas necessárias para melhorar os processos deste setor. Ressalta-se que dentre as atividades, a fase de operações é a mais impactante tanto ambientalmente quanto socialmente, exigindo um processo rigoroso e sistemático de identificação de problemas e oportunidades em cada fase (Tuazon *et al.*, 2012). Desta forma, o desenvolvimento de tecnologias proporcionará o uso efetivo dos recursos naturais.

A inovação tecnológica na indústria de minérios contribui em cada etapa, desde a exploração mineral, extração, processamento, abrangendo as questões ambientais relacionadas à produção. A etapa da exploração a cada ano requer uma tecnologia mais sofisticada, em razão da maioria dos depósitos superficiais já terem sido explorados e, portanto, são necessárias técnicas que devem ser adaptadas a diferentes terrenos geológicos e cobertura profunda. Dessa forma, cada vez mais são necessários equipamentos sensíveis e técnicas inovadoras (Upstill, & Hall, 2006).

A indústria extrativa de mineração é muitas vezes considerada de baixa tecnologia e baixa inovação. Isto se deve ao indicador convencional na literatura de inovação, que define se uma indústria é de alta, média ou baixa tecnologia por meio da intensidade de despesas em P&D expressas em percentagem de volume de negócios (Upstil, & Hall, 2006). Pavitt (1984) reconheceu que a inovação dos processos varia conforme o segmento da indústria e, a indústria extrativa de minérios por ser de grande escala, possui suas próprias características.

Nesse contexto, o objetivo dessa pesquisa é analisar a evolução das inovações ambientais utilizadas em indústrias extrativas de minério para reduzir os impactos ambientais significativos responsáveis por grandes acidentes. Para tanto, foi realizada uma pesquisa qualitativa exploratória, cuja abordagem metodológica utilizada para a pesquisa de campo foi o estudo de caso único realizado em duas unidades de análise da maior mineradora brasileira, Vale. Dessa forma, o estudo de caso comparativo possibilitou a compreensão da evolução das inovações ambientais do setor, por meio da avaliação de uma planta mais antiga, que sofreu várias inovações incrementais, e de outra que foi inaugurada recentemente com tecnologias ambientais de ponta. Os investimentos em inovação, possibilitou uma operação de maior eficiência e menor impacto ambiental ao longo das últimas décadas. O sistema de reaproveitamento de minério já permitiu reprocessar mais 5,2 milhões de toneladas de minério ultrafino depositado nas barragens, que, sem esta tecnologia, seria desperdiçado (VALE, 2017). Por outro lado, o armazenamento de rejeitos em barragens é um dos fatores responsáveis pelos grandes acidentes ambientais do setor.

## 2.1. INOVAÇÃO SUSTENTÁVEL NAS INDÚSTRIAS EXTRATIVAS DE MINÉRIO

O estudo realizado por Ford *et al.* (2014) aponta a necessidade de uma estrutura de inovação consistente que deve ir além do cumprimento das regulamentações ambientais, incentivando a indústria extrativa de minerais a desenvolver novos processos e tecnologias, assim como a difusão das melhorias de desempenho.

A importância de minimizar e gerir poluentes na indústria extrativa levou ao surgimento de uma série de inovações tecnológicas, cada uma das quais é altamente eficiente na redução dos resíduos liberados de fontes pontuais (Christie *et al.*, 1999).

A inovação na indústria extrativa internacional desenvolveu-se de forma mais homogênea do que no Brasil, por meio de uma transição paulatina entre os métodos manuais, semimecanizados e mecanizados de lavra. Na Suécia e Finlândia foram registrados grandes avanços no planejamento de lavra em larga escala, de equipamentos de perfuração, carregamento e transporte em subsolo e de automação. Atualmente estas tecnologias dominam as operações e os equipamentos que integram as principais atividades de lavra, incluindo as operações de limpeza, preparação, perfuração, detonação, escavação, carregamento e transporte de minério. As grandes minas a céu aberto e até mesmo minas de porte médio, nos USA, Austrália e Canadá, caracterizam-se por uma intensa utilização de equipamentos de grande porte para as operações de carregamento e transporte, perfuração com furos de diâmetros grandes, explosivos do tipo *blend* bombeados, utilização de GPS, gerenciamento on-line das operações de lavra e pouca mão-de-obra. Equipamentos de grande porte foram adotados em céu aberto provocando os seguintes efeitos: redução da quantidade de caminhões, diminuição da mão-de-obra, aumento da produção e produtividade, acompanhado de uma significativa redução de custos, tornando esses países mais competitivos no mercado internacional (Koppe, 2007).

No Brasil, devido à falta de tecnologia nas operações das empresas, grande quantidade de matéria-prima é perdida na cadeia produtiva, sendo que na fase de extração é de 30% em média. Este tipo de cenário resulta em perdas econômicas significativas, de recursos naturais e de impacto ambiental irreversíveis. Durante a fase de processamento, além da perda de matéria-prima há a liberação do pó fino dos cortes e serração de pedra. Este pó é descartado, juntamente com a água utilizada nesses processos, formando um crescente volume de lama nos locais de trabalho (Silvestre; Neto, 2014). De acordo com Ribeiro *et al.* (2005), esta lama é muitas vezes descartada diretamente no meio natural sem qualquer tratamento. Uma vez que a água se evapora, a poeira seca se espalha, contaminando o ar, as correntes de água e os lagos, levando-se em conta que a descarga de água das minas é um problema recorrente em alguns sistemas de mineração (Cote *et al.*, 2007; Franks *et al.*, 2010).

Em relação ao tratamento de águas residuais na indústria extrativa de minérios, uma série de avanços tecnológicos de tratamento de águas residuais surgiram com o propósito de combater o problema de poluição da água que as operações de mineração enfrentam, como a contaminação de

metais pesados, particularmente o cobre, o cádmio-chumbo e o arsênico, provenientes dos processos de mineração. As cargas aumentam para níveis tóxicos quando a água entra em contato com a rocha exposta e escavada e esses metais são lixiviados e transportados para lagos, rios e riachos. Nos últimos anos as tecnologias desenvolvidas contribuíram para mitigar mais eficazmente esses problemas de poluição da água, dentre os quais destacam-se: métodos eletroquímicos; plasmotecnologias; filtragem de membranas; evaporação e cristalização; processos de biodegradação e; precipitadores químicos (Gavin, 1999).

Estatísticas de produtividade mostram que a taxa de inovação das empresas extrativas minerais pode ser comparada com a de fabricação em geral nos últimos 50 anos. A diferença significativa destaca-se na alta tecnologia que nos últimos doze anos contribuíram para o aumento de produtividade de 9,5% ao ano, contrastando com as taxas de fabricação e de mineração (Bartos, 2007). A indústria extrativa de minerais adota novas tecnologias e inovações, desenvolvidas por terceiros, para uso em suas próprias operações (Hood, 2004) e grande parte dos avanços atuais de produtividade originou-se fora do setor. As indústrias extrativas utilizam-se de novas tecnologias pelo fato de minimizar os custos e riscos associados ao processo (Bartos, 2007). Essa melhoria incremental é uma das características das indústrias de escala intensiva, devido à complexidade dos sistemas de produção, os riscos e falhas associadas às mudanças radicais são potencialmente onerosas (Tidd *et al.*, 2008).

Na indústria extrativa de minerais, o impulso para a introdução e difusão de novas tecnologias e inovações é a melhoria da produtividade por meio da eficiência do processo em toda a cadeia de valor (Garcia *et al.*, 2001). A inovação tecnológica também contribui para a redução dos custos unitários de produção, como exemplo, por meio da descoberta de corpos de minério de maior qualidade ou técnicas de extração e processamento mais confiáveis e de menor custo. Outro fator importante são os esforços do setor para desenvolver métodos de produção, operações e processamento de baixo impacto, produtos mais limpos e mais eficientes (Sweeting, & Clark, 2000).

Para proporcionar o aumento da eficiência, a inovação tecnológica no processo de extração utiliza de equipamentos e de técnicas de controle remoto e de automação que proporcionam um maior nível de segurança aos funcionários. Na fase do processamento o foco da inovação tecnológica é a melhoria da eficiência na recuperação do minério. Nesta fase, as melhorias incrementais fazem uma grande diferença como, por exemplo, a tecnologia de correias transportadoras; a trituração e o desempenho do forno. Grande parte dos ganhos de produtividades nos últimos 35 anos pode ser atribuída às economias de escala associadas a caminhões de grande porte e escavadeiras (Doggett, 2006).

Em relação à inovação tecnológica voltada à proteção ao meio ambiente, as operações de minas e a reabilitação de áreas danificadas são as que demandam maior precaução. A gestão de minas, mudanças nos processos com foco na redução do desperdício, da diminuição da poeira, do ruído, da poluição do ar e da água e danos à biodiversidade são os principais aspectos de pesquisa e de inovação. Por outro lado, a adoção de alguns equipamentos ou novos processos pode levar ao aumento de custos ambientais e sociais na indústria de mineração (Upstil, & Hall, 2006).

### 3. MÉTODO DE PESQUISA

A pesquisa se caracteriza como qualitativa e exploratória, cujo objetivo é analisar a evolução das inovações ambientais utilizadas em indústrias extrativas de minério para reduzir os impactos ambientais significativos responsáveis por grandes acidentes. A abordagem metodológica utilizada para a pesquisa de campo foi o estudo de caso único, com duas unidades de análise, realizado na maior mineradora brasileira, a empresa Vale, que constituiu a amostra teórica sobre a qual os dados da pesquisa foram coletados (Yin, 2015). O estudo de caso busca entender o fenômeno em um determinado contexto, podendo gerar teorias ou contribuir com modelos teóricos já existentes (Eisenhardt, 1989). A construção dos instrumentos de coleta de dados e análise de evidências serão orientadas por proposições teóricas da literatura, buscando identificar as inovações ambientais utilizadas nas indústrias de extração de minério para mitigar impactos ambientais significativos (Yin, 2015).

A escolha da Vale, como amostra teórica, deve-se ao fato de ser a maior produtora mundial de minério de ferro e pelotas, matérias primas para a fabricação de aço. A participação de mercado das extratoras e produtoras de minério de ferro no Brasil está dividida da seguinte maneira: a Vale é responsável por mais de 80% da produção nacional; a Samarco 6%; a CSN 5%; MMX 2%; e Usiminas 2% do total da extração.

As duas unidades de análise selecionadas para o estudo de caso e pesquisa foram: o Complexo de Itabira, no estado de Minas Gerais, composto por sete minas e três usinas; e as operações do Complexo S11D, localizada no município de Canaã dos Carajas no sudeste do Pará, composto por uma mina e uma usina de extração e processamento de minério.

Para garantir a confiabilidade e a validade e do estudo deve-se usar diversas fontes de evidência (Yin, 2015). Nessa pesquisa foram utilizadas as seguintes fontes: entrevistas semiestruturadas, observação não participante, registros em arquivos e documentos.

A entrevista semiestruturada, permite um maior entendimento sobre o tema com roteiro de perguntas previamente definido (Quivy; Campenhoudt, 2008; Flick, 2009). O entrevistado é livre para falar sobre o assunto, sem perder o foco das questões propostas (Creswell, 2010). As entrevistas foram realizadas em julho de 2016, com engenheiros ambientais, com o responsável pela comunicação corporativa, engenheiros de segurança do trabalho, engenheiros de minas e relações institucionais da EFVM.

A observação não participante consiste no levantamento de dados diretamente pelo pesquisador nas indústrias analisadas (Yin, 2015). Por meio da observação o pesquisador tem a oportunidade de obter dados do processo operacional que não foram encontrados em documentos e nas entrevistas (Creswell, 2010). A observação foi realizada no Complexo de Tubarão, no percurso da ferrovia EFVM, de Cariacica a Itabira, e no Complexo de Itabira nas minas de Cauê, em processo de recuperação ambiental, Conceição I e II e Periquito.

Os documentos e registros utilizados como fonte de evidências foram os relatórios de sustentabilidade de 2015 e os relatórios “Memória da tecnologia de mineração em Itabira”, “Tecnologia e Informação” e dados no site da empresa sobre as inovações ambientais da mina S11D de Carajás.

A forma de tratamento dos dados será por meio da triangulação que aumenta a validade e confiabilidade do estudo de caso (Yin, 2015), pois permitir a análise de um fenômeno por meio de diversas fontes de evidência. Os dados obtidos por meio das entrevistas, observação, documentos e registros em arquivos serão triangulados na análise das informações.

## **4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA PESQUISA**

### **4.1 O COMPLEXO DE ITABIRA EM MINAS GERAIS**

A inauguração e exploração mineral da Vale data de 1942 em Itabira, Minas Gerais. O primeiro ciclo, de 1942 a 1972, da extração de hematita, minério de alto teor de ferro para o refino de aço, não necessita de nenhum processo de beneficiamento, mas muito força manual para ser extraída, com pás, enxadas e picaretas. As pedras furadas com o martelo eram detonadas e os pedaços maiores quebrados na marreta. O minério era transportado em balaios e carroças puxadas por burros para carregar os vagões. Era preciso descarregar o minério em outra cidade, pois a ferrovia não chegava até Itabira. Os primeiros equipamentos de transporte foram utilizados em 1944, escavadeiras, perfuratrizes e galeotas colocadas em caminhões de 10 a 15 toneladas. A falta de tecnologia no primeiro ano de funcionamento, resultou na extração de aproximadamente 40 mil toneladas de minério de ferro, quantidade que hoje é produzida por dia (VALE, 2016).

A mecanização da extração do minério de ferro ocorreu em 1951, com a exploração de minério em Dois Córregos e, em 1957, em Conceição. Os primeiros britadores e as correias transportadoras aérea, montadas em suportes de madeira, foram instalados para transportar o minério do britador ao peneiramento. Como a ferrovia ainda não chegava até essas duas unidades, o minério era levado até o carregamento por meio de um sistema de cabos aéreos. Na década de 1960, com crescimento da demanda internacional, foi necessário a criação do sistema mina, ferrovia e porto, que possibilitou a Vale deter um sistema logístico integrado. Em 1966, a inauguração do Porto de Tubarão em Vitória (ES) aumentou a capacidade instalada em 10 vezes e 80% das exportações, pelo acesso de navios graneleiros de grande porte. No primeiro ano de funcionamento do sistema foi possível escoar 2,9 milhões de toneladas de minério – volume que hoje já ultrapassa as 120 milhões de toneladas. Atualmente, apenas quatro portos no mundo têm a capacidade do Porto de Tubarão.

Em 1965 foi criado o Laboratório Mecânico de Minério para o desenvolvimento de tecnologias, medição da concentração de itabirito e controle da qualidade e aproveitamento dos finos de hematita e os itabiritos friáveis, resíduos presentes na lavra e descartado no processo de extração da hematita pelo baixo teor de ferro. A medida em que a proporção do estéril torna-se maior que a hematita surgiu a necessidade de pesquisas sobre como aproveitar esse minério mais pobre (VALE, 2016).

Na década de 1970, no segundo ciclo, foram inauguradas duas usinas de concentração do Complexo de Itabira, Cauê e Conceição I, com novas tecnologias capazes de manter o teor de ferro, por meio do beneficiamento do itabirito friável, recuperando os depósitos e dobrando a produção para a produção de sinter e *pellet feed*. A usina de concentração de itabiritos friáveis de Cauê começou a operar em 1972. A estrutura do separador magnético a úmido de alta intensidade foi importada da Alemanha e projetado para 50 toneladas, mas com as adaptações chegou a 140 toneladas. Cauê abriu caminhos para a tecnologia no país, foi a primeira usina de beneficiamento de minério a úmido do Brasil.

No ano seguinte à inauguração da usina Cauê, iniciou a construção da usina de Conceição, em 1974. Com capacidade de processar 28 milhões de toneladas por ano, o projeto incluiu a construção de novas instalações mecanizadas de tratamento do minério, de um sistema único de britagem terciária e peneiramento, uma planta de classificação a seco e a úmido dos finos de hematita e de uma usina para concentração dos finos do itabirito. A usina contava com um sistema de controle de processos integrado por um computador e vários controladores programáveis – de forma pioneira na área de mineração da América Latina.

Nas décadas de 1980 e 1990 houve um aumento de itabiritos compactos e a Vale passou a acumular para ser aproveitado no futuro, na expectativa de que novas técnicas de moagem e tecnologias mais modernas de automação possibilitariam a lavar o estéril. Pensando no valor econômico do futuro, passaram a separar a hematita, o itabirito, o estéril de itabirito (material duro), o estéril xisto do estéril franco e não misturar ao estéril franco, que é todo material que não pertence à formação ferrífera.

Na década de 1980, houve o avanço do sistema de automação e a implantação do processo de flotação, que é uma das formas de beneficiamento do minério que consiste na separação de diferentes partículas por meio de processo físico químico (VALE, 2016). Em 1985, a usina de Cauê passou pela primeira alteração nas instalações para a implantação do processo de flotação para atingir teores impostos pelo mercado e aproveitar o minério.

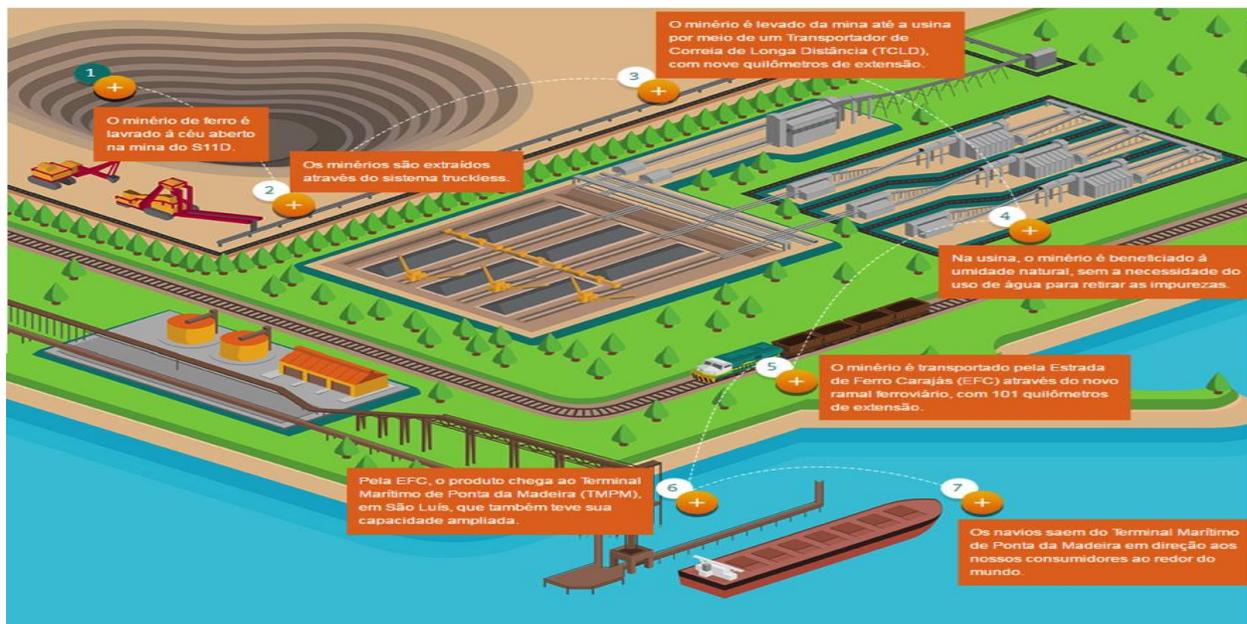
Na década de 1990 houve um significativo aumento de estocagem de minério que ainda não podia ser beneficiado pelas usinas e, a partir de 2000, a empresa começa a processar o itabirito compacto, com baixo teor de ferro, por meio da implantação da moagem com a construção de uma usina e a adequação das instalações de tratamento existentes em Cauê e Conceição (VALE, 2016).

O terceiro ciclo de inovação, inicia a partir de 2013, quando a Usina Conceição II e as Usinas Cauê e Conceição I iniciaram as operações com adequações no processo para o beneficiamento de minério de baixo teor. O ano de 2016 marca um novo ciclo produtivo, a produção do complexo de Itabira com a produção em itabiritos compactos (VALE, 2016).

## **4.2 O COMPLEXO S11D DE CANAÃ DOS CARAJÁS**

O complexo S11D é a maior unidade mineradora da Vale e iniciaram as operações em dezembro de 2016 no município de Canaã dos Carajás no Estado do Pará. O minério é lavrado em uma mina a céu aberto com escavadeiras e britadores móveis. O minério bruto é britado, fragmentado em pedaços menores, e enviados para a usina de processamento ou para as pilhas por Transportador de Correia de Longa Distância com 9,5 quilômetros de comprimento. Na usina, o minério de ferro é beneficiado à seco, sem o uso de água e, na sequência, transportado por 101 quilômetros pela Estrada de Ferro Carajás (EFC) até o Porto de Ponta da Madeira (TMPM), em São Luís do Maranhão. O produto final é vendido separadamente ou misturado (blendagem) ao minério do Sistema Sul e Sudeste, de Minas Gerais, em centros de distribuição e armazenamento no exterior, como mostra a Figura 1 (VALE, 2017).

Figura 1



Fonte: Vale (2016)

O empreendimento incorporou inovações tecnológicas ambientais, com ganho de produtividade e maior eficiência na operação, proporcionado principalmente pelo fato do minério ser de alta qualidade. As rochas encontradas em Carajás são formadas, em média, por 67% de teor de minério de ferro, o mais alto do planeta. O desempenho ambiental da unidade está relacionado às inovações tecnológicas ambientais de processos incorporadas à planta, entre essas tecnologias destaca: a movimentação de minério é feito por meio do Sistema *Truckless*, sem o uso de caminhões fora de estrada; e o tratamento do minério é realizado a seco (VALE, 2017).

O sistema *truckless* substituiu os britadores fixos e os caminhões fora de estradas por britadores móveis e correias transportadoras. Com o transporte do minério de ferro por meio de Transportadores de Correias de Longa Distância, os caminhões não são necessários. Uma estrutura composta de escavadeiras e britadores móveis extrai o minério de ferro e alimenta 30 quilômetros

de correias transportadoras, que levam o produto até a usina de processamento. Esse novo sistema substituiu 100 caminhões fora de estrada, que seriam necessários para a extração do minério, e diminuiu a quantidade de resíduos, como pneus, filtros e lubrificantes e, aproximadamente, 70% do consumo de diesel e 50% das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Ressalta-se que esses processos têm foco na redução do desperdício, da diminuição da poeira, do ruído, da poluição do ar e danos à biodiversidade e são os principais aspectos de pesquisa e de inovação (Upstil, & Hall, 2006).

O beneficiamento a seco elimina o uso de água, utilizando a própria umidade do minério para extrair as impurezas. Comparado ao processo convencional, essa tecnologia reduz o consumo de água em 93%. “A vantagem é a eliminação de barragens de rejeito, já que o ultrafino de minério com alto teor de ferro, que iria para a barragem, não será descartado, permitindo que, em 30 anos de vida útil da mina, 300 milhões de toneladas sejam incorporados à produção” (VALE, 2017).

Essa tecnologia e a rede de automação reduz também o consumo de energia elétrica, com o uso de dispositivos inteligentes que adequam o suprimento de matéria-prima de acordo com as demandas do processo, desativando equipamentos e pontos de consumo não necessários em situações de pouca demanda. (VALE, 2017).

Outra tecnologia incorporada ao processo produtivo, que não está diretamente relacionada ao desempenho ambiental, foi a utilização de Drone e o uso de simuladores. O drone faz levantamentos aerofotogramétricos aumentando a precisão e agilidade das atividades de topografia e apoiando o planejamento das áreas de mina, usina e pilhas de minério. O simulador é utilizado para o treinamento de operadores de carregamento de vagões com minério, que iniciam as atividades no campo preparado. Ações estas, ressaltadas por Doggett (2006) que para proporcionar o aumento da eficiência, a inovação tecnológica no processo de extração utiliza de equipamentos e de técnicas de controle remoto e de automação que proporcionam um maior nível de segurança aos funcionários (VALE, 2017).

*Quadro 1: Ciclos de Inovação ambiental de processo da Vale*

Ciclos do minério	Teor de ferro	Sistemas de Transporte	Tecnologias de Beneficiamento do minério e produção
<b>Primeiro Ciclo (1942 a 1972)</b>			
1942 a 1950	<b>Hematita:</b> Minério de alto teor de ferro para o refino de aço Usinas: Dois Córregos e	Muito esforço braçal para ser extraída a hematita (pás, enxadas e picaretas) e transportada em balaio e carroças até os vagões de trem Galeotas em caminhões de 10 a 15 toneladas (1944).	- Nenhum processo de beneficiamento - Não exige processos industriais - Escavadeiras e perfurantes (1944) - 40 mil toneladas de minério no primeiro ano de funcionamento (equivalente a um dia de produção de 2017).
1951 a 1972	Conceição	- Correias transportadoras aéreas, montada em suportes de madeiras - Sistema logístico integrado (1966) mina, ferrovia e porto Tubarão (ES)	- Mecanização da extração de minério - Primeiros britadores e peneiramento - Aumentou capacidade em 10 vezes (2,9 milhões de ton., sendo 80% exportação)

		Navios graneleiros de grande porte.	- Criação Laboratório de Minério (1965).
<b>Segundo Ciclo (1972 a 2012)</b>			
Década de 70	<b>Finos de hematita e Itabiritos friáveis:</b> Minério mais pobre Usinas: Conceição I, Cauê e Complexo de Itabira	Caminhão e britadeira	- Automação do processo de separação do minério úmido, por meio magnético, gravídico e físico-químico (flotação) Produção do sinter e <i>pellet feed</i> - Usina de Beneficiamento a úmido do itabirito friável, recuperação de depósitos; - Separador magnético a úmido de alta intensidade aprimorado na planta - Sistema de controle de processos integrado por um computador e controladores programáveis - 28 milhões de toneladas ano
Década de 80, 90 e 2000		Britadores fixos - Caminhões fora de estrada	- Avanço no sistema de automação - Implantação do sistema de flotação para atingir maiores teores de ferro
<b>Terceiro Ciclo (a partir de 2013)</b>			
Projeto Itabira	<b>Itabirito compacto:</b> Baixo teor de ferro, minério mais duro e compacto	- Adequação das instalações de tratamento existentes em Cauê e Conceição	Implantação da moagem para processar o itabirito compacto. Estocagem de minério
S11D	<b>Hematita Ultrafino de minério:</b> Alto teor de ferro	- Movimentação de minério, por meio do Sistema <i>Truckless</i> , sem o uso de caminhões fora de estrada;	- Tratamento do minério é realizado a seco - Beneficiamento a umidade natural convencional.
		- Britadores móveis e correias transportadores, por meio de Transportadores de Correias de Longa Distância, TCLD.	- Rede de automação - Uso de dispositivos inteligentes - Uso de inversores de frequência,

Fonte: Elaborado pelas autoras (2017) com dados da pesquisa

O primeiro ciclo, de 1942 a 1972, da extração de hematita, minério de alto teor de ferro para o refino de aço, não necessita de nenhum processo de beneficiamento, mas muito força manual para ser extraída, com pás, enxadas e picaretas. As pedras furadas com o martelo eram detonadas e os pedaços maiores quebrados na marreta. O minério era transportado em balaio e carroças puxadas por burros para carregar os vagões. A falta de tecnologia no primeiro ano de funcionamento, resultou na extração de aproximadamente 40 mil toneladas de minério de ferro.

No segundo ciclo, foram inauguradas duas usinas de concentração com novas tecnologias capazes de manter o teor de ferro, por meio do beneficiamento do itabirito friável, recuperando os depósitos e dobrando a produção para a produção de sinter e *pellet feed*. Houve o avanço do sistema de automação e a implantação do processo de flotação, que é uma das formas de beneficiamento do minério que consiste na separação de diferentes partículas por meio de processo físico químico.

O terceiro ciclo de inovação, inicia a partir de 2013, quando iniciaram as operações com adequações no processo para o beneficiamento de minério de baixo teor. O S11D incorporou inovações tecnológicas ambientais, com ganho de produtividade e maior eficiência na operação ao

utilizar o sistema truckless, britadores móveis e transportadores de longa distancia. As inovações ambientais de processo proporcionam redução de 93% do consumo de água, 50% das emissões de Gases do Efeito Estufa e 70% do consumo de diesel. Além de economia de 18mil MWh/ano de eletricidade por ano; reutilização de 86% da água captada; 97% das atividades fora da área da Floresta Nacional de Carajás, “as minas ocupam apenas 3% da Floresta Nacional de Carajás, o restante é protegido em parceria com os institutos ICMBio e Ibama, do Brasil” (VALE, 2017).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foi possível concluir que a empresa analisada introduziu inovações em todas as etapas da mineração, desde inovações incrementais às inovações radicais no projeto S11D, em Canaã dos Carajás.

As indústrias extrativas de mineração têm enfrentado uma série de desafios, desde a necessidade de descobrir novos depósitos para substituir os recursos esgotados quanto aos métodos mais eficientes para reduzir o impacto ambiental nas etapas de processo e processamento dos minerais, exigindo grande inovação tecnológica. A inovação tecnológica desempenha um papel importante no aumento da produtividade, iniciando na etapa da exploração ao descobrir novas reservas com grau superior de minério, ao desenvolver melhores métodos de extração e de controle de qualidade no processamento de minerais.

Os investimentos em inovação, aliados à experiência da Vale no setor, possibilitou uma operação de maior eficiência e menor impacto ambiental ao longo das últimas décadas, acompanhando a indústria extrativa internacional que foi remodelada devido às grandes empresas que entraram no mercado e foram reestruturadas para atender às novas oportunidades globais.

Ressalta-se que a empresa adaptou a inovação aos requisitos sustentáveis e que os seus projetos foram se adequando às premissas ambientais. No caso específico do S11D, tanto o estéril quanto a canga para a área de pilhas ficaram localizados fora da Floresta Nacional de Carajás, graças à tecnologia das correias transportadoras, trazendo ganho ambiental ao aliar tecnologia e engenharia ao processo ambiental.

Outro destaque é a aplicação de inovações utilizadas em outras áreas industriais por meio de uma pesquisa colaborativa, como foi o caso da tecnologia *truckless*, que é muito utilizada na lavra de carvão, mas seu uso é inédito em uma operação de minério de ferro com as dimensões do S11D.

As mudanças globais apontam para a necessidade de novos sistemas de gestão da inovação nas indústrias extrativas de minérios, com o intuito de melhorar os processos existentes, aproveitando o potencial das novas tecnologias para melhorar a eficiência ao longo de toda a cadeia de valor, e assim, obter uma maior vantagem competitiva.

## REFERÊNCIAS

- Angelo, F. D.; Jabbour, C. J. C.; Galina, S. V. R. (2011). Inovação ambiental: das imprecisões conceituais a uma definição comum no âmbito da Gestão Ambiental proativa. *GEPROS - Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, 6(4), 143-155.
- Bansal, P. (2005). Evolving sustainably: a longitudinal study of corporate sustainable development. *Strategic Management J.*, 26: 197–218. Extraído de: doi:10.1002/smj.441
- Bartos, P. J. (2007) Is mining a high-tech industry? *Resources Policy*, 32, 149–158. Extraído de: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2007.07.001>
- Blok, K., Huijbregts, M., & Roes, L., (2013). *A Novel Methodology for the Sustainability Impact Assessment of New Technologies*. Tech. Rep. PROSUITE: Development and Application of a Standardized Methodology for the Prospective Sustainability Assessment of Technologies. European Union.
- Casagrande, E. F. (2004) Inovação Tecnológica e Sustentabilidade: possíveis ferramentas para uma necessária interface. In: Encontro da Associação Nacional de Programas de Pós-Graduação em Administração, Curitiba: *Anais da Enanpad*.
- Creswell, John W. (2010) *Projeto de Pesquisa: Métodos Qualitativo, Quantitativo e Misto*, Porto Alegre: Artmed
- Elkington, J. (2012). *Canibais com garfo e faca*. São Paulo: Makron Books.
- Daroit, D.; Nascimento, L. F. (2000) A busca da qualidade ambiental como incentivo à produção de inovações. In: EnANPAD, 2000. *Anais...* Rio de Janeiro: ANPAD.
- De Faria, D.C., *et al.* (2009). Optimization of water networks in industrial processes. *Journal of Cleaner Production*, 17, 857-862.
- Feldmann, F. (2003) A parte que nos cabe: Consumo Sustentável. In: Trigueiro, A. (coord.). *Meio Ambiente no século 21*. Rio de Janeiro: Sextante.
- Ford, J. A., Steen, J., & Verreynne, M. L. (2014). How environmental regulations affect innovation in the Australian oil and gas industry: going beyond the Porter Hypothesis. *Journal of Cleaner Production*, 84, 204-213. Extraído de: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.062>
- Frondel *et al.* (2008) An empirical comparison of environmental innovation decisions across OECD countries. *Business Strategy and the Environment*, 16 (8), 571-584
- Hall, J.; Vredenburg, H. (2003) The Challenges of Innovating for Sustainable Development. *MIT Sloan Management Review*, 45(1), 60-68.
- Hansen, E. G.; Grosse-Dunker, F.; Reichwald, R. (2009) Sustainability innovation cube: a framework to evaluate sustainability-oriented innovations. *International Journal of Innovation Management*, Austria.
- Hart, S. L. (1997). Beyond Greening: Strategies for a Sustainable World. *Havard Business Review*, 75(1), 66-76.
- Hart, S. L., Milstein, M. B. (2004). Criando valor sustentável. *RAE Executivo*, 3(2).
- Hood, M., 2004. Advances in hard rock mining technology. In: Proceedings of the Mineral Economics and Management Society, *13th Annual Conference*, 21–23 April 2004, 22pp
- Kammerer, D. (2009) The effects of customer benefit and regulation on environmental product innovation. Empirical evidence from appliance manufacturers in Germany. *Ecological Economics*, 68, 2285-2295.
- Kemp, R. & Arundel, A. (1998). *Survey indicators for environmental innovation*. Idea Paper Series.
- Kemp, R., & Pearson P. (2007) *Final Report MEI project about measuring Eco-innovation*. Maastricht. Extraído de: <http://www.merit.unu.edu/MEI2008>.
- Kemp, R., Smith, K., & Becher, G. (2000). How should we study the relationship between regulation and innovation? In J. Hemmelskamp, K. Rennings, & F. Leone (Eds.), *Innovation-oriented environmental regulation: theoretical approaches and empirical analysis* (pp. 43-66). Heidelberg-New York: Phisica Verlag.
- Larson, A. L. (2000) Sustainable innovation through an entrepreneurship lens. *Business Strategy and the Environment*, 9, 304–317.
- Leonard-Barton, D. (1988). Implementation as a mutual adaptation of technology and organization. *Research Policy*, 17, 251-267.
- Munasinghe, M. (2002) The sustainomics trans-disciplinary meta-framework for making development more sustainable: applications to energy issues. *Internacional Journal Sustainable Development*, Inglaterra, 5, 126-184.
- OCDE. (2005). *Manual de Oslo*. 3ª ed. FINEP/OECD.
- Oltra, V. & Jean, M. S. (2009) Sectoral systems of environmental innovation: An application to the French automotive industry. *Technological Forecasting & Social Change*, 76, 567-583

- Pavitt, K. 1984. Sectoral Patterns of Technical Change: Towards a Taxonomy and a Theory. *Research Policy* 13, 343-373.
- Pimentel, B. S., Gonzalez, E. S. & Barbosa, G. N. O. (2015) Decision-support models for sustainable mining networks: fundamentals and challenges, *Journal of Cleaner Production* 112 (2016), 2145-2157. Extraído de: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.023>
- Pinsky, V.C., Moretti, S.L.A., & Kruglianskas, I. Benefícios sociais, privados e inovação sustentável: uma revisão exploratória da literatura. *Anais...* São Paulo: XIV SEMEAD, 2013.
- Porter, M. E., & Linde, C. (1995). Towards a New Conception of the Environment Competitiveness Relationship. *Journal of Economic Perspectives* 9(4), 97-118.
- Rennings, K. (2000) Redefining Innovation – eco-innovation research and the contribution from ecological economics. *Ecological Economics*, 32, 319-332. Extraído de: [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00112-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00112-3)
- Rennings, K.; Zwick, T. (2003). *Employment Impacts of Cleaner Production*. Heidelberg, ZEW Economic Studies, 21.
- Sbicca, A.; Pelaez, V. (2006); Sistemas de inovação. In: Pelaez, V.; Szmrecsányi, T. (Org.). *Economia da Inovação Tecnológica*. São Paulo: Hucitec - Ordem dos Economistas do Brasil. Cap. 17, p. 415-448.
- Schot, J & Geels, F. W. (2008) Strategic niche management and sustainable innovation journeys: theory, findings, research agenda and policy. *Technology Analysis & Strategic Management*, 20 (5) 537-554.
- Schumpeter, J. (1982) *A Teoria do desenvolvimento econômico*. São Paulo; Abril Cultural.
- Seuring, S., & Muller, M., (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16 (15), 1699-1710. Extraído de: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.020>
- Serman, J.D., 2012. Sustaining sustainability: creating a systems science in a fragmented academy and polarized world. In: Weinstein, M., Turner, R. (Eds.), *Sustainability Science: the Emerging Paradigm and the Urban Environment*, Springer Science Business Media, LLC.
- Stern, N. (2007) *The economics of the climate change: The Stern review*. Cambridge: Cambridge University Press
- Sundbo J. (1997) Management of Innovation in Services, *The Service Industries Journal*, 17(3), 432-55.
- Sweeting, A. R & Clark A. P. (2000) *Lightening the Lode: A Guide to Responsible Large-scale Mining*, Washington, DC: Conservation International.
- Tidd, J., Bessant, J. & Pavitt, K. (2008) *Gestão da Inovação*. Porto Alegre: Bookman.
- Tuazon, D., Corder, G., Powell, M., & Ziemski, M., (2012). A practical and rigorous approach for the integration of sustainability principles into the decision-making processes at minerals processing operations. *Minerals Engineering*, 29, 65-71. Extraído de: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2011.10.017>
- Upstill, G. & Hall, P. (2006) Innovation in the Minerals Industry: Australia in a Global Context. *Resources Policy*, 31, 137-145. Extraído de <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2006.12.002>
- Yin, R. K. (2015) *Estudo de Caso: Planejamento e Métodos*, Porto Alegre: Bookman.

