

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS, INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E BIOFARMACÊUTICA

OTTAVIO RAUL DOMENICO RIBERTI CARMIGNANO

INOVAÇÃO NO SETOR DE MINERAÇÃO DE FERRO EM MINAS GERAIS COM FOCO NA
DESTINAÇÃO DE REJEITOS

Belo Horizonte
2021

Ottavio Raul Domenico Riberti Carmignano

Inovação no setor de mineração de ferro em Minas Gerais
com foco na destinação de rejeitos

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Doutor em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica.

Área de Concentração: Gestão da Inovação, Propriedade Intelectual e Empreendedorismo.

Linha de Pesquisa: Inovação Tecnológica.

Orientador: Prof. Dr. Rochel Montero Lago.

Coorientador: Prof. Dr. Ulisses Pereira dos Santos.

Belo Horizonte

2021

Carmignano, Ottavio Raul Domenico Riberti

Inovação no setor de mineração de ferro em Minas Gerais com foco na destinação de rejeitos [manuscrito] / Ottavio Raul Domenico Riberti Carmignano. 2021.

113 f. : il., gráfs., tabs.

Orientador: Rochel Montero Lago.

Coorientador: Ulisses Pereira dos Santos.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Química (Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica).
Inclui bibliografia.

1. Inovações tecnológicas – Teses. 2. Minérios de ferro – Minas e mineração – Minas Gerais – Teses. 3. Resíduos – Minérios de ferro – Reaproveitamento (Tecnologia química) – Teses. 4. Ferro – Minas e mineração – Teses. 5. Máquinas de mineração – Patentes – Teses. 6. Propriedade intelectual – Teses. 7. Cooperativas de mineração – Teses.
I. Lago, Rochel Montero, Orientador. II. Santos, Ulisses Pereira dos, Coorientador. III. Título.

CDU 043



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
**Programa de Pós Graduação em Inovação
Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG**

**ATA DA SESSÃO DE DEFESA DA 13ª TESE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E BIOFARMACÊUTICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS
GERAIS, DO DISCENTE OTTAVIO RAUL DOMENICO RIBERTI CARMIGNANO, Nº DE REGISTRO
2016752321.**

Aos 28 (vinte e oito) dias do mês de maio de 2021, às 14 horas, na plataforma on-line Google Meet, reuniu-se a Comissão Examinadora composta pelos Professores Doutores: Rochel Montero Lago do Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG (Orientador), Ulisses Pereira dos Santos do Departamento de Ciências Econômicas da UFMG (Coorientador), Fernando Soares Lameiras do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN, Luiz Claudio de Melo Costa do SENAI – FIEMG, Márcia Siqueira Rapini do Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG e Rosana Zacarias Domingues do Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG, para julgamento da Tese de Doutorado em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica - Área de Concentração: Gestão da Inovação, Propriedade Intelectual e Empreendedorismo do discente Ottavio Raul Domenico Riberti Carmignano, Tese intitulada: **“INOVAÇÃO NO SETOR DE MINERAÇÃO DE FERRO EM MINAS GERAIS COM FOCO NA DESTINAÇÃO DE REJEITOSO.”** Presidente da Banca abriu a sessão e apresentou a Comissão Examinadora, bem como esclareceu sobre os procedimentos que regem da defesa pública de tese. Após a exposição oral do trabalho pelo discente e arguição pelos membros da Banca Examinadora na ordem registrada acima, com a respectiva defesa do candidato. Finda a arguição, a Banca Examinadora se reuniu, sem a presença do discente e do público, tendo deliberado unanimemente pela sua **APROVAÇÃO**. Nada mais havendo para constar, lavrou-se e fez a leitura pública da presente Ata que segue assinada por mim e pelos membros da Comissão Examinadora e pelo Coordenador do Programa (via Sistema Eletrônico de Informações – SEI). Belo Horizonte, 28 de maio de 2021.

Professor Doutor Rochel Montero Lago
(PPG em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG)

Professor Doutor Ulisses Pereira dos Santos
(Departamento de Ciências Econômicas da UFMG)

Professor Doutor Fernando Soares Lameiras
(Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN)

Professor Doutor Luiz Claudio de Melo Costa
(SENAI – FIEMG)

Professora Doutora Márcia Siqueira Rapini
(PPG em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG)

Professora Doutora Rosana Zacarias Domingues
(PPG em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG)

Professor Doutor Rubén Dario Sinisterra Millán
Coordenador do PPG em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG



Documento assinado eletronicamente por **Rosana Zacarias Domingues, Membro**, em 31/05/2021, às 07:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Claudio de Melo Costa, Usuário Externo**, em 09/06/2021, às 18:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Soares Lameiras, Usuário Externo**, em 11/06/2021, às 06:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rochel Montero Lago, Professor do Magistério Superior**, em 18/06/2021, às 12:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcia Siqueira Rapini, Professora do Magistério Superior**, em 18/06/2021, às 15:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ulisses Pereira dos Santos, Coordenador(a) de curso**, em 18/06/2021, às 18:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ruben Dario Sinisterra Millan, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 22/06/2021, às 13:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0752321** e o código CRC **1668A4ED**.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
**Programa de Pós Graduação em Inovação
Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG**

**“INOVAÇÃO NO SETOR DE MINERAÇÃO DE FERRO EM MINAS GERAIS COM FOCO NA
DESTINAÇÃO DE REJEITOS.”**

OTTAVIO RAUL DOMENICO RIBERTI CARMIGNANO, Nº DE REGISTRO 2016752321.

Tese Aprovada pela Banca Examinadora constituída pelos Professores Doutores:

Professor Doutor Rochel Montero Lago
(PPG em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG)

Professor Doutor Ulisses Pereira dos Santos
(Departamento de Ciências Econômicas da UFMG)

Professor Doutor Fernando Soares Lameiras
(Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN)

Professor Doutor Luiz Claudio de Melo Costa
(SENAI – FIEMG)

Professora Doutora Márcia Siqueira Rapini
(PPG em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG)

Professora Doutora Rosana Zacarias Domingues
(PPG em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG)

Belo Horizonte, 28 de maio de 2021.

	Documento assinado eletronicamente por Rosana Zacarias Domingues, Membro , em 31/05/2021, às 07:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 .
	Documento assinado eletronicamente por Luiz Claudio de Melo Costa, Usuário Externo , em 09/06/2021, às 18:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 .
	Documento assinado eletronicamente por Fernando Soares Lameiras, Usuário Externo , em 11/06/2021, às 06:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 .
	Documento assinado eletronicamente por Rochel Montero Lago, Professor do Magistério Superior , em 18/06/2021, às 12:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 .
	Documento assinado eletronicamente por Marcia Siqueira Rapini, Professora do Magistério Superior , em 18/06/2021, às 15:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 .
	Documento assinado eletronicamente por Ulisses Pereira dos Santos, Coordenador(a) de curso , em 18/06/2021, às 18:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 .
	Documento assinado eletronicamente por Ruben Dario Sinisterra Millan, Coordenador(a) de curso de pós-graduação , em 22/06/2021, às 13:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 .
	A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 , informando o código verificador 0752327 e o código CRC 2C537295 .

AGRADECIMENTOS

Aos Professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Inovação Tecnológica da Universidade Federal de Minas Gerais.

DEDICATÓRIA

À minha família.

RESUMO

O setor de mineração de ferro é fundamental para a economia de Minas Gerais, e a geração de enormes quantidades de rejeitos é um problema ambiental relevante para o estado. Entender e estruturar um sistema de inovação para desenvolver inovações tecnológicas para a destinação desses rejeitos é atualmente um tópico de extrema relevância.

Nesta tese, foram estudados três tópicos relativos aos rejeitos gerados na mineração de ferro: (i) o sistema de inovação existente em Minas Gerais com foco na destinação desses rejeitos; (ii) as diferentes tecnologias e aplicações existentes na literatura científica e de patentes para esses rejeitos; e (iii) plataformas de inovação colaborativas com foco na destinação desses rejeitos com o caso da Plataforma R3.

O Capítulo 1 apresenta o referencial teórico sobre sistemas de inovação.

O Capítulo 2 descreve o sistema regional de inovação na atividade de mineração no Quadrilátero Ferrífero baseado em pesquisa na literatura especializada sobre sistemas regionais de inovação, análises setoriais, cadeia produtiva, inovação na área de mineração. Também foram realizadas entrevistas semiestruturadas com diferentes atores da cadeia produtiva da atividade mineral, como funcionários de mineradoras e de empresas fornecedoras de produtos e de serviços e consultores técnicos. Os resultados obtidos indicam que a mineração em Minas Gerais possui muitas características importantes para o desenvolvimento de um robusto Sistema Regional de Inovação. O mapeamento mostrou que há uma grande concentração de mercado, sendo que uma das empresas possui quase 80% da produção nacional, com atuação global. Por outro lado, existe uma diversidade nas organizações do Sistema Regional de Inovação, como universidades e centros de pesquisa públicos e privados, órgãos de fomento atuantes, além de associações técnicas, sindicatos e outras organizações. O trabalho também confirmou a grande relevância para a inovação dos fornecedores de equipamentos e de serviços da cadeia de mineração, sendo eles os principais agentes depositantes de patentes do setor. Outro aspecto relevante observado foi a deficiência de políticas públicas de estímulo à inovação no setor de mineração que poderiam levar ao aproveitamento dos rejeitos gerados pela mineração como matéria-prima de segunda geração para outras cadeias produtivas.

No Capítulo 3, são descritas a geração de rejeitos da mineração de ferro no mundo e a composição desses rejeitos com o mapeamento através de artigos científicos. Foi realizado também um levantamento em bancos de patentes com mais de 20 grupos de tecnologias para a transformação de rejeitos da mineração em produtos, além de serem apresentados alguns exemplos reais de aplicação. Mapeamentos nos bancos INPI, Worldwide Spacenet, USTPO, CIPO, APO mostraram que perto de 61% das patentes é de reprocessamento, 29% de construção civil/pavimentação e 10% para aplicações tecnológicas. O texto aborda também uma análise preliminar do percurso dessas tecnologias até o mercado e avalia dois tipos de barreiras: tecnológicas e de mercado.

O Capítulo 4 descreve e avalia a Plataforma colaborativa R3 Mineral criada para gerar inovações para a destinação de rejeitos da mineração de ferro, que foi um movimento inédito em Minas Gerais em que participaram diferentes atores relacionados à cadeia

da mineração. O texto compara a Plataforma R3 a outras duas plataformas internacionais, *i.e.*, a AMIRA na Austrália e a CEMI no Canadá.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões e contribuições para estudos futuros.

ABSTRACT

The iron mining sector is fundamental to the economy of Minas Gerais, and the generation of huge amounts of tailings is a relevant environmental problem for the state. Understanding and structuring an innovation system to develop technological innovations for the disposal of these tailings is currently an extremely relevant topic.

In this thesis, three topics related to tailings generated in iron mining were studied: (i) the existing innovation system in Minas Gerais with a focus on the destination of these tailings; (ii) the different technologies and applications existing in the scientific and patent literature for these wastes; and (iii) collaborative innovation platforms focused on the destination of these tailings with the case of Platform R3.

Chapter 1 presents the theoretical framework on innovation systems.

Chapter 2 describes the regional innovation system in mining activity in the Quadrilátero Ferrífero based on research in the specialized literature on regional innovation systems, sectoral analyzes, production chain, innovation in the mining area. It was also carried out a series of semi-structured interviews with different actors in the activity's production chain mineral, as employees of mining companies and companies that supply products and services and technical consultants. The results obtained indicate that mining in Minas Gerais has many important characteristics for the development of a robust Regional Innovation System. The mapping showed that there is a great concentration of the market, with one of the companies having almost 80% of the national production, with global operations. On the other hand, there is a diversity in the organizations of the Regional Innovation System, such as universities and public and private research centers, active development agencies, in addition to technical associations, unions and other organizations. The work also confirmed the great relevance in innovation of equipment and service suppliers in the mining chain, being the main patent filing agents in the sector. Another relevant aspect observed was the lack of public policies to stimulate innovation in the mining sector that could lead to the use of the tailings generated by mining as a second-generation raw material for other production chains.

In Chapter 3, the generation of iron mining tailings in the world is described and the composition of these tailings with mapping through scientific articles and patents of more than 20 technologies for the transformation of mining tailings into products, in addition to presenting some real application examples. Mappings in the INPI, Worldwide Spacenet, USTPO, CIPO, APO banks showed that close to 61% of patents are for reprocessing, 29% for civil construction / paving and 10% for technological applications. The text also addresses a preliminary analysis of the path of these technologies to the market and evaluates two types of barriers: technological and market.

Chapter 4 describes and evaluates the collaborative R3 Mineral Platform created to generate innovations for the disposal of iron mining tailings, which was an unprecedented movement in Minas Gerais in which different actors related to the mining chain participated. The text compares Platform R3 to two other international platforms, i.e. AMIRA in Australia and CEMI in Canada. For the R3 Mineral Platform, it is

necessary to establish a governance model and improve internal and external communication, and attract new participants, specially suppliers from the mineral extraction chain and associations representing the mineral sector.

Chapter 5 presents the conclusions and contributions for future studies.

<u>LISTA DE FIGURAS</u>	<u>Pág.</u>
FIGURA 1: Relação entre os sistemas de inovação	24
FIGURA 2: Mapa mundial indicando a localização dos depósitos economicamente viáveis de minério de ferro	47
FIGURA 3: Fluxograma típico de beneficiamento de minério de ferro	49
FIGURA 4: Estruturas tridimensionais das principais fases de minério de ferro encontradas em rejeitos	55
FIGURA 5: Modelos de casas usando rejeitos de minério de ferro em projetos de colaboração entre a UFMG/Samarco/Gerdau	61
FIGURA 6: Imagens de produtos de geopolímeros	65
FIGURA 7: Diagrama de barreiras tecnológicas e de mercado para tecnologias de aproveitamento de rejeitos de minérios de ferro	78
FIGURA 8: Composição da Plataforma R3 Mineral	87
FIGURA 9: Composição da Plataforma AMIRA	90
FIGURA 10: Composição da Plataforma CEMI	92

<u>LISTA DE TABELAS</u>	<u>Pág.</u>
TABELA 1: Principais empresas mineradoras de minério de ferro instaladas no QFMG em 2018	33
TABELA 2: Principais fornecedores das empresas mineradoras, origem e participação no mercado em 2018	34
TABELA 3: Tipos de transferência de tecnologias usados pelas mineradoras brasileiras no período de 2004 a 2019	38
TABELA 4: Análises químicas obtidas por XRF de diversos rejeitos de minério de ferro	53
TABELA 5: Parâmetros da fração hiperfina	57

LISTA DE QUADROS	Pág.
QUADRO 1: Sistemas de Inovação Setorial, Regional, Nacional e Global	24
QUADRO 2: Atores cruciais em um sistema regional de inovação	31
QUADRO 3: Nuvem de palavras utilizando os títulos das patentes no período de 2004 a 2019	42
QUADRO 4: Nuvem de palavras produzida com os resumos das patentes mapeadas no período de 2004 a 2019	43
QUADRO 5: Principais características das fases de ferro encontradas nos rejeitos de minério de ferro: cor, morfologia, magnetismo e tipo de estrutura	56
QUADRO 6: Possíveis aplicações para os rejeitos de minério de ferro discutidos neste trabalho	60
QUADRO 7: Aplicações para rejeitos de minério de ferro (IOT) em materiais de construção baseados em sua composição química	60
QUADRO 8: Instituições participantes da Plataforma R3 Mineral	87
QUADRO 9: Grupos da Plataforma R3 Mineral	89
QUADRO 10: Comparação entre as plataformas colaborativas identificadas	93

LISTA DE GRÁFICOS	Pág.
GRÁFICO 1: Patentes de empresas mineradoras instaladas no QFMG	41
GRÁFICO 2: Quantidade de rejeitos de minério de ferro gerados anualmente nos países mineradores	51
GRÁFICO 3: Tamanho médio das partículas de diferentes rejeitos de minério de ferro	58
GRÁFICO 4: Curva de distribuição granulométrica de rejeitos de minério de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais	58
GRÁFICO 5: Aplicações identificadas relacionadas a rejeitos de minério de ferro	76
GRÁFICO 6: Instituições responsáveis por depósitos de patentes relacionadas ao uso de rejeitos de minério de ferro	77

SUMÁRIO	Pág.
RESUMO	9
ABSTRACT	11
LISTA DE TABELAS, FIGURAS, QUADROS E GRÁFICOS	13
SUMÁRIO	15
INTRODUÇÃO	17
1 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2 - SISTEMA DE INOVAÇÃO NA MINERAÇÃO DE FERRO EM MINAS GERAIS	26
2.1- Introdução	26
2.2- Contextualização – Breve Histórico da Atividade Mineradora e da Inovação em Minas Gerais	27
2.3- Sistema Regional de Inovação da Mineração de Ferro em Minas Gerais	31
2.3.1- Empresas Mineradoras, Fornecedoras de Equipamentos e Prestadoras de Serviços	32
2.3.2- Instituições do Sistema Regional de Inovação da Mineração de Ferro de Minas Gerais	35
2.4- A produção de tecnologia e inovação no Sistema Regional de Inovação da Mineração de Ferro em Minas Gerais	39
2.4.1- Análise de patentes relacionadas à mineração	39
2.4.2- Tendências tecnológicas na Mineração em Minas Gerais: uma análise a partir da nuvem de palavras	41
2.5- Conclusões	44
3- REJEITOS DA MINERAÇÃO DE FERRO: CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO	46
3.1- Produção de minério de ferro no Brasil e no mundo	46
3.1.1- O processo de beneficiamento do minério de ferro	48
3.1.2- A geração de rejeitos de minério de ferro (IOT) e problemas ambientais	50
3.1.3- Caracterização física e química dos rejeitos de mineração de ferro	51
3.2- Aplicações para rejeitos de minério de ferro	59
3.2.1- Rejeitos de minério de ferro em argamassas e concreto	62
3.3- Materiais ativados por álcalis e geopolímeros	64
3.3.1- Cerâmicas	65
3.3.2- Pigmentos	66
3.3.3- Síntese de silicatos porosos	67
3.3.4- Síntese de óxido de ferro magnético	68
3.4- Rejeitos de minério de ferro como catalisadores	68
3.4.1- Reações fenton e foto-fenton	68
3.4.2- Reações de oxidação de CO	70
3.4.3- Produção de Biodiesel	70
3.4.4- Catálise para síntese de compostos de nitretos de carbono	71
3.5- Rejeitos de minério de ferro com um adsorvente	71
3.5.1- Purificação de biogás e adsorção de H ₂ S	71

3.5.2- Adsorção de metais pesados	72
3.5.3- Adsorção de fosfatos	72
3.5.4- Catodos de baterias	73
3.6- Madeira plástica	73
3.6.1- Painéis cimento-madeira	74
3.7- Obtenção de sílica de alta pureza	74
3.8- Pavimentação	75
3.9- Melhorias no processo de beneficiamento do minério de ferro – reprocessamento	75
3.10- Análise de patentes relacionadas aos rejeitos de minério de ferro	76
3.11- Fatores limitantes para o uso de rejeitos de minério de ferro	77
3.12- Resumo do Capítulo	80
4 - INOVAÇÃO EM REDES COLABORATIVAS: O CASO DA PLATAFORMA R3 CRIADA PARA PROMOVER o DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA A DESTINAÇÃO DE REJEITOS	81
4.1- Introdução	81
4.2- Redes e o Processo de Inovação Tecnológica	83
4.3- Inovação no Setor da Mineração	85
4.4- A Plataforma R3 Mineral	86
4.5- Redes colaborativas no setor extrativista mineral mundial	90
4.5.1- AMIRA	90
4.5.2- CEMI	91
4.6- Discussão	94
4.7- Conclusão	95
5 – CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

INTRODUÇÃO

A atividade extrativa mineral possui relevância econômica, ambiental e social no estado de Minas Gerais. A principal aglomeração industrial do estado de Minas Gerais é o complexo minero-metalúrgico, que concentra, sobretudo na região metropolitana de Belo Horizonte, elevado número de empresas de diferentes portes, nacionais e internacionais, nas áreas de mineração, siderurgia e refratários. Minas Gerais responde por 46% de toda extração de minerais metálicos do Brasil e por 28% da produção brasileira de aço, o que comprova sua grande vocação mineral.

Entretanto, a geração de rejeitos representa um forte impacto ambiental, com interferência no solo e nos recursos hídricos. Acidentes em barragens de rejeitos, ocorridos em 2015 e 2019, levaram à modificação da legislação sobre barragens no estado de Minas Gerais e no Brasil, com a proibição do uso de barragens alteadas a montante e a obrigatoriedade do descomissionamento dessas estruturas. Foram lançados objetivos para o aproveitamento dos rejeitos depositados nessas estruturas, que poderão ser usados como matérias-primas de segunda geração para outras cadeias produtivas.

Existe um sistema regional de inovação voltado para a atividade de mineração estruturado, e diversas possibilidades de aplicação para os rejeitos de minério de ferro vêm sendo estudadas nos últimos dez anos (CARVALHO, 2010; SANTOS e DINIZ, 2013). Cita-se como exemplo, seu aproveitamento na construção civil, como areia ou agregados artificiais, na pavimentação de estradas, na produção de madeira plástica e na indústria química, como catalisadores. Contudo, há fatores limitantes técnicos e de mercado para o aproveitamento em escala industrial desses materiais, como suas características físicas (tamanho e umidade), a grande escala de geração de rejeitos, que é muito superior ao possível mercado consumidor, questões tributárias e a falta de mecanismos de apoio para o aproveitamento dos rejeitos. Desta forma, o sistema regional de inovação precisa se voltar para o aproveitamento de rejeitos.

Usando como metodologia dados secundários bibliográficos e pesquisa-ação, o presente trabalho tem como objetivo geral discutir os motivos pelos quais as tecnologias desenvolvidas para o aproveitamento de rejeitos de minério de ferro não são aplicadas industrialmente e analisar o sistema regional de inovação na atividade extrativa mineral de minério de ferro do estado de Minas Gerais com foco na utilização de rejeitos. Como objetivos específicos, tem-se: apresentar e discutir os rejeitos gerados pela atividade de

mineração de minério de ferro, com uma breve apresentação sobre suas características técnicas, sobre o processo de mineração e sobre a geração desse material, no Capítulo 3. Esse capítulo foi apresentado como artigo científico de revisão para o *Journal of The Brazilian Chemical Society*. O segundo objetivo específico, apresentado no Capítulo 2, é descrever o sistema regional de inovação da atividade extrativa mineral de minério de ferro de Minas Gerais, para identificar seus principais atores e as tendências tecnológicas estudadas. Esse capítulo foi apresentado no 10º Congresso Brasileiro de Minas a Céu Aberto e Minas Subterrâneas (CBMINA). O terceiro objetivo específico, a saber, apresentar um estudo de caso sobre a Plataforma R3 Mineral, a primeira rede colaborativa criada no Brasil visando desenvolver e fomentar aplicações para os rejeitos de minério de ferro em escala industrial, é apresentado no Capítulo 4. Tal capítulo foi apresentado no 10º Congresso Brasileiro de Minas a Céu Aberto e Minas Subterrâneas (CBMINA). Finalizando, o Capítulo 5 apresenta discussões sobre as conclusões desse trabalho e contribuições para um aperfeiçoamento do sistema regional de inovação na atividade extrativa mineral de minério de ferro em Minas Gerais.

O Capítulo 1 apresenta o referencial teórico sobre sistemas de inovação. Para esse capítulo, foram realizados trabalhos de levantamentos bibliográficos com pesquisa na literatura especializada sobre sistemas de inovação.

O Capítulo 2 descreve o sistema regional de inovação na atividade de mineração no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, onde foram realizados trabalhos de levantamentos bibliográficos com pesquisa na literatura especializada sobre sistemas regionais de inovação, análises setoriais da atividade de mineração, cadeia produtiva da mineração e inovação e mineração. Também foram realizadas entrevistas semiestruturadas com diferentes atores da cadeia produtiva da atividade mineral, como funcionários de mineradoras e de empresas fornecedoras de produtos e de serviços, além de consultores técnicos.

O Capítulo 3 apresenta uma descrição das tecnologias estudadas e patenteadas produtos gerados a partir dos rejeitos de mineração e a identificar dos fatores críticos para a implementação desses produtos no mercado. Foram realizados trabalhos de levantamentos bibliográficos com pesquisa na literatura sobre geração de rejeitos da atividade de mineração de minério de ferro, sobre aproveitamento de rejeitos gerados da atividade de mineração de ferro e sobre as limitações existentes para a aplicação industrial

das tecnologias já desenvolvidas acerca do aproveitamento de rejeitos da atividade de mineração.

O Capítulo 4 descreve e avalia a Plataforma R3 Mineral, usando a pesquisa-ação como fonte de dados primários, combinada com dados secundários. Utilizou-se também levantamentos da literatura sobre inovação e mineração, sobre plataformas colaborativas de empresas de mineração em outros países e sobre a estrutura de plataformas colaborativas de empresas de mineração existentes. Como base de dados primários, dentro da atividade de pesquisa-ação, foram realizadas seis entrevistas semiestruturadas com membros participantes da Plataforma, além de participações em reuniões de trabalhos e em grupos de pesquisa criados para estudos de aplicações de rejeitos. As atividades foram realizadas durante os anos de 2016 e de 2017.

A revisão bibliográfica ou revisão da literatura é a análise crítica, meticulosa e ampla das publicações correntes em uma determinada área do conhecimento. Esse tipo de pesquisa tem como finalidade colocar o pesquisador em contato direto com tudo o que foi escrito sobre determinado assunto. A meta não se restringe a reproduzir apenas o que já foi escrito sobre determinado assunto, mas proporcionar o exame de um tema sob novo enfoque ou abordagem, chegando a conclusões inovadoras (GONÇALVES, 2010). A pesquisa-ação é um tipo de pesquisa social com base empírica que é concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo, no qual os pesquisadores e os participantes representativos estão envolvidos de modo cooperativo. Essa estratégia visa aproximar o pesquisador do objeto pesquisado, o que tende a permitir que, por meio de um esforço pontual de pesquisa e da definição de ações concretas de curto e médio prazos, sejam aumentados o conhecimento e a consciência das pessoas envolvidas quanto aos problemas detectados na organização. É entendida como uma estratégia de pesquisa que lida com a criação de mudança em sistemas humanos. Neste sentido, envolve tanto pesquisa quanto intervenção, tanto reflexão em ação quanto sobre a ação, tanto estudo quanto construção da situação (FREITAS *et al.*, 2010).

Para a revisão bibliográfica dos sistemas de inovação, foi realizado levantamento bibliográfico em literatura especializada sobre sistemas regionais, setoriais, nacionais e globais de inovação.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Sistema Nacional de Inovação é formado por um conjunto de instituições formais e informais que promovem os processos de inovação tecnológica, sendo o grau de interação entre elas determinado pelo ambiente em que estão inseridas. Trata-se de uma rede composta por instituições pertencentes às esferas pública e privada que atuam de modo a criar, importar, modificar e difundir novas tecnologias por meio de suas atividades e interações. O sistema é composto, portanto, pelos atores econômicos, sociais, políticos, organizacionais e institucionais que têm relevância para a difusão e o uso das inovações tecnológicas. Esse conceito parte do entendimento de que um sistema é constituído não apenas por um determinado grupo de agentes, mas também pelo relacionamento entre eles, o que determina seu grau de desenvolvimento e suas potencialidades (DOS SANTOS E MENDES, 2018 *apud* JONHSON, 1995; FREEMAN, 1987; EDQUIST, 2005).

Segundo LUNDVALL (1992), um sistema nacional de inovação é constituído por elementos e relações que interagem com a produção, a difusão e o uso de conhecimentos novos, e economicamente úteis, localizados dentro das fronteiras de uma nação. A definição estreita incluiria organizações e instituições envolvidas em pesquisas e explorações como departamentos de pesquisa e desenvolvimento, institutos tecnológicos e universidades. Uma definição mais abrangente incluiria todas as partes e aspectos da estrutura econômica e do arranjo institucional o sistema de produção, o sistema de marketing e o sistema de finanças, todos como subsistemas, nos quais, o aprendizado acontece. A atividade central dentro de um sistema de inovação é o aprendizado, e o aprendizado é uma atividade social, que envolve interações entre pessoas. Também é um sistema dinâmico, caracterizado por retornos positivos e por reprodução dos conhecimentos e aprendizados.

Geralmente os elementos de um sistema de inovação se reforçam na promoção de processos de aprendizagem e de inovação, ou se combinam para atingir aqueles fins. Ainda para LUNDVALL (1992) o Estado desempenha um papel importante no processo de inovação. Seu envolvimento em apoio direto à ciência e ao seu desenvolvimento, bem como, suas regulações influenciam o direcionamento da inovação, além de ser o mais importante usuário de inovações.

Para NELSON (1993), sistema nacional de inovação é o conjunto de instituições cujas interações determinam a performance de inovação das empresas nacionais. O advento de novas tecnologias geralmente leva a trabalhos científicos que desejam conhecer e entender essas tecnologias, permitindo, assim, a sua evolução. Novas tecnologias dão vida a novas ciências. A ciência e a tecnologia estão entrelaçadas. Esse é o principal motivo pelo qual a tecnologia avança entre homens e mulheres com treinamento universitário na ciência das engenharias. Tal entrelaçamento, mais que o acaso (*serendipity*), é o principal fator pelo qual a pesquisa universitária é um importante colaborador para o avanço tecnológico. O Estado pode direcionar os investimentos em inovação levando-se em consideração o interesse público, o que é feito através de políticas públicas de fomento à inovação.

Segundo FREEMAN (1995), políticas para a difusão de tecnologias genéricas são importantes e podem levar ao aumento de investimentos e de transferências de tecnologias. As políticas devem encorajar a diversidade e a diversidade local. Esse mesmo autor apresenta o paradigma verde e tecnológico para a economia mundial.

CHAMINADE *et al.* (2018) pontuam que os sistemas nacionais de inovação devam ser ambientalmente sustentáveis, no sentido de que possam atender às necessidades do momento presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender as suas próprias necessidades. Nesse sentido, são necessárias inovações tecnológicas em produtos e processos, desde materiais sustentáveis até a reciclagem de resíduos, mas também são necessárias inovações não tecnológicas, como mudanças organizacionais, mudanças sociais e mudanças institucionais; em último caso, é necessária uma transformação dos sistemas nacionais de inovação. Em um primeiro momento, esses sistemas devem permitir a implementação de inovações radicais e incrementais, que se mostrem necessárias para garantir o desenvolvimento sustentável. Eventualmente, os sistemas irão se mover para uma fase de desenvolvimento, na qual as inovações são maximizadas reunindo os recursos financeiros necessários e criando as modificações estruturais que possam permitir a implementação das inovações. Em termos de políticas públicas, uma questão fundamental nessa fase é a criação de mercados e a garantia da disponibilidade de recursos para a adoção das inovações.

Para MAZZUCATO (2013), o Estado pode desempenhar um papel fundamental na formação e na criação de mercados para as inovações desenvolvidas; ele pode agir como um agente empreendedor, que assume riscos aos quais a iniciativa privada se mostra

resistente, haja vista o caráter da incerteza do mercado consumidor para os produtos e serviços inovadores. Esse Estado empreendedor deve ter uma postura proativa, que é capaz de assumir riscos e de criar um sistema altamente articulado. Um Estado investidor e catalisador pode despertar toda a rede para a ação e difusão do conhecimento. Cita-se como exemplos, os casos do Japão e Coreia do Sul, onde o Estado comandou o processo de desenvolvimento industrial, através da criação de planos para o avanço tecnológico em áreas estratégicas. As políticas públicas não devem se basear apenas em créditos fiscais para investimentos em pesquisa e desenvolvimento, mas também na criação de oportunidades tecnológicas e de mercado, para fomentar o investimento privado. MAZZUCATO e PENNA (2016) reforçam a importância de políticas orientadas por missões para estimular setores com apelo ambiental, como é o caso do aproveitamento de resíduos.

FREEMAN e SOETE (2008) defendem que as políticas devem ser projetadas de modo a influenciar os incentivos que as firmas recebem e a apoiar programas de pesquisas relativas à enorme diversidade das fontes e das aplicações das inovações, assegurando que a mais ampla gama de tecnologias potencialmente benéficas seja explorada e desenvolvida. Isto pode ser alcançado por meio de programas de pesquisa e de compras governamentais que incluam empresas inovadoras, potenciais usuários de novos produtos e processos, instituições públicas de pesquisa e organizações não governamentais. Além disso, para assegurar que uma ampla gama de aplicações potenciais também seja explorada, os programas de compras governamentais também deveriam incluir um grande número de empresas potencialmente capazes de se beneficiar delas.

Sistemas regionais de inovação são o produto da interação entre seus agentes, que compõem a estrutura da produção regional; são dependentes intelectualmente de descobertas feitas por cientistas locais, dentro de uma economia geográfica. Através de uma progressão lógica da descoberta, da teoria ao experimento, validação e confirmação, um conhecimento é recebido. A existência de uma competência financeira regional também é fundamental, sendo parte da infraestrutura de suporte dos sistemas locais de inovação. A existência de orçamento público regional também é importante para a mobilização do potencial de inovação regional. A presença de condições diferenciais locais forma a chamada superestrutura; de forma geral, são mentalidades dos atores locais, em nível institucional, organizacional das empresas e em nível organizacional para a governança. No nível ou dimensão institucional estão a cultura de cooperação,

aprendizagem interativa e um consenso para a associação. No nível ou dimensão organizacional das empresas estão as relações de trabalho harmoniosas, orientação do trabalhador, a externalização e a inovação interativa. E no nível ou dimensão organizacional estão presentes políticas inclusivas, de orientação e de consultoria e a rede de trabalho (COOKE, 2001).

Segundo esse mesmo autor, o sistema regional de inovação possui fatores de infraestrutura, que irão suportar o potencial de produção do sistema. Tais aspectos incluem a existência de competências financeiras, públicas e privadas, e a existência de orçamentos públicos, para a mobilização de potenciais inovações regionais. Sistemas mais avançados possuem fatores de superestrutura, que seriam a mentalidade dos atores regionais e a cultura regional. Estes fatores de superestrutura são divididos nos níveis institucionais e organizacionais das empresas e no nível da governança. ASHEIM *et al.* (2011) argumentam que compreender a variedade e as bases de conhecimento diferenciado de uma região são cruciais para estabelecer um modelo regional de política efetivo. Um modelo único de política regional é inapropriado, como são as tentativas de transferir as melhores práticas sem compreender o contexto local e sem identificar os arranjos e as criações locais. Os autores argumentam que as plataformas de políticas devem ser estrategicamente baseadas em identificar e usar variedades e base de conhecimentos para construir a vantagem regional. As fronteiras do sistema são a abertura e a conectividade, e os governos nacional e regional possuem um papel chave no direcionamento do sistema.

Segundo MALERBA (2002), o sistema setorial de inovação é um arranjo de produtos novos ou existentes para usos específicos e um arranjo de agentes formados por organizações e indivíduos que fazem interações de mercado ou de não mercado, para a criação, produção e venda desses produtos. Esse sistema possui uma base de conhecimentos, tecnologias, entradas e demandas existentes, emergentes e potenciais. Ao longo do tempo, o sistema passa por mudanças e transformações, através de uma coevolução de seus vários elementos.

O percentual de mudança tecnológica e inovação é determinado pela interação entre um grupo de organizações dos setores público e privado, incluindo empresas, universidades, organizações de pesquisa, governo, entidades de ensino e organizações de fomento, que se combinam para criar, desenvolver e difundir novas tecnologias e inovações, cabendo um papel chave aos governos regional e nacional. As fronteiras da

inovação são a abertura e a conectividade. E o estudo dos sistemas regionais de inovação pode auxiliar os governos na criação de políticas para promover a capacidade de inovação e a vantagem competitiva local. A ênfase dos sistemas regionais de inovação deve ser em capital social, rede de relacionamentos e aprendizado, que devem agir como uma linha de trabalho evolucionária.

A Figura 1 apresenta a relação entre os sistemas global, nacionais, regionais, tecnológicos e setoriais de inovação, adaptada de ASHEIM *et al.* (2011).

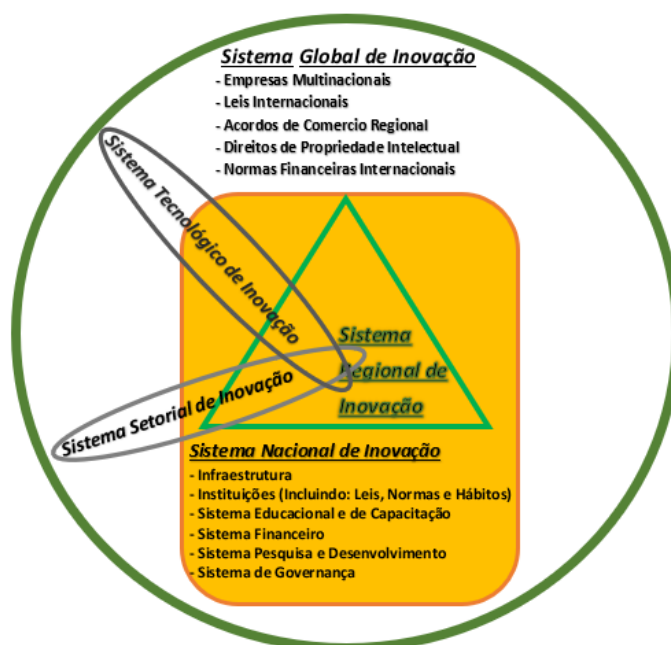


FIGURA 1: Relação entre os sistemas de inovação (Adaptada de ASHEIM *et al.*, 2011)

No Quadro 1 são apresentadas as diferenças e complementariedades dos conceitos dos sistemas setoriais, tecnológicos, regionais, nacionais e global de inovação.

QUADRO 1: Sistemas de Inovação setorial, tecnológico, regional, nacional e global (Fonte: o autor).

Sistema Setorial de Inovação	Sistema Tecnológico de Inovação	Sistema Regional de Inovação	Sistema Nacional de Inovação	Sistema Global de Inovação
Referencial Teórico: MALERBA (2002)	Referencial Teórico: LUNDVALL (1992)	Referencial Teórico: COOKE (2001) ASHEIM <i>et al.</i> (2011)	Referencial Teórico: LUNDVALL (1992) NELSON (1993) FREEMAN (1995)	Referencial Teórico: LUNDVALL (1992) FREEMAN (1995)

Produção e Venda de Produtos.	Aprendizado através de interação.	Fatores de infraestrutura e de superestrutura, e Modelo regional de política.	Estrutura econômica e Arranjo institucional nacionais.	Empresas multinacionais e Arranjo institucional internacional.
Interação no sistema de produção.	Inclui sistema de marketing e finanças.	Inclui sistema de marketing e finanças.	Inclui todos os atores.	Inclui todos os atores.
Arranjo local, que também pode ser global.	Arranjo local.	Arranjo regional.	Dimensão geográfica dentro de uma nação.	Dimensão global.

A atividade extrativa mineral de minério de ferro realizada no estado de Minas Geras envolve interações setoriais, regionais, nacionais e globais, na medida em que as empresas direcionam parte de sua produção para o mercado externo e adquirem produtos e serviços de fornecedores globais. Desta forma, trata-se de um setor complexo e com características particulares. Adotou-se como referência o conceito de sistema regional de inovação, pelo foco do trabalho direcionado aos rejeitos gerados pela atividade no estado de Minas Gerais.

2. SISTEMA DE INOVAÇÃO DA MINERAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO EM MINAS GERAIS

2.1 - Introdução

Minas Gerais possui uma grande diversidade produtiva, abrigando empresas de diferentes áreas da economia e de notório destaque nacional e internacional, no entanto a cadeia produtiva da mineração é um dos seus setores mais estratégicos, possuindo particularidades e vantagens competitivas que se traduzem no seu elevado grau de internacionalização (COSTA *et al.*, 2017). Nesse sentido, a mineração é responsável por 41.929 empregos diretos e 343.817 empregos indiretos em Minas Gerais; sendo que 51,9% do total de empregos diretos gerados pela mineração no Brasil está no estado (FIEMG, 2019).

Na cadeia produtiva da mineração, destaca-se a produção de minério de ferro, um dos principais bens de exportação da economia brasileira e que responde por 71% do valor total da produção das onze principais substâncias metálicas produzidas no Brasil. Em 2019, 60% da produção nacional de minério de ferro bruta foi realizada em Minas Gerais, totalizando 311 milhões de toneladas produzidas (ANM, 2020). Destaca-se que esse nível de produção é resultado de um ciclo de expansão do setor observado ao longo das duas primeiras décadas do século XXI em razão da ampliação na demanda internacional.

No entanto, na atividade de mineração, grandes volumes e massas de materiais são extraídos e movimentados, gerando dois tipos de resíduos sólidos: os estéreis e os rejeitos. Os estéreis são os materiais escavados, gerados pelas atividades de extração no decapeamento da mina, não possuem valor econômico e geralmente ficam dispostos em pilhas. Já os rejeitos são resíduos resultantes dos processos de beneficiamento a que são submetidas as substâncias minerais. A geração de rejeitos tem aumentado nos últimos anos em decorrência do crescimento da produção mineral, e o minério de ferro é a substância que mais contribuiu para a geração de rejeitos no estado de Minas Gerais (IPEA, 2012). Outro fator que concorre para esse aumento é o empobrecimento das minas, isto é, os teores de ferro das jazidas têm se tornado cada vez mais baixos (DA GAMA, 2019).

A partir desse cenário, o objetivo deste trabalho é apresentar uma visão geral do sistema regional de inovação na mineração de minério de ferro no estado de Minas Gerais

e das direções de sua atividade tecnológica. Esse levantamento leva em consideração as empresas fornecedoras de bens minerais (empresas mineradoras); os fornecedores de equipamentos e sistemas, os fornecedores de serviços especializados; os agentes financeiros; os organismos governamentais; os consumidores de bens minerais; os agentes de pesquisa, desenvolvimento e inovação e, por fim, as associações de empresas mineradoras, de fornecedores, de trabalhadores do setor e de moradores das regiões que estejam submetidas aos impactos causados pela atividade de mineração. Para a avaliação da atividade tecnológica do sistema regional de inovação minerador, foi executado um mapeamento de pedidos de patentes apresentados ao Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI). Para uma representação visual da frequência e do valor das palavras relevantes, foi criada uma nuvem de palavras contemplando o título das patentes e seus resumos, utilizando o *software* R. Objetiva-se, com esse exercício, identificar tendências tecnológicas neste setor. Em especial, espera-se avaliar se a destinação de resíduos de mineração esteve entre essas tendências ao longo dos últimos anos, tendo em face os recentes desastres ambientais e humanos relacionados ao seu armazenamento.

2.2 - Contextualização – Breve histórico da atividade mineradora e da inovação em Minas Gerais

O sistema regional de inovação da mineração de Minas Gerais teve suas bases na formatação de um aparato produtivo local, a partir do século XVIII e que se desenvolveu ao longo do século XIX com a consolidação da estrutura produtiva e de um arranjo institucional.

A atividade de mineração foi responsável pela formação do estado de Minas Gerais, por meio do trabalho dos bandeirantes, que procuravam ouro e pedras preciosas. Em 1709, foi criada a Capitania de São Paulo e Minas do Ouro, que, em 1720, foi desmembrada em São Paulo e Minas Gerais. Após o ciclo do ouro, em 1811, Guilherme Von Eschwege (1777-1855) escolhe as cercanias de Antônio Pereira, próximo a Ouro Preto, para a implantação da chamada Usina Patriótica, levando em consideração a existência de quedas d'água, matas e minério de ferro. A produção em escala industrial teve início em dezembro de 1812 (PINHO e NEIVA, 2012). Vale destacar que essa empresa seria a primeira consumidora de minério de ferro, que o usaria como matéria-prima para a produção de ferro. A primeira corrida de gusa de alto forno no Brasil foi em 1808 na Fábrica do Rei (1808-1831) no Morro do Pilar, distrito de Conceição do Mato

Dentro, implementada pelo Intendente Geral das Minas, Manuel Ferreira da Câmara Bethencourt e Sá (SANTOS e DINIZ, 2013). A primeira companhia de mineração estrangeira que foi organizada no Estado foi a *Imperial Brazilian Mining Association*, fundada por Edward Oxenford, em 1814. Essa empresa adquiriu a propriedade das minas de Congo Soco, Cata Preta, Antônio Pereira e Serra do Socorro. A Mina de Congo Soco, localizada próximo a Caeté, foi a mais importante, produzindo, entre 1826 e 1856, o total de 12.887 kg de ouro. A segunda empresa estrangeira a se instalar no estado foi a *Saint John d'el-Rey Mining Company*, em 1830. Suas primeiras atividades ocorreram ao norte da cidade de São João Del-Rei, no entanto foram abandonados em 1834, quando os trabalhos da empresa foram centralizados em Morro Velho, perto de Congonhas de Sabará, atual município de Nova Lima (FERRAND, 1998). As primeiras empresas mineradoras e consumidoras eram, portanto, todas lideradas por estrangeiros à exceção da Fábrica do Rei.

Como desdobramento do desenvolvimento produtivo, houve no estado de Minas Gerais a constituição de um arranjo institucional voltado à pesquisa e ao ensino. Pode ser considerado o marco inicial da estruturação desse sistema regional de inovação a criação da Escola de Minas de Ouro Preto, por iniciativa do Imperador Dom Pedro II, que, em 1874, contratou Claude Henri Gorceix para criar e organizar a instituição (CARVALHO, 2010). A partir de então, o desenvolvimento da atividade de mineração contou com a presença de técnicos formados na Escola de Minas, atuando no setor produtivo, no Estado e na academia (SANTOS e DINIZ, 2013).

Ex-alunos dessa escola participaram, ainda, da organização e do desenvolvimento das escolas de engenharia de Belo Horizonte, Itajubá, Juiz de Fora e Viçosa. A Escola de Engenharia de Belo Horizonte foi fundada em 1911, além das graduações, passou a ofertar cursos profissionais, que seriam equivalentes aos cursos técnicos atuais, com o intuito de qualificar profissionais para atuarem como intermediários entre os engenheiros e os operários.

Em 1931, foi criada a Sociedade Mineira de Engenheiros, contando, sobretudo, com egressos da Escola de Minas de Ouro Preto e que constituiu um círculo de estudos sobre mineração e siderurgia em Minas Gerais. Na década de 1970, foi criada a Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), com o propósito de dar sustento tecnológico a um processo de reestruturação da economia do estado (SANTOS e DINIZ, 2013). Alguns ex-alunos da Escola de Minas de Ouro Preto ingressaram no serviço

público, no então Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil (SGMB) e no Departamento de Produção Mineral (DNPM). Ressalta-se que, a partir da fundação daquele primeiro órgão, em 1934, a produção científica relacionada ao setor se tornou mais relevante. Outros engenheiros formados na escola participaram da criação de diversos empreendimentos minerários e metalúrgicos no estado de Minas Gerais (CARVALHO, 2010).

A criação de empresas que se tornariam grandes atores na produção de minério de ferro no país remete a 1913, quando o dinamarquês Arn Thun criou a empresa A. Thun e Cia Ltda, para a exploração de minério de ferro no Vale do Paraopeba, dando origem à Mina de Casa de Pedra, que posteriormente foi incorporada a Cia Siderúrgica Nacional em 1946 (BRIZ, 2018).

A *Itabira Iron Ore* foi uma companhia inglesa de minério de ferro, autorizada a funcionar no Brasil em 1911, em uma das maiores jazidas conhecidas até então, localizada na cidade de Itabira. A companhia passou a contar com capital norte-americano em 1919, tendo como representante Percival Faquhar (1864-1953). Porém, o projeto de extração mineral para exportação não chegou a ser implementado em razão de uma discussão política acerca dos seus reais benefícios para a economia de Minas Gerais, dado que era liderado por capitais externos (DINIZ, 1981). Com isso, a partir da década de 1930, iniciou-se a discussão sobre a nacionalização das reservas minerais, sobretudo das jazidas de ferro em Itabira. Em março de 1942, os chamados acordos de Washington definiram as bases para a organização de uma companhia de exportação de minério de ferro no Brasil. O Governo britânico se obrigava a adquirir e transferir ao Governo brasileiro as jazidas de minério de ferro pertencentes à *Itabira Iron Ore*; o Governo norte-americano se comprometia a conceder um financiamento no valor de US\$ 14 milhões ao Brasil, para a compra de equipamentos, máquinas e serviços nos Estados Unidos. Esse pacote tinha por objetivo assegurar a produção, o transporte e a exportação de 1,5 milhão de toneladas anuais de minério de ferro a serem compradas em partes iguais pela Inglaterra e pelos Estados Unidos, por um prazo de três anos, a preços inferiores aos de mercado.

Em 1942, foi criada a estatal Cia Vale do Rio Doce, através de Decreto-lei 4532, de 01 de junho daquele ano. A Vale, que viria a se tornar um dos maiores produtores do mundo, foi constituída a partir da incorporação da Companhia Brasileira de Mineração e Siderurgia S. A. e da Itabira Mineração S. A., cujas reservas pertenciam originalmente à *Itabira Iron Ore*, com o objetivo de fornecer minério de ferro para consumidores no Brasil

e no exterior. A empresa foi privatizada em 1997 e passou a ser uma das maiores mineradoras de minério de ferro mundiais, atuando nas Regiões Sudeste e Norte do Brasil e no exterior. Em novembro de 2007, a empresa adotou o nome Vale (VALE, 2012).

A empresa implementou diversas inovações ao longo da sua história, detendo o maior número de patentes depositadas no Brasil. A empresa possui um Centro de Tecnologia de Ferrosos (CTF), voltado para pesquisas na aplicação de minério de ferro e carvão na siderurgia.

Também em 1942, o empreendedor Augusto Trajano de Azevedo Antunes (1906-1996) cria a Indústria e Comércio de Minérios Ltda (ICOMI). Nos anos 1960 é criada a Minerações Brasileiras Reunidas (MBR) (DUNCAN *et al.*, 2006).

A Samarco Mineração S.A. foi fundada em 1977, com o propósito de lavar e concentrar minério de ferro de baixo teor, visando à produção de pelotas e a sua comercialização, possuindo as Minas de Germano e Alegria e a usina de concentração, no estado de Minas Gerais, e a usina de pelotização e terminal marítimo de Ubu, no estado do Espírito Santo. A Samarco foi resultado da associação entre a empresa brasileira S. A. Mineração da Trindade (SAMITRI) e a empresa peruana Marcona, controlada pela empresa australiana *Utah-International*. Na década de 1980, a *Utah* foi adquirida pela australiana B.H.P. – *Broken Hill Proprietary Company*. Em 2000, houve a aquisição da Samitri pela Vale (TAVEIRA, 1997; VALE, 2000). Com isso, a Samarco passou a ser controlada por duas das maiores companhias mineradoras do mundo. A Samarco se destacou por implementar um projeto de lavra, beneficiamento e produção de minério de ferro para a produção de pelotas, usando um mineroduto, com 396 km de extensão, como meio de transporte de sua produção entre as cidades de Mariana, em Minas Gerais, e Anchieta, no Espírito Santo, onde sua produção é embarcada para outros países.

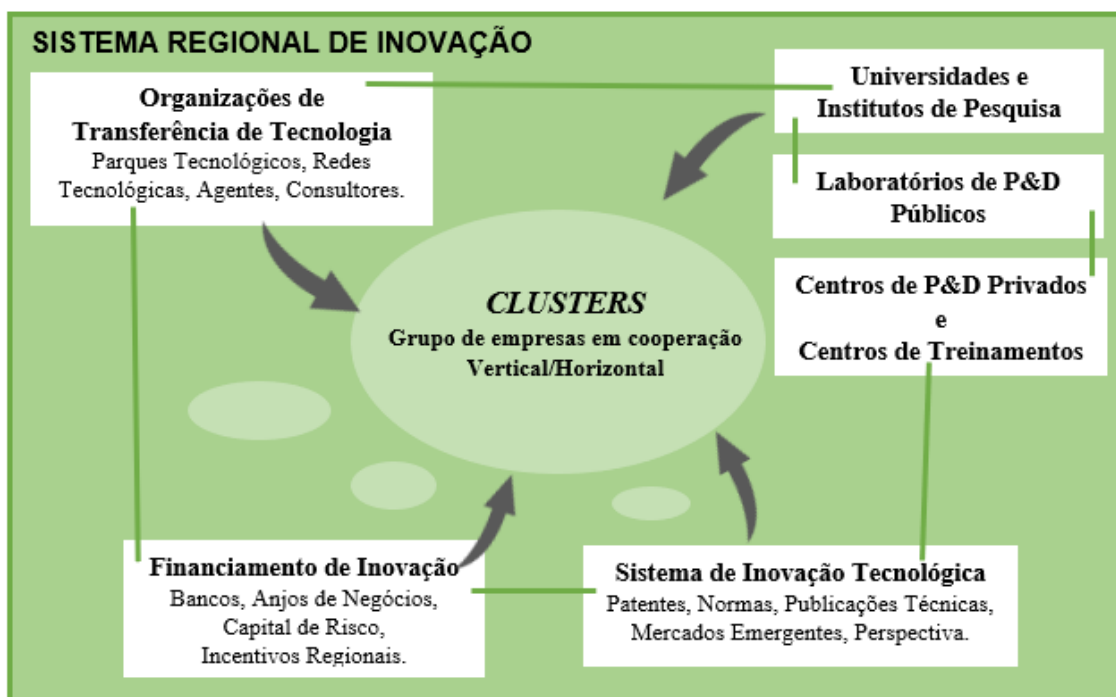
No pós-II Guerra, o processo de substituição de importações brasileiro demandou o adensamento dessa cadeia produtiva e, a consequente intensificação no uso de bens minerais, a partir da instalação de indústrias metalúrgicas, sobretudo as siderúrgicas, no país. Nesse contexto, em 1941, foi criada a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), também como desdobramento dos acordos de Washington, e sustentada por capital estatal. Em 1944, é fundada a empresa Aços Especiais de Itabira (ACESITA), pelos empreendedores Athos de Lemos Rache, Amynthas Jacques de Moraes e Percival Farquhar (APERAM, 2015), sendo os dois primeiros egressos da Escola de Minas. Em

1956 nasce a Usina Siderúrgica de Minas Gerais (Usiminas), como resultado de uma barganha que envolvia as esferas política, produtiva e institucional alinhada à cadeia minero-metalúrgica de Minas Gerais (GOMES, 1983).

O grande volume de extração de minério de ferro, somado ao empobrecimento das jazidas minerais, acarreta uma geração crescente de rejeitos, que atualmente não possuem aproveitamento econômico e que são armazenados nas empresas mineradoras. Estima-se que o setor mineral gere 670.000,00 toneladas por dia mundialmente, e que passe a gerar 1 milhão de toneladas por dia em 2030 (GUEDES e SCHNEIDER, 2017). O desenvolvimento de tecnologias que permitam o aproveitamento desse material como matéria-prima em outras cadeias produtivas pode ser considerado de grande relevância.

2.3 - Sistema Regional de Inovação da Mineração de ferro em Minas Gerais

A caracterização dos atores de um Sistema Regional de Inovação deve ser baseada na identificação dos seus componentes críticos (KOMNIMOS, 2004). O Quadro 2 apresenta de modo esquemático esses atores.



QUADRO 2: Atores cruciais em um sistema regional de inovação.
(Adaptado de KOMNIMOS, 2004).

Os atores principais de um Sistema Regional de Inovação são aqueles responsáveis pela produção, ou, neste caso, as empresas mineradoras. Essas empresas são

o ponto de partida do sistema e, a partir de sua atividade, demandam equipamentos e serviços de empresas fornecedoras. Esse grupo de empresas compradoras e fornecedoras interage e inicia um trabalho de cooperação, identificando e apresentando soluções para as necessidades do sistema produtivo. O sistema possui outros atores, que desempenham papéis complementares. As universidades e os centros de pesquisa capacitam e fornecem mão de obra especializada e prestam serviços de pesquisa e desenvolvimento de produtos, processos e serviços. Enquanto as universidades preparam mão de obra de forma mais abrangente, os centros de treinamento oferecem capacitação específica para determinados mercados. Ademais, laboratórios de pesquisa e desenvolvimento públicos, ligados a universidades públicas, atuam de forma mais ampla, enquanto centros de pesquisa e desenvolvimento privados possuem um espectro de atuação bem direcionado. O conhecimento produzido deve ser gerenciado, assim como as atividades produtivas devem ser normatizadas. O chamado sistema de informação tecnológica é responsável por essa tarefa. Para que as inovações geradas sejam compartilhadas a partir das interações entre os membros do sistema, é necessário capital, o qual, por sua vez, pode vir de bancos comerciais, além de bancos públicos de fomento econômico e social. A presença do Estado é fundamental, identificando as vocações regionais e criando políticas de incentivos regionais (COOKE, 2001). Complementam o sistema as organizações de transferência de tecnologia, com a presença de parques e redes tecnológicas e agentes atuando como consultores entre os diversos membros do sistema. Segundo LUNDVALL (1995), o elemento definidor do sistema de inovação, regional ou nacional, são as interações entre os diversos agentes do sistema.

Na sequência, serão analisados os atores do sistema regional de inovação da mineração de ferro em Minas Gerais, segundo os conjuntos de atores representados pela Figura 13.

2.3.1 - Empresas mineradoras, fornecedoras de equipamentos e prestadoras de serviços

O grupo de empresas, representado como ponto central da Figura 1, é formado por produtoras de minério de ferro e por seus fornecedores de equipamentos e de serviços, atuando em arranjos com cooperação vertical e horizontal. Adotando critérios técnicos, serão apresentados os atores mais relevantes dentro do sistema de inovação em mineração de ferro no Quadrilátero Ferrífero do estado de Minas Gerais. Os municípios que formam

o Quadrilátero referido são: Barão de Cocais, Belo Horizonte, Belo Vale, Betim, Brumadinho, Caeté, Catas Altas, Congonhas, Conselheiro Lafaiete, Ibirité, Igarapé, Itabira, Itabirito, Itatiaiuçu, Itaúna, Jeceaba, João Monlevade, Mariana, Mário Campos, Mateus Leme, Moeda, Nova Lima, Ouro Branco, Ouro Preto, Raposos, Rio Acima, Rio Manso, Rio Piracicaba, Sabará, Santa Bárbara, Santa Luzia, São Gonçalo do Rio Abaixo, São Joaquim de Bicas e Sarzedo.

A Tabela 1 apresenta as dez maiores mineradoras de minério de ferro instaladas no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais (QFMG), segundo a participação na produção total do país (ANM, 2018).

TABELA 1: Principais empresas mineradoras de minério de ferro instaladas no QFMG em 2018

Mineradora	Atuação	Participação
Vale S.A.	MG, PA	79,17
CSN Mineração	MG	5,84
Anglo American Minério de Ferro Brasil S.A.	MG	5,01
Nacional Minérios S.A.	MG	1,93
Gerdau Açominas S.A.	MG	1,09
Mineração Usiminas S.A.	MG	0,96
Minerações Brasileiras Reunidas S.A.	MG	0,78
Vallourec Mineração Ltda	MG	0,76
Itaminas Comércio de Minérios S.A.	MG	0,59
Ferro+ Mineração S.A.	MG	0,48

Fonte: ANM, 2018.

A Vale é a maior mineradora de minério de ferro do Brasil, sendo responsável por 79,17% da produção nacional (ANM, 2018). Por consequência, é a maior geradora de rejeitos de minério de ferro. Possui papel muito relevante na inovação, em virtude de seu porte, da sua atuação como depositante de patentes e como licenciador de tecnologias. Emprega parte de seu produto para a produção de pelotas, portanto, além de produtora, também é consumidora de minério de ferro. A empresa atua em seis continentes, sendo um dos maiores produtores mundiais de minério de ferro e a maior produtora de pelotas (WIPO, 2019).

A CSN, Cia Siderúrgica Nacional, é a segunda maior produtora de minério de ferro do país, com 5,84% do mercado nacional (ANM, 2018). Como apontado anteriormente, essa empresa também desempenha atividades siderúrgicas, usando parte de sua produção para consumo próprio, destinando o restante para o mercado. Por

consequência, é a segunda maior geradora de rejeitos de minério de ferro do Brasil. Possui papel relevante na inovação por ser ao mesmo tempo fornecedora e usuária de minério de ferro. A Anglo-American Minério de Ferro Brasil S.A. é a terceira maior produtora de minério de ferro, com uma participação de 5,01% de mercado (ANM, 2018). Além desse bem mineral, essa empresa fornece carvão, cobre, níquel, platina e diamante, com atuação global (ANGLO-AMERICAN, 2020). As demais mineradoras supracitadas, somadas, respondem por 6,59% do mercado brasileiro de minério de ferro (ANM, 2018).

Essas observações indicam que o setor de mineração de minério de ferro apresenta elevado grau de concentração no que diz respeito à produção, por consequência, também haverá uma concentração nas empresas geradoras de rejeitos, com as três empresas: Vale, CSN e Anglo-American Minério de Ferro S.A. que são responsáveis por mais de 80% dos rejeitos gerados no beneficiamento de minério de ferro.

Entre as demais companhias consideradas, destacam-se a Gerdau Mineração, a Mineração Usiminas e a Valourec Mineração, que, assim como a CSN, são empresas originalmente siderúrgicas, e que, em determinado momento, decidiram internalizar a produção do seu insumo mais importante. A empresa Samarco não foi listada por estar com suas atividades paralisadas desde novembro de 2015.

No que tange aos fornecedores de equipamentos e serviços para atividades mineradoras, foram considerados as empresas listadas em estudo da WIPO (2019a) referente à atividade tecnológica da mineração no Brasil. Em tal estudo, são identificadas as principais empresas fornecedoras de equipamentos, tecnologias e serviços atuantes na cadeia produtora mineral, as respectivas origem e participação dentro desse mercado.

A Tabela 2 apresenta os principais fornecedores de equipamentos, tecnologias e serviços para as empresas mineradoras de minério de ferro.

TABELA 2: Principais fornecedores mundiais das empresas mineradoras, origem e participação

Fornecedora	Origem	Participação
Metso	EUA	2,40
Elementos industriales y tecnológicos	Chile	2,26
Komatsu	EUA	1,84
SBVS Mining Engineering	Canadá	1,84
David Tutton	Alemanha	1,41
Transportation Technology Center	EUA	1,27
Hegenscheidt MFD	Alemanha	1,27

SMS Semg	Alemanha	1,27
Sherrit	EUA	1,13
Itasca	Chile	1,13

Elaborada a partir de dados obtidos em WIPO (2019).

As principais empresas fornecedoras de equipamentos, tecnologias e serviços para as mineradoras localizadas no Brasil são de origem estrangeira. Nenhum desses fornecedores conta com atividades de produção instaladas em Minas Gerais. Apenas a Metso e a Komatsu possuem unidades fabris no Brasil.

Ressalta-se que o grupo formado por empresas fornecedoras desempenha papel primordial na atividade tecnológica da mineração, dado que aglutina as principais inovações implementadas no segmento. Essa condição faz com que tais empresas fornecedoras sejam responsáveis por mais de 95% dos depósitos de patentes internacionais relacionadas à mineração (WIPO, 2019b).

2.3.2 - Instituições do Sistema Regional de Inovação da Mineração de Ferro de Minas Gerais

Diversas instituições participam de forma decisiva em um sistema de inovação, conforme apresentado no Quadro 2, sendo algumas cruciais para uma boa atuação do sistema (KOMNIMOS, 2004).

O primeiro grupo é composto por universidades que contam com cursos de Graduação e de Pós-graduação na área de Engenharia de Minas. É possível destacar a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), que são as mais importantes para a área de mineração no estado (CARVALHO, 2010; SANTOS e DINIZ, 2013).

A Universidade Federal de Ouro Preto possui os cursos de Graduação em Engenharia de Minas, Engenharia Geológica e Engenharia Metalúrgica; já na Pós-graduação, oferece os cursos de Mestrado e de Doutorado acadêmicos em Geotecnia, Engenharia de Materiais e Engenharia Mineral, assim como em Evolução Crustal e Recursos Naturais. Possui também Mestrados Profissionais em Engenharia Geotécnica e em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental.

A Universidade Federal de Minas Gerais hospeda a Escola de Engenharia, fundada em 1911, onde há o departamento de Engenharia de Minas (DEMIN). O curso

de Engenharia de Minas da UFMG tem sua origem no curso de Engenharia Industrial Metalúrgica, criado em 1945. Com sua extinção em 1960, criou-se o curso de Engenharia de Minas e Metalurgia, cujo desmembramento, em 1966, deu origem ao atual curso de Engenharia de Minas. Sua Pós-graduação instituiu o curso de Mestrado em 1971, e o curso de Doutorado em 1983, oferecendo Mestrados e Doutorados acadêmicos na área de Tecnologia Mineral pelo DEMIN - PPGEM. Ao longo de sua história, a instituição também ofereceu cursos de curta duração para a atualização tecnológica de profissionais engajados no setor de produção (SANTOS e DINIZ, 2013).

O segundo grupo é formado por Centros de Pesquisa dedicados à Tecnologia Mineral no Brasil. São considerados os laboratórios de pesquisa constantes no catálogo de centros de tecnologia mineral do Brasil (IBRAM, 2018) e localizados no estado de Minas Gerais. Fazem parte desse grupo o Centro de Inovação e Tecnologia (CIT) SENAI/FIEMG; o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN); o Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais; e o Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada da Universidade Federal de Ouro Preto. Todos esses centros de pesquisa são estatais, com exceção do CIT SENAI/FIEMG, que, apesar de ter se desenvolvido a partir das bases do Centro de Tecnologia de Minas Gerais (CETEC), fundação mantida pelo governo do estado até 2011, é atualmente controlado por instituições privadas sem fins lucrativos. Já a SGS Geosol e a Processamento e Caracterização Mineral (PCM) são centros de pesquisa privados, que oferecem prestação de serviços técnicos para a atividade de mineração.

Nesse arranjo institucional, é possível destacar ainda a presença de instituições de fomento à pesquisa e à inovação no Estado, representadas pela Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), o Banco de Desenvolvimento do Estado de Minas Gerais (BDMG) e pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES).

Entre as associações de classe e organizações patronais, tem-se o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), que é uma organização nacional privada e sem fins lucrativos, fundada em 1976, que representa as empresas e instituições que atuam no setor mineral brasileiro. Para fomentar inovações no setor e difusão das melhores práticas e tecnologias disponíveis no mercado, elabora debates, eventos, estudos, pesquisas e estatísticas relativos a economia mineral, legislação, tributação, tendências, proteção do meio ambiente, riscos e oportunidades e outros temas associados às atividades

desempenhadas pela indústria minerária. Possui também programas relacionados a normas técnicas, como o comitê para a normatização internacional em mineração, e ainda relacionados à saúde e segurança do trabalho. Além disso, promove eventos, com destaque para o Congresso Brasileiro de Mineração e a Exposição Brasileira de Mineração, além do *Mining Hub* (IBRAM, 2019).

A Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração foi fundada em 1944 e é formada por empresas, instituições de pesquisa, universidades e pessoas físicas ligadas de alguma maneira a esses setores. Tem como missão desenvolver ações coletivas que promovam o desenvolvimento das pessoas, a evolução técnica e científica e a inovação em processos, produtos e gestão, dando suporte à indústria e academia. Realiza eventos, seminários e cursos técnicos, além de editar sua revista científica e possuir livraria técnica, disponibilizando publicações e estudos periódicos (ABM, 2019). A Associação teve papel relevante na difusão tecnológica e na qualificação de recursos humanos em atividades de mineração e metalurgia ao se engajar na promoção de cursos de atualização tecnológica em parceria com o Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG na década de 1970 (SANTOS e DINIZ, 2007).

O último grupo apresentado é formado por organizações voltadas à transferência de tecnologias. Essas organizações atuam de forma a auxiliar o sistema produtivo a conhecer e a implementar tecnologias, através de licenciamentos de patentes de universidades e de criação e desenvolvimento de programas de inovação, conectando empresas a *start-ups* e a pesquisadores. Belo Horizonte possui um Parque Tecnológico (BHTEC), um agente de desenvolvimento e de conexões de negócios de base científica (BHTEC, 2020). Entretanto, esse parque não considera a atividade de mineração como de base científica. Em 2016, foi criada a Plataforma R3 Mineral, para ser uma rede colaborativa específica para a cadeia da mineração.

A transferência de tecnologias dentro do sistema de mineração no Brasil é ilustrada pela WIPO (2019b). A Tabela 3 apresenta as modalidades de serviços de assistência técnica, acordos de *know-how* e licenciamento de patentes realizados pelas empresas mineradoras brasileiras, nos últimos 15 anos.

TABELA 3: Tipos de transferência de tecnologia usados pelas mineradoras brasileiras no período de 2004 a 2019

MODALIDADES	CONTRATANTE	FORNECEDORES	
	Mineradoras Brasileiras	Fornecedores Brasileiros	Fornecedores Não Residentes
Serviços de Assistência Técnica	82%	10,30%	92,40%
Acordo de Know-how	1,60%	5,40%	6,90%
Licenciamento de Patentes	0	0,70%	0,70%
Total	83,60%	16,40%	100%

(Adaptada a partir de dados obtidos em WIPO (2019)).

A análise desses dados nos permite afirmar que as mineradoras brasileiras preferem contratar serviços de assistência técnica com fornecedores não residentes no país. Isso reforça a hipótese apresentada anteriormente, de que as empresas fornecedoras investem pouco em pesquisa e desenvolvimento no Brasil, e que o uso das patentes como um indicador tecnológico efetivo, no sentido de que as inovações desenvolvidas são efetivamente aplicadas pelas empresas extrativas minerais, pode não ser uma boa opção.

Nos últimos quinze anos, foram depositados 4.273 pedidos de patentes do setor de mineração no Brasil (WIPO, 2019). Desse total de patentes depositadas, apenas 59 foram licenciadas, ou seja, 1,38%. Uma informação relevante é que, apesar do grande número de patentes depositadas junto ao INPI, poucos licenciamentos de patentes foram feitos nos últimos 15 anos no Brasil. Isso pode indicar que a inovação no setor de mineração não passa necessariamente pelas patentes depositadas no país. Desses poucos licenciamentos, todos foram feitos com fornecedores, residentes ou não residentes. Nenhuma patente de universidades ou de centros de pesquisa brasileiros foi identificada como licenciada pelas empresas mineradoras, e os acordos de *know-how* são mais usados pelas mineradoras do que os licenciamentos de patentes. Desta forma, quando se discute a aplicação de tecnologias e inovações no setor de mineração, a presença dos fornecedores é fundamental, em peso maior que o de universidades e centros de pesquisa. A participação desse grupo em plataformas colaborativas, como a Plataforma R3 Mineral, é fundamental para que as inovações sejam efetivamente colocadas em prática pelas empresas.

2.4 - A produção de tecnologia e inovação no Sistema Regional de Inovação da Mineração de ferro de Minas Gerais

Esta seção apresenta um levantamento de patentes do setor mineral no Brasil e nuvens de palavras que possam exprimir tendências tecnológicas.

2.4.1 - Análise de patentes relacionadas à mineração

A produção de tecnologia e inovação no Sistema Regional de Inovação da Mineração de Ferro em Minas Gerais é avaliada através de pesquisa de patentes junto ao banco de dados do Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI).

Para o levantamento dos dados, foram usadas palavras-chave nos títulos e nos resumos das patentes do INPI. As palavras-chave utilizadas foram “mineração” e “rejeitos de mineração”. O uso do termo “mineração” de forma ampla tem como propósito captar tecnologias abrangentes associadas ao setor. O termo “rejeitos de mineração” foi utilizado com vistas a identificar possíveis desenvolvimentos de tecnologias associadas a uma demanda urgente para a economia do estado, relativa à destinação dos rejeitos de mineração. A pesquisa foi limitada ao espaço de tempo de 2015 até 2019, período marcado pelos desastres de Mariana e Brumadinho. Realizou-se ainda uma busca utilizando a razão social das empresas mineradoras localizadas em Minas Gerais no campo “depositante da patente”.

O objetivo dessa busca foi identificar as empresas mineradoras depositantes, o número total de pedidos junto ao INPI e quais destas patentes se referem aos rejeitos de mineração. Essas informações têm como propósito identificar os atores mais atuantes dentro do sistema assim como, os assuntos que mais despertam seu interesse. Tal etapa teve como limitação a não identificação de patentes que ainda estavam em período de sigilo.

Para a análise dos resultados, foram utilizados como referência os estudos da WIPO (2019a; 2019b) avaliando a dinâmica tecnológica da mineração mundial e do Brasil. Esses dois estudos se mostraram complementares ao mapeamento de patentes realizado aqui.

O Gráfico 1 mostra as empresas mineradoras instaladas em Minas Gerais que apresentaram pedidos de patentes junto o INPI, assim como o número total de pedidos de patentes apresentados por cada uma.

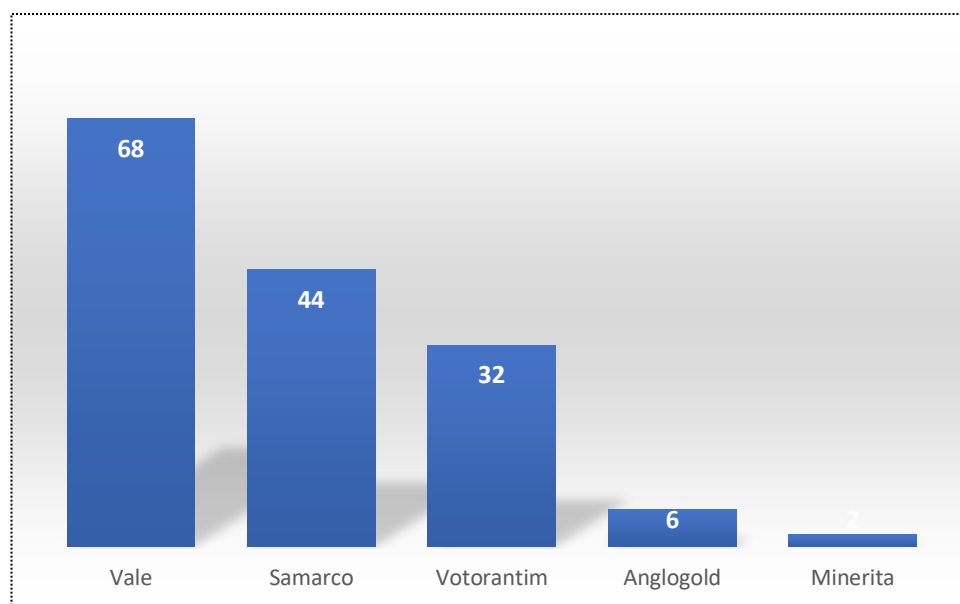


GRÁFICO 1: Patentes de empresas mineradoras instaladas no QFMG. (Elaborado a partir de dados obtidos em INPI, 2019).

Ao fazer a busca usando como critério empresas mineradoras depositantes, foram identificados 152 pedidos de patentes para as empresas mineradoras; a Vale é a maior depositante de pedidos de patentes junto ao INPI, com 68 pedidos apresentados no período pesquisado. Em segundo lugar, aparece a Samarco, que apresentou 44 pedidos de patentes. Em terceiro lugar, tem-se a Votorantim, atual Nexa, que apresentou 32 pedidos de patentes.

Levando em consideração a participação da Vale como acionista da Samarco, e se considerarmos essas empresas como de um mesmo grupo, teremos 112 pedidos de patentes em um universo de 152 pedidos. Esse número representa 73,68% dos pedidos de patentes feitos no país para a categoria mineração.

Resultado semelhante também foi observado no trabalho realizado pela WIPO (2019b) ainda que considerando um período diferente para análise. No estudo, entre os anos de 2000 e 2015, a Vale foi a principal mineradora depositante, seguida pela Samarco (WIPO, 2019b). Trata-se, portanto, de um quadro de forte concentração da produção tecnológica, nesse sistema regional de inovação, o que reflete a composição do mercado

no setor. É possível, ainda, notar que, para a atividade tecnológica da mineração, o tamanho das empresas importa, o que se relaciona com o volume de capital demandado para o progresso técnico nesse segmento.

O número de pedidos de patentes que mencionam rejeitos de mineração é pequeno: são apenas cinco pedidos identificados, em um universo de 152 patentes. Deve-se ressaltar uma limitação desse levantamento, a saber, a não identificação dos objetos dos pedidos de patentes, que se encontram ainda em período de sigilo.

2.4.2 - Tendências tecnológicas na mineração de Minas Gerais: uma análise a partir da nuvem de palavras

A partir do levantamento de patentes depositadas no INPI que possuem a palavra-chave mineração em seu título e no seu resumo, foi criada uma nuvem de palavras, utilizando-se o *software* R com o objetivo de confirmar as conclusões até então obtidas. Optou-se por pesquisar o título e resumo das patentes, porque a palavra rejeito pode não estar citada no título, mas no resumo.

A nuvem de palavras é uma ferramenta usada para se obter uma representação visual da frequência e do valor das palavras relevantes, dentro de um banco de dados. SUOMINEN *et al.* (2017) apontam o uso de softwares para o processamento de dados obtidos em banco de dados de patentes, e FREDSTRÖM *et al.* (2021) relatam que tecnologias de inteligência artificial como as nuvens de palavras podem indicar tendências tecnológicas a partir de dados previamente mapeados em banco de dados de patentes.

Desta forma, pretende-se mostrar as palavras mais relevantes, quando se fala de patentes depositadas no Brasil relacionadas à atividade de mineração.

O Quadro 3 apresenta a nuvem de palavras criada utilizando os títulos das patentes depositadas no INPI. A palavra mineração foi eliminada da nuvem, por não apresentar nenhuma contribuição ao trabalho.

primas de segunda geração, o grande volume de rejeitos gerados pelas empresas mineradoras de minério de ferro e questões de preparação, armazenagem e de transporte desses rejeitos.

2.5 - Conclusões

A atividade de mineração possui raízes históricas no Estado de Minas Gerais, favoráveis ao desenvolvimento de um Sistema Regional de Inovação com forte viés setorial, gerando habilidades e conhecimentos que permitiram às empresas mineradoras um ganho expressivo de mercado. A presença de diversas organizações cruciais para um sistema de inovação, apresentada neste trabalho, reforça essa afirmação. Porém, o sistema existente ainda pode avançar, pois, apesar de sua importância econômica e considerando a vocação local para a atividade de mineração, não existe no estado um parque tecnológico dedicado, ainda que parcialmente, a essa atividade econômica.

O mapeamento mostrou que apenas uma das empresas participantes do Sistema Regional de Inovação possui quase 80% da produção nacional de minério de ferro, e, somadas às três maiores, essas representam mais de 90% desse mercado. Há uma grande concentração de mercado, o que implica em concentração do poder de decisão nesses atores que possuem maior capacidade econômica. Essas empresas possuem atuação no mercado global. Por outro lado, uma variedade e diversidade podem ser notadas entre as demais organizações do Sistema Regional de Inovação, como universidades e centros de pesquisa públicos e privados, órgãos de fomento atuantes, além de associações técnicas, sindicatos e outras organizações. Há relatos na literatura que defendem a participação do maior número de possíveis beneficiados para as atividades inovadoras. Nesse espírito, o Sistema Regional de Inovação deve possuir abertura para que novos interessados atuem de maneira ampla e irrestrita no desenvolvimento e implementação de inovações, tanto em relação ao processo produtivo quanto a inovações com rejeitos de mineração.

O trabalho também confirmou a grande relevância dos fornecedores de equipamentos e de serviços da cadeia de mineração, sendo os principais agentes depositantes de patentes do setor. Historicamente, as empresas mineradoras adquirem as inovações de fornecedores tradicionais e globais, principalmente através da contratação de serviços de assistência técnica. E apesar de sua tradição em mineração, o estado de Minas Gerais não conseguiu atrair empresas fornecedoras globais para nele se instalarem.

A deficiência de políticas públicas de estímulo à inovação no setor de mineração e a inexistência de um parque tecnológico voltado para a atividade podem ser tomados como prováveis responsáveis por esse fato. Para Mazzucato (2014), o estado pode conduzir o sistema de inovação levando em consideração as vocações naturais através de políticas públicas. A definição de prioridades ou metas tecnológicas poderia levar ao aproveitamento dos rejeitos gerados pela mineração, através de seu aproveitamento como matéria-prima de segunda geração para outras cadeias produtivas.

O mapeamento de patentes do setor de mineração mostrou que também existe concentração entre os agentes depositantes de patentes somente a empresa Vale é responsável por 70% das patentes depositadas e que o foco dessas tecnologias é em ganhos de processo produtivo, por consequência ganhos econômicos obtidos na redução de custos. O transporte dos minérios obtidos também se mostra relevante. E embora o aproveitamento de rejeitos tenha sido identificado na nuvem de palavras, esse tema não se mostrou prioritário para os principais agentes da inovação no setor da mineração, que são os fornecedores de equipamentos e de serviços, que inclusive não se encontram instalados no Brasil.

Um caminho a ser trilhado seria a atração dos principais fornecedores de equipamentos e de serviços mundiais para a atividade de mineração para a participação em um parque tecnológico voltado para a mineração no estado de Minas Gerais, o qual poderia ser um ponto de convergência entre as empresas mineradoras e as empresas fornecedoras, e com as universidades, centros de pesquisa e demais organizações participantes do sistema de inovação. Tudo isso seria direcionado pelo estado através de políticas públicas que determinem os alvos prioritários para a inovação na mineração de ferro.

3. REJEITOS DA MINERAÇÃO DE FERRO: CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÕES

Neste trabalho, são descritas a caracterização e a possível aplicação para diferentes resíduos gerados pela atividade de mineração de minério de ferro, chamados IOT (*iron ore tailings*). O processo de mineração é discutido para descrever a origem dos resíduos obtidos, materiais sem valor comercial com partículas granulométricas finas ou grossas. Aproximadamente 1,4 bilhões de toneladas de resíduos da mineração de minério de ferro são gerados anualmente, principalmente pela Austrália, Brasil e China. A caracterização físico-química desses materiais são apresentadas por diferentes técnicas, como fluorescência por raios x (XRF), difração por raios x (DRX), espectroscopia Mössbauer e granulometria, e indicam para a fração fina uma composição principal de óxido de ferro, variando entre 10% e 55% em relação a seu peso em massa, óxido de silício, variando entre 18% e 65% em relação a seu peso em massa, óxido de alumínio, com um percentual máximo de 15% em relação a seu peso em massa, e com tamanho das partículas variando entre 6 e 40 micrometros. Já a fração grossa apresenta em sua composição óxido de ferro, variando entre 8% e 48% em relação a seu peso em massa, óxido de silício, variando entre 30% e 90% em relação a seu peso em massa, e óxido de alumínio, com um percentual máximo de 20% em relação a seu peso em massa. Os rejeitos de minério de ferro são termicamente estáveis, não perigosos e não reativos. As principais aplicações para os rejeitos da mineração de minério de ferro são relacionadas à construção civil (agregados para concreto e aditivos para cimento Portland, argamassa), indústria cerâmica, produção de geopolímeros, síntese de novos materiais (zeólitas, sílica mesoporosa), adsorção de nanotubos de carbono, catálise, baterias e combustíveis célula. Uma visão geral dos bancos de dados de patentes relacionadas aos rejeitos da mineração de ferro também é apresentada, com uma classificação dos pedidos e instituições responsáveis pelos pedidos de patentes. Uma análise dos fatores limitantes para o uso de rejeitos de mineração de ferro é igualmente exposta, discutindo barreiras tecnológicas e de mercado, que dificultam o uso industrial e comercial dos rejeitos.

3.1 - Produção de minério de ferro no Brasil e no mundo

O ferro é o quarto elemento mais abundante e representa 5% da crosta terrestre. Comumente encontrado na forma de minério, o ferro é usado há mais de quatro mil anos

na fabricação de ferramentas e armas. O minério de ferro é parte essencial na fabricação do aço, e é difícil imaginar a sociedade moderna sem ele (FERREIRA e LEITE, 2015).

Os principais depósitos de minério de ferro são encontrados na Austrália, Brasil, Canadá, Índia, China, Europa e África do Sul, como mostra a Figura 2.

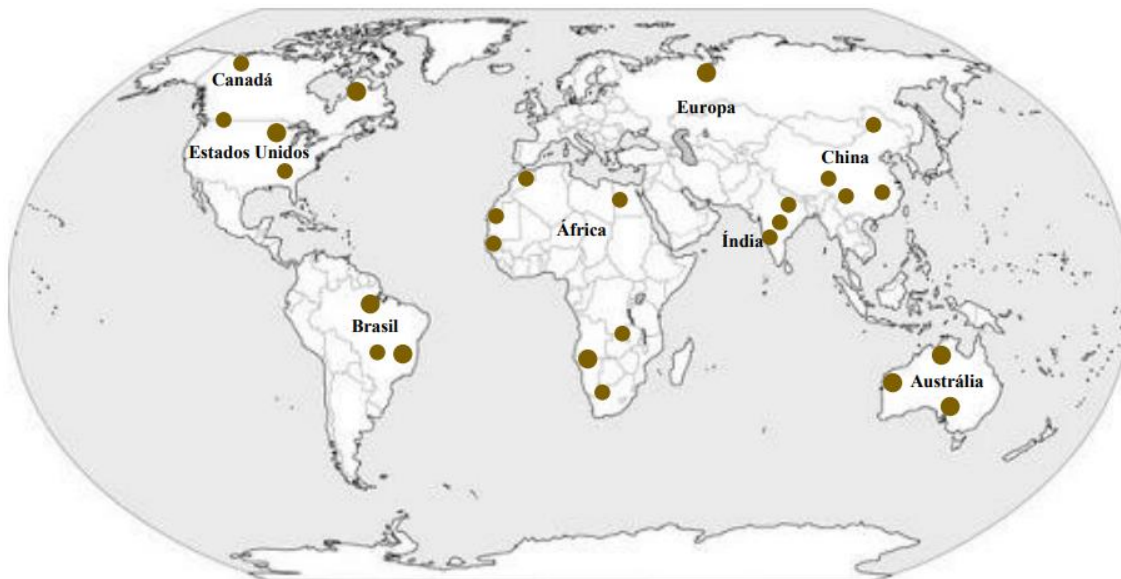


FIGURA 2: Mapa mundial indicando a localização dos depósitos economicamente viáveis de minério de ferro (Adaptada de USMAN *et al.*, 2019 e BANERJEE *et al.*, 2018).

De acordo com *Mineral Commodity Summaries* (USGS, 2020), as reservas de minério de ferro bruto no mundo são de 170 bilhões de toneladas. O Brasil possui reservas de 30 bilhões de toneladas, sendo superado somente pela Austrália, que possui reservas de 48 bilhões de toneladas. Em 2018, o Brasil comercializou 515 milhões de toneladas de produtos de minério de ferro, como minério de ferro bruto e pelotas de minério de ferro, de acordo com o Anuário das Principais Substâncias Mineraias Brasileiras; a produção brasileira de minério de ferro, nesse mesmo ano, foi de 450 milhões de toneladas (ANM, 2019). Em 2019, a produção de minério de ferro no Brasil foi de 510 milhões de toneladas, de acordo com o Anuário das Principais Substâncias Mineraias Brasileiras (ANM, 2020).

A região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais é considerada a mais relevante produtora de minério de ferro do Brasil, responsável por 51,6% do minério exportado do país (GOMES *et al.*, 2015; IBRAM, 2019). Entre 2018 e 2019, o estado de Minas Gerais extraiu aproximadamente 180 milhões de toneladas anuais de minério de ferro (IBRAM, 2019).

No Brasil, o minério de ferro possui dois principais tipos, baseados em sua mineralogia, que são a hematita e o itabirito; essa classificação também é chamada de formação em camadas de minério, sendo expressa em inglês pela sigla BIF (*banded iron formations*). O minério do tipo hematita é mais rico em ferro, sendo extraído principalmente no estado do Pará, e possui um percentual médio de 60% de óxido de ferro maior que 60%. Já o minério do tipo itabirito é extraído principalmente do estado de Minas Gerais, dentro do Quadrilátero Ferrífero, e possui teores médios de 50% de óxido de ferro (IBRAM, 2012).

Em ambos os casos, os minérios são compostos principalmente por hematita (α - Fe_2O_3). Entretanto, magnetita (Fe_3O_4) e goethite (α - FeOOH) são também encontrados, em consideráveis concentrações em sua composição. Outros minerais, que não possuem ferro, mas que ocorrem nas formações minerais, são chamados de minérios de ganga. Nos minérios de ferro brasileiros, os principais minérios de ganga são o quartzo (SiO_2); caulinita ($\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), que introduzem óxido de alumínio (Al_2O_3) e sílica; gibsitita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) também contribui com o óxido de alumínio. Outros contaminantes químicos menores, como cálcio, magnésio, manganês, enxofre (S) e fósforo (P), também podem estar presentes nos minérios brasileiros (YANG *et al.*, 2014).

3.1.1 - O processo de beneficiamento do minério de ferro

De modo geral, o processo de beneficiamento de minério de ferro envolve operações para modificar o tamanho das partículas e para aumentar o teor de ferro, sem modificar as características químicas dos minerais (LIMA e ABREU, 2020). O processamento do minério de ferro começa com a fase de extração, tipicamente em uma mina com cava a céu aberto. Nas unidades de tratamento de minerais, o minério lavrado é britado, moído, peneirado e separado de uma fase rica em sílica, através do processo de flotação reversa; esse processo é utilizado para os minérios que ocorrem no estado de Minas Gerais. Após esse estágio, o minério, agora transformado em uma polpa, atinge as especificações físicas e químicas necessárias para os processos industriais subsequentes (NAKHAEI e IRANNAJAD, 2018; ARAÚJO *et al.*, 2003). Nos minérios em que a concentração de óxido de ferro já é elevada (por exemplo, minério de Carajás, no estado do Pará, Brasil), o processo é de simples britagem e separação por tamanho das partículas para se obter um produto pronto para comercialização (NAKHAEI e IRANNAJAD, 2018).

A Figura 3 apresenta um fluxograma típico de beneficiamento de minério de ferro, de acordo com as Normas Brasileiras de Mineração (DNPM, 2018).

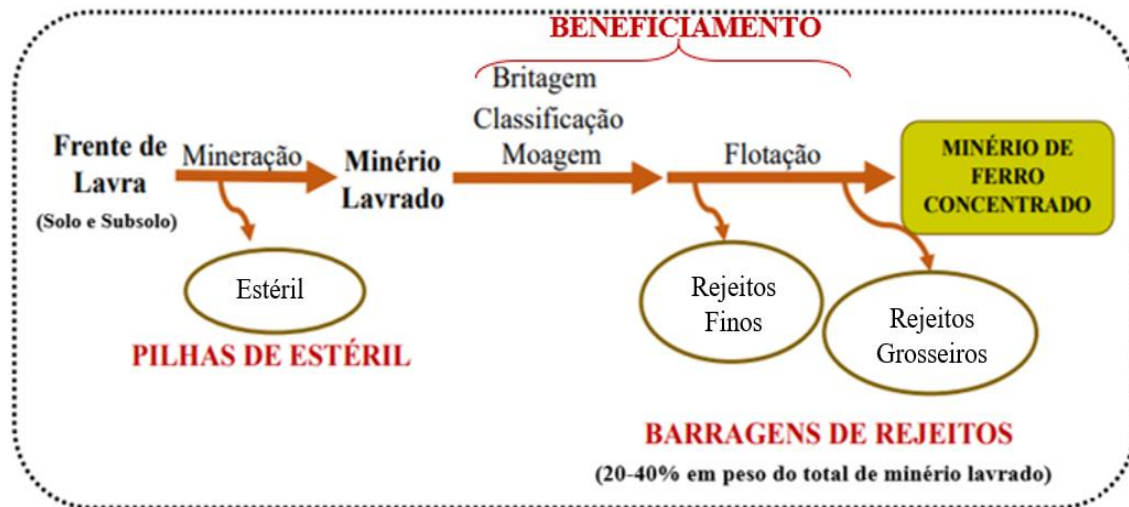


FIGURA 3: Fluxograma típico de beneficiamento de minério de ferro

Os minerais encontrados em formações por camadas, do tipo BIF, citados anteriormente, exigem a adição de uma etapa de concentração, porque o processo de separação por tamanho das partículas não é suficiente para se obter produtos com teores elevados de óxido de ferro. O problema é que essa etapa deve ser realizada com o uso de água, o que pode gerar um grande número de barragens. Os principais métodos de concentração usados são a gravitacional e a separação magnética (LIMA e ABREU, 2020; NAKHAEI e IRANNAJAD, 2018; ARAÚJO *et al.*, 2003; ROY *et al.*, 2020).

A flotação é um dos métodos a úmido mais usados para a separação de espécies minerais. Na flotação, o caráter hidrofóbico/hidrofílico dos minerais é alterado através da adição de reagentes específicos como compostos derivados de enxofre, ácidos graxos, aminas e amido. Esses produtos químicos podem ser divididos em coletores, depressores, espumantes e modificadores ou reguladores (MATIOLO *et al.*, 2020).

Para o minério de ferro, principalmente para aqueles com baixo teor de óxido de ferro, o método de concentração mais usado é o da flotação catiônica reversa, em que o quartzo é recuperado da espuma e os óxidos de ferro permanecem na fase de polpa (NAKHAEI e IRANNAJAD, 2018; MATIOLO *et al.*, 2020). Esse é o processo de separação mais usado para a mineração de ferro, usando-se o itabirito.

Durante essa fase de extração, dois tipos de materiais que não possuem valor econômico, chamados genericamente de rejeitos de minério de ferro, em inglês IOT, são gerados. Por exemplo, têm-se um rejeito grosso, gerado na fase de flotação, constituído

principalmente de quartzo, e um rejeito fino, cujos principais componentes são quartzo, hematita, goethita e caulinita, principalmente. A fração fina do rejeito é gerada durante o processo de deslamagem, que acontece imediatamente após a flotação. No Brasil, a geração de rejeitos de minério de ferro (em frações finas ou grossas) é estimada em um percentual entre 20% e 40% em relação a seu peso do total do minério lavrado (LIMA e ABREU, 2020; MATIOLO *et al.*, 2020).

3.1.2 - A geração de rejeitos de minério de ferro (IOT) e problemas ambientais

A mineração de minério de ferro é de grande importância para o desenvolvimento econômico, entretanto promove uma grande extensão de áreas alteradas e a geração de alguns bilhões de toneladas de rejeitos, anualmente (SILVA *et al.*, 2020; ALVES e ARAÚJO, 2020).

De acordo com a Fundação Estadual de Meio Ambiente do Estado de Minas Gerais (FEAM), em 2017, 562 milhões de toneladas de rejeitos de minério de ferro foram gerados apenas nesse estado. A China gera 1,5 toneladas de rejeitos para cada tonelada de minério de ferro concentrado (LIU *et al.*, 2010; XU *et al.*, 2019). Nesse país, a produção anual de rejeitos de minério de ferro atinge aproximadamente 180 milhões de toneladas, número que está aumentando (ZHANG *et al.*, 2006). Na Índia, entre 10 e 12 milhões de toneladas são geradas na forma de rejeitos finos (DEVI *et al.*, 2015). Na Austrália, é estimada uma geração anual de 632 milhões de toneladas de rejeitos (SANTOS, 2013). Em países como Canadá, Estados Unidos da América e África do Sul, o volume de rejeitos gerados anualmente é menor que 1 milhão de toneladas (USMAN *et al.*, 2019; USGS, 2019).

O Gráfico 2 apresenta a geração anual de rejeitos de minério de ferro nos principais países mineradores.

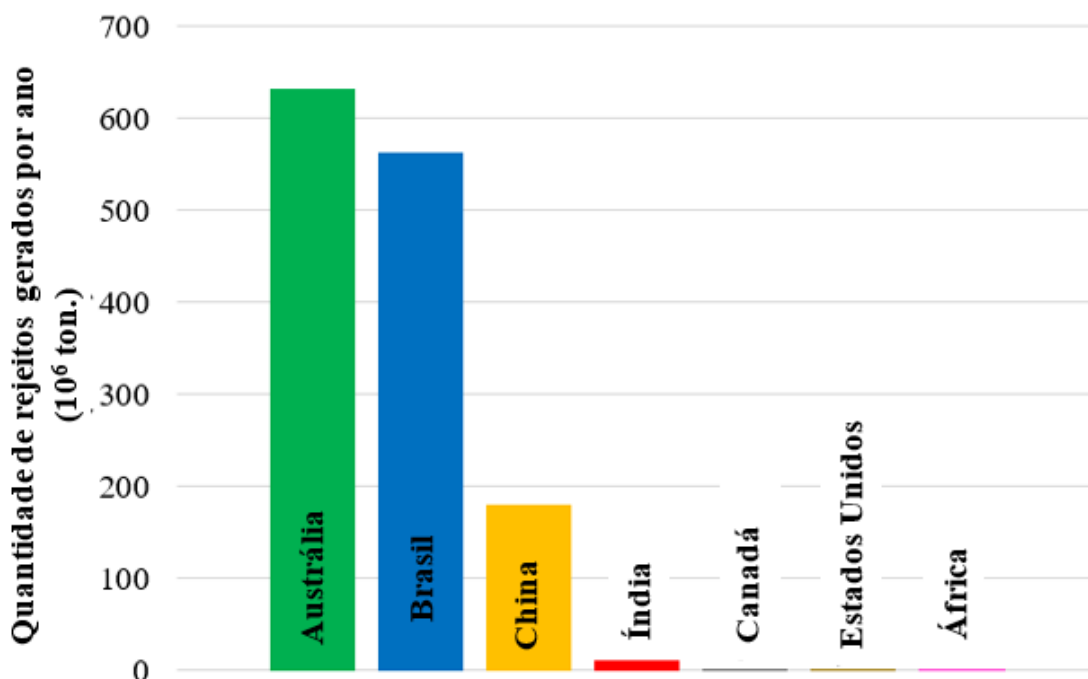


GRÁFICO 2: Quantidade de rejeitos de minério de ferro gerados anualmente nos países mineradores

No Brasil, aproximadamente 95% dos rejeitos gerados na mineração de ferro são destinados a 672 barragens de rejeitos (IBRAM, 2019; FONTES *et al.*, 2019), sendo 340 dessas barragens localizadas no estado de Minas Gerais (FONTES *et al.*, 2019). Entre 2015 e 2019, aconteceram mais de dez acidentes relacionados ao rompimento de barragens em vários países como Brasil, Estados Unidos da América, Canadá, China e Peru (FALCONI *et al.*, 2020). A ruptura da barragem de Fundão, na cidade de Mariana, Minas Gerais, em 2015, liberou mais de trinta milhões de metros cúbicos de água e sedimentos obtidos do processo de tratamento de minério de ferro ao meio ambiente. Além do dano ambiental, esse acidente causou a morte de 19 pessoas (D'AZEVEDO *et al.*, 2020; HATJE *et al.*, 2017). Outro grande rompimento de barragem ocorreu em 2019, também no estado de Minas Gerais, na cidade de Brumadinho, na barragem de Córrego do Feijão, causando a morte de 257 pessoas e inestimados danos ambientais. Ao menos doze milhões de metros cúbicos de água e rejeitos de minério de ferro foram derramados no rio Paraopeba e em sua bacia (SILVA *et al.*, 2020; THOMPSON *et al.*, 2020).

3.1.3 - Caracterização física e química dos rejeitos de mineração de ferro

A composição química e mineralógica dos rejeitos gerados durante o processo de beneficiamento de minério de ferro dependem basicamente da mineralogia da rocha processada, da natureza dos fluidos de processamentos usados nos minerais-alvo, na

eficiência do processamento e no grau de intemperismo antes do armazenamento do material em barragens (D'AZEVEDO *et al.*, 2020).

Durante a exploração do minério de ferro, a britagem das rochas gera partículas de óxido de ferro, quartzo e argila. Dependendo da classificação granulométrica, os rejeitos podem ser classificados como finos ou grossos (rejeitos granulares ou arenosos). Minério de ferro com elevado teor de argila tende a gerar partículas mais finas (SRIVASTAVA *et al.*, 2001).

Rejeitos finos são geralmente obtidos do processo de beneficiamento que envolve a deslamagem. Esses rejeitos, em geral, são extremamente finos, caracterizados basicamente por frações de tamanho correspondentes às da argila, com mais de 90% em relação a seu peso em massa menor que 74 micrometros (YANG *et al.*, 2014).

A flotação gera rejeitos constituídos basicamente de sílica (SiO_2) com pequenas quantidades de óxido de ferro, hidróxidos e caulinita, com tamanho médio de partículas de 150 micrometros, chamados de rejeitos granulares ou arenosos (ZUCHERATTE *et al.*, 2017). Em termos de mineralogia, a maior parte dos rejeitos é composta por quartzo e por pequenas quantidades de hematita e de goethita.

Um parâmetro importante que deve ser obtido ao se caracterizar rejeitos é seu percentual de água. Muitos artigos publicados relatam que o teor de água é inferior a 15% para os rejeitos granulares; para os rejeitos finos, esse percentual é geralmente maior que 20% (YANG *et al.*, 2014; FONTES *et al.*, 2016; GALVÃO *et al.*, 2018; WEISHI *et al.*, 2018).

Uma das principais técnicas usadas para estudar a composição química dos rejeitos de minério de ferro é a fluorescência por raios x (XRF). Análises químicas de rejeitos de minério de ferro de diferentes trabalhos encontrados na literatura são apresentadas na Tabela 4.

O rejeito granular estudado por MELO *et al.* (2011) é constituído principalmente por SiO_2 (84%) e pequenas concentrações de $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (12%). Já a composição dos rejeitos arenosos estudados por ZUCHERATTE *et al.* (2017) apresenta 49% de SiO_2 e 29% de $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Análises por difração de raios X para rejeitos dessa natureza indicam a presença das fases de quartzo (SiO_2), hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$) e magnetita

(Fe₃O₄); esta apresenta concentrações muito baixas em minérios comerciais brasileiros (SILVA *et al.*, 2020; MELO *et al.*, 2011; BICALHO *et al.*, 2020; PRATES *et al.*, 2020).

TABELA 4. Análises químicas obtidas por XRF de diversos rejeitos de minério de ferro

COMPONENTES						
(% em Relação a Massa dos Rejeitos)						
Ferro	SiO₂	Al₂O₃	CaO	MgO	Referência	Localização da Mina
8,38	90,40	0,43	0,06	<0,1	DA SILVA <i>et al.</i> , 2014	MG – Brasil
11,60	84,20	1,60	-	-	MELO <i>et al.</i> , 2011	MG – Brasil
11,31	75,23	2,64	1,47	2,10	CHENG <i>et al.</i> , 2016	Liaoning – China
12,31	34,72	16,22	7,63	8,92	DUSN <i>et al.</i> , 2016	Nanjing – China
15,10	84,40	0,45	0,07	<0,1	DA SILVA <i>et al.</i> , 2014	MG – Brasil
18,58	36,48	11,67	16,85	5,66	YANG <i>et al.</i> , 2015	Jiangsu – China
21,2	45,6	12,1	1,79	-	ZHENG <i>et al.</i> , 2016	China
21,4	65,7	0,8	-	-	AUGUSTO <i>et al.</i> , 2018	MG – Brasil
21,5	71,4	-	-	-	MATIOLO <i>et al.</i> , 2020	MG – Brasil
29,35	49,20	1,46	0,12	-	ZUCHERATTE <i>et al.</i> , 2017	MG – Brasil
32,0	46,68	3,89	-	-	DE FREITAS <i>et al.</i> , 2019	MG – Brasil
35,0	63,0	1,20	-	-	FILHO <i>et al.</i> , 2017	MG – Brasil
38,8	14	2,01	37,5	0,36	ZHENG <i>et al.</i> , 2016	China
42,4	47,9	5,61	0,13	< 0,1	DA SILVA <i>et al.</i> , 2014	MG – Brasil
44,52	24,40	10,95	6,20	0,99	CHEN <i>et al.</i> , 2013	Hubei – China
47,80	30,0	21,2	0,1	0,1	GALVÃO <i>et al.</i> , 2018	MG – Brasil
51,37	15,11	3,39	0,23	0,16	LIMA e ABREU, 2020	MG – Brasil
55,78	16,58	15,46	1,44	0,13	GIRI <i>et al.</i> , 2011	Joda-Badbil, Orissa India
69,21	11,42	2,38	0,49	0,11	STEVIC' <i>et al.</i> , 2016	Bosnia e Herzegovina
71,70	20,10	2,30	0,10	-	PEREIRA e BERNARDIN, 2012	MG – Brasil
73,3	8,76	1,49	3,88	0,94	ZHENG <i>et al.</i> , 2016	China

A fração fina dos rejeitos estudados por PEREIRA *et al.* (2012) era composta principalmente por hematita α -Fe₂O₃ (72%) e por SiO₂ (20%). Um resultado semelhante foi encontrado por ZHENG *et al.* (2016), 73% α -Fe₂O₃ e 9% de SiO₂ e por STEVIC' *et al.* (2016), 69% α -Fe₂O₃ e 11% SiO₂. A composição química obtida por Augusto *et al.* (2018) mostrou que os rejeitos de minério de ferro provenientes da região de Catas Altas, Minas Gerais, são compostos principalmente por SiO₂, com 66%, e Fe, com 21%. Os rejeitos provenientes da empresa mineradora *Yeshan Mining Ore Company, Nanjing,*

China, estudados por DUAN *et al.* (2016), também mostraram um grande percentual de SiO₂, com 35%, se comparados com o teor de α -Fe₂O₃, de 12%.

Podemos observar que os principais constituintes dos rejeitos de minério de ferro são óxido de ferro, sílica e alumina. Alguns metais pesados, como cádmio, cromo, arsênio e mercúrio são encontrados em pequenas concentrações ou abaixo do limite de detecção de quantificação (ZHENG *et al.*, 2016; GENG *et al.*, 2020). Os resultados obtidos por FIGUEIREDO *et al.* (2017) mostram que os rejeitos são classificados como não perigosos, inertes, não corrosivos e não reativos, usando a Norma Brasileira NBR 10004.

As principais fases cristalinas dos rejeitos de minério de ferro detectadas através de difração de raios x são a hematita (α -Fe₂O₃), goethita (α -FeOOH), e quartzo (SiO₂) (DE FREITAS *et al.*, 2019; PRATES *et al.*, 2020; SAKTHIVEL *et al.*, 2009; DO CARMO *et al.*, 2019). A caulinita (Si₂Al₂O₅(OH)₄) é um mineral comumente associado aos rejeitos de minério de ferro (PRATES *et al.*, 2020), assim como a gipsita (Al(OH)₃). Um perfil típico de difração por Raios X é apresentada por SILVA *et al.* (2020).

As estruturas tridimensionais das principais fases dos óxidos encontrados nos rejeitos são apresentadas na Figura 4.

O Quadro 5 apresenta um resumo das principais características físicas e térmicas das fases de ferro encontradas nos rejeitos de minério de ferro.

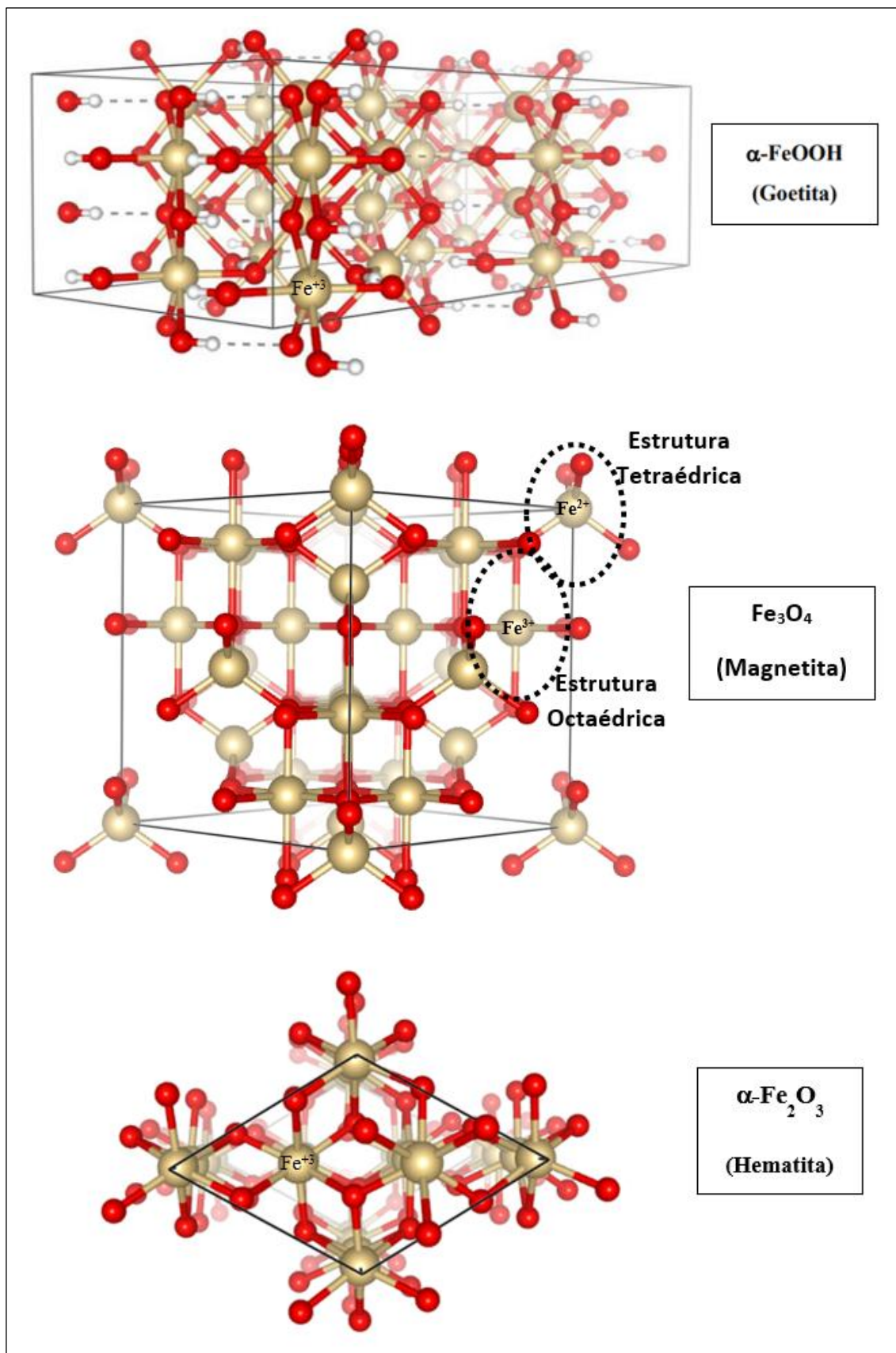


FIGURA 4. Estruturas tridimensionais das principais fases de minério de ferro encontradas em rejeitos (Fonte: MERCKYS *et al.*, 2016).

QUADRO 5. Principais características das fases de ferro encontradas nos rejeitos de minério de ferro: cor, morfologia, magnetismo e tipo de estrutura.

Fase e Cor	Morfologia e Tipo de Magnetismo	Estrutura
α-FeOOH (Goetita) - Oxi-hidróxido - Amarela/Marrom	- Cristais Acirculares e Alongados - Antiferromagnéticos	- <i>Ortorrômico</i> : As estruturas consistem em uma matriz de ânions (O^{2-} e OH^-) empilhados ao longo da direção com íons Fe^{3+} ocupando a metade dos interstícios octaédricos dentro da camada. Na superfície dos cristais, os sítios vazios aparecem como ranhuras.
α-Fe₂O₃ (Hematita) - Óxido - Vermelha	- Placas e discos, hastes, esferas, elipsóides, rombohedros, estrelas e cubos. - Antiferromagnéticos	- <i>Romboedro/hexagonal</i> : As estruturas podem ser descritas como consistindo de matrizes de íons de oxigênio empilhados ao longo da [001] direção. Dois terços dos sítios são preenchidos com íons Fe^{3+} que são arranjados regularmente com dois sites preenchidos sendo seguidos por um site vazio. O arranjo dos cátions produz pares de $Fe(O)_6$ octaedros. Cada octaedro compartilha bordas com três octaedros vizinhos no mesmo plano e uma face com um octaedro em um plano adjacente.
Fe₃O₄ (Magnetita) - Óxido - Preta	- Partículas esféricas - Ferrimagnéticos	- <i>Estrutura cúbica do espinélio</i> : A estrutura é aquela de um espinélio invertido. Tem uma célula unitária cúbica com base em 32 O^{2-} íons que são regularmente cúbicos e compactados ao longo do plano [111]. Apresenta sítios tetraédricos ocupados por íons Fe^{3+} e sítios octaédricos ocupados por íons Fe^{2+} e Fe^{3+} íons.

A técnica de espectroscopia Mössbauer também foi usada para caracterizar as fases presentes nos rejeitos de minério de ferro em sua fração fina (SILVA *et al.*, 2020; AUGUSTO *et al.*, 2018; DE FREITAS *et al.*, 2019; BICALHO *et al.*, 2020; PRATES *et al.*, 2020). Um espectro típico de Mössbauer para rejeitos de minério de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais mostrou a presença de α -Fe₂O₃, α -FeOOH, e Fe₃O₄ (SILVA *et al.*, 2020). Os parâmetros hiperfinos desse material são apresentados na Tabela 5.

TABELA 5. Parâmetros da fração hiperfina (Adaptada de SILVA *et al.*, 2020).

REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO				
Fase/estado de oxidação	δ (mm s⁻¹) ±(0.05 mm/s)	Δ/ϵ (mm s⁻¹) ±(0.05 mm/s)	B_{HF} (T) ±(0.5 T)	Área Relativa ± (1%)
α-Fe₂O₃	0.36	-0.18	51.8	51
α-FeOOH	0.36	-0.24	37.8	43

Análises usando técnicas de microscopia eletrônica, por exemplo SEM e TEM, podem trazer informações sobre a morfologia, rugosidade e ainda sobre o tamanho das partículas dos rejeitos de minério de ferro. O uso de mapeamento de imagens por EDS/SEM indica a presença típica de pequenas partículas aglomeradas de hematita na superfície de grandes partículas planas de quartzo regulares (DE FREITAS *et al.*, 2019; PRATES *et al.*, 2020; SAKTHIVEL *et al.*, 2009).

A distribuição do tamanho das partículas é um parâmetro relevante que necessariamente deve ser avaliado. Durante a extração do minério de ferro, frações de diferentes tamanhos são geradas. Geralmente, rejeitos finos mostram partículas menores que 40 μm . Rejeitos arenosos grossos geralmente incluem partículas com tamanho médio de 100 μm , porém algumas partículas são maiores que 1000 μm (FILHO *et al.*, 2017). O Gráfico 3 apresenta informações sobre o tamanho das partículas dos rejeitos de minério de ferro de diferentes trabalhos na literatura. Esses dados indicam o quão diferente é a granulometria das amostras de diferentes tipos de rejeitos de minério de ferro e como é importante a investigação do tamanho das partículas desse material para o estudo de aplicações tecnológicas que poderiam receber esses rejeitos. Uma curva de distribuição granulométrica típica de rejeitos de mineração de ferro finos da região do Quadrilátero Ferrífero é apresentada no Gráfico 4. Os rejeitos de minério de ferro em geral possuem áreas superficiais muito baixas, por exemplo 10 (YANG *et al.*, 2014); 0,6 a 3 (MA *et al.*, 2016), <1 (GALVÃO *et al.*, 2018; CHENG *et al.*, 2016; PRATES *et al.*, 2020), 2 (AUGUSTO *et al.*, 2018), 10 (BICALHO *et al.*, 2020), 6 m².g⁻¹ (BAI *et al.*, 2020; DONG *et al.*, 2020).

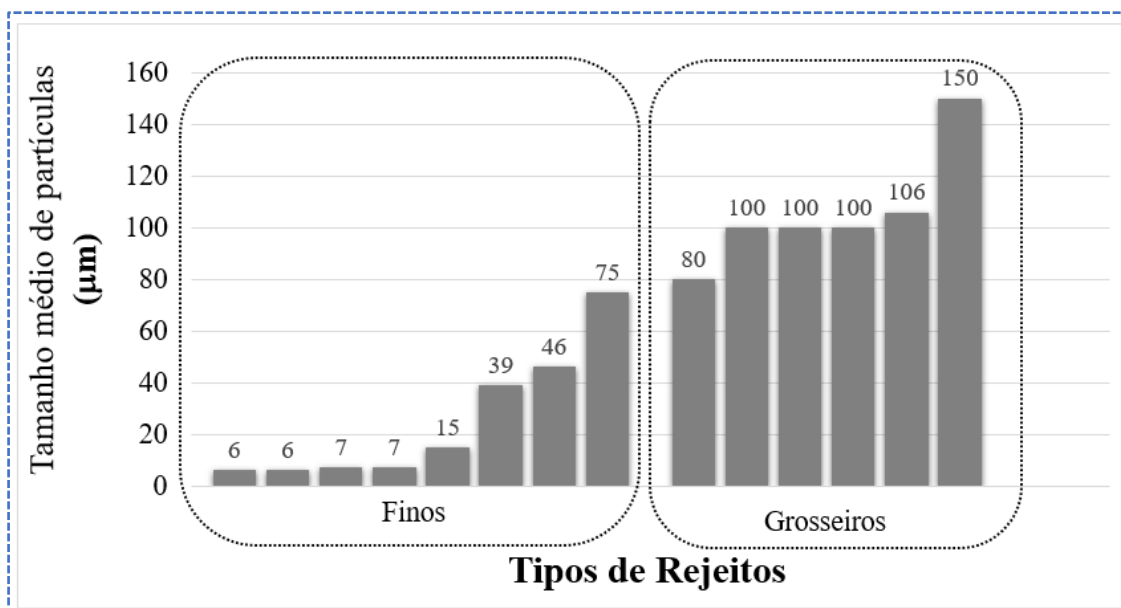


GRÁFICO 3: Tamanho médio das partículas de diferentes rejeitos de minério de ferro

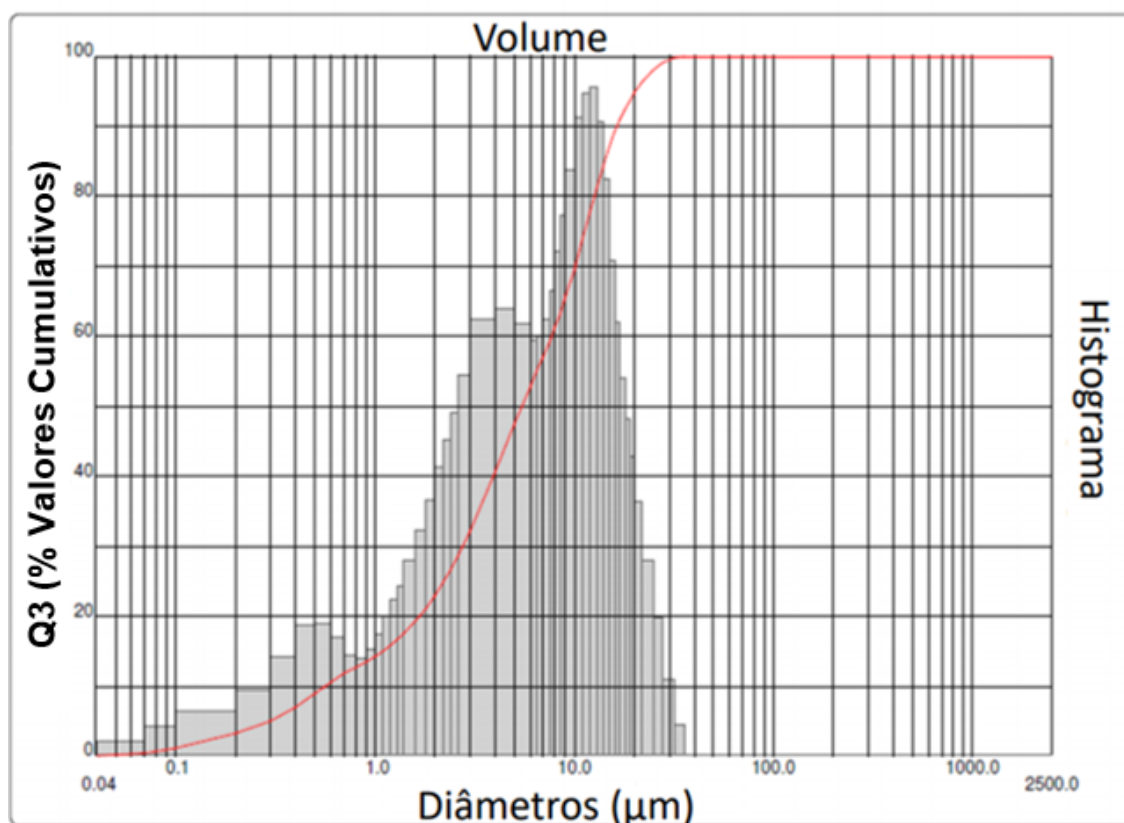


GRÁFICO 4. Curva de distribuição granulométrica de rejeitos de minério de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais

Análise térmica é uma técnica interessante que pode ajudar a determinar a quantidade de água e de grupos de hidróxidos presentes nos rejeitos de mineração de ferro. Tipicamente, três regiões de perda de peso são observadas em uma curva de termogravimetria (TG). A região 1, com temperaturas de 25-200 °C, indica a perda de

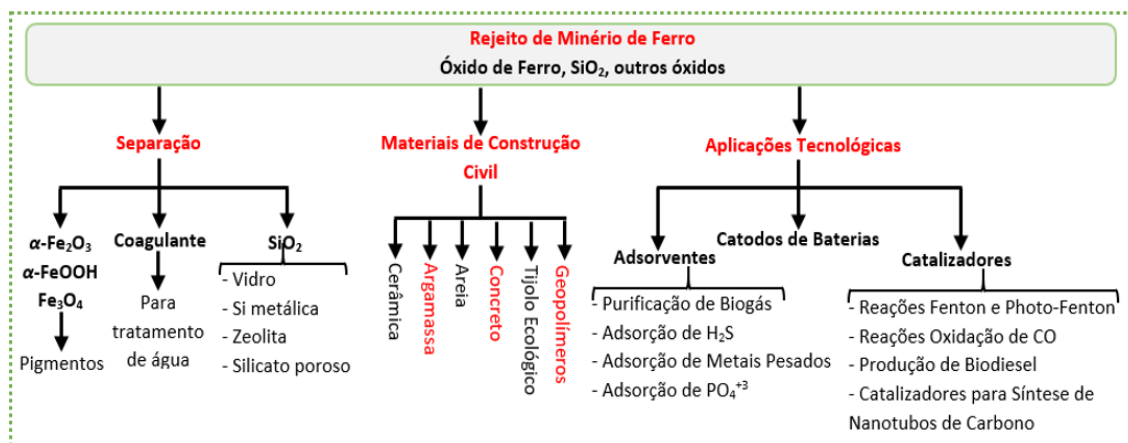
massa devido à dessorção de água da superfície das partículas, com um pico endotérmico perto dos 100°C. Na segunda região, com temperaturas de 200-600 °C, a desidroxilação da goetita (α -FeOOH) para hematita (α -Fe₂O₃) acontece. Mudanças estruturais nas fases de quartzo também podem ser observadas nessa região, com temperaturas entre 550 e 600 °C devido à transição estrutural $\alpha \rightarrow \beta$ do quartzo. Acima dos 600 °C, é possível observar processos de desidroxilação da caulinita para a metacaulinita, por exemplo (YANG *et al.*, 2014; CORNELL & SCHWERTMANN, 2006). Um perfil típico de análise de termogravimetria de um rejeito de minério de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais é apresentado no trabalho de SILVA *et al.* (2020).

DE SOUZA (2013) estudou rejeito arenoso proveniente da flotação de itabirito da região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais. Esse material pode ser classificado como não perigoso e inerte (classe IIB), apresentando um pH de 8,13, o que o classifica como não corrosivo e não reativo.

3.2 - Aplicações para rejeitos de minério de ferro

Rejeitos provenientes do processo de beneficiamento de minério de ferro têm sido usados para uma extensa variedade de aplicações. Alguns desses trabalhos são focados na construção civil (agregados para concreto, argamassa, aditivos para cimento Portland), indústria cerâmica (FONTES *et al.*, 2016; CHENG *et al.*, 2016; CARRASCO *et al.*, 2017; ALMEIDA *et al.*, 2020; CHENG *et al.*, 2020), materiais ativados por álcalis (DO CARMO *et al.*, 2019), síntese de novos materiais como zeólitas, sílica mesoporosa (BAI *et al.*, 2020; DONG *et al.*, 2020; LU *et al.*, 2020; IZIDORO *et al.*, 2019), nanotubos de carbono (SILVA *et al.*, 2020), adsorção (CRISTIANO *et al.*, 2020), catálise (AUGUSTO *et al.*, 2018), baterias (STEVIC' *et al.*, 2016) e aplicações para células de carga (JADHAV *et al.*, 2015).

O Quadro 6 apresenta uma ideia geral das principais aplicações para os rejeitos de minério de ferro.



QUADRO 6: Possíveis aplicações para os rejeitos de minério de ferro discutidos nesse Trabalho.

O uso dos rejeitos de minério de ferro na indústria da construção civil é uma alternativa interessante em virtude do potencial de aproveitamento dos grandes volumes de rejeitos gerados. Entretanto, esses materiais somente devem ser usados após caracterização preliminar mineralógica, granulométrica, química, toxicológica e testes tecnológicos específicos (YELLISHETTY *et al.*, 2008).

Algumas dessas aplicações são para a produção de tijolos, concreto, argamassa, cerâmicas, materiais ativados por álcalis e pigmentos (GOU *et al.*, 2019). O Quadro 7 mostra variadas aplicações para os rejeitos de minério de ferro relacionados a construção civil e materiais de construção, produção de cerâmica, polímeros e pigmentos, além do percentual de ferro (Fe_2O_3) e de sílica (SiO_2) de cada rejeito, referente à aplicação.

QUADRO 7. Aplicações para rejeitos de minério de ferro (IOT) em materiais de construção baseados em sua composição química

APLICAÇÃO	NOTA	USO do REJEITO	% m/m Fe_2O_3	% m/m SiO_2	REFERÊNCIA
Tijolos eco-friendly	Tijolos produzidos com menor consumo de energia e liberação de CO_2	Os rejeitos são usados para substituição total ou parcial dos agregados finos.	11	35	WEISHI <i>et al.</i> (2018)
			31	24	CHEN <i>et al.</i> (2011)
			19	36	YANG <i>et al.</i> (2014)
Concreto	Produção de concreto com menor consumo de energia e liberação de CO_2	Os rejeitos são usados para substituição total ou parcial dos agregados finos.	29	49	ZUCHERATTE <i>et al.</i> (2017)
			11	75	CHENG <i>et al.</i> (2016)
			56	8	ALMEIDA <i>et al.</i> (2020)
			35	63	FILHO <i>et al.</i> (2017)

			11	75	CHENG <i>et al.</i> (2020)
Concretos com Ultraelevada performance	O uso de rejeitos traz baixa permeabilidade e elevada durabilidade, deixando o concreto compacto e denso.	Os rejeitos podem ser usados como agregados finos, já que são inertes e o tamanho das suas partículas é significativamente maior que o das partículas de cimento.	9	52	ZHAO <i>et al.</i> (2014)
Argamassa para concreto	O uso de rejeitos contribui para a redução de passivos ambientais gerados pela exploração mineral.	Os rejeitos são usados para substituição total ou parcial dos agregados finos	46	24	FONTES <i>et al.</i> (2016)
			34	46	CARRASCO <i>et al.</i> (2017)
			22	68	CARRASCO <i>et al.</i> (2017)
Cerâmicas	O uso de rejeitos contribui para reduzir o passivo ambiental gerado pela exploração mineral.	Rejeitos podem ser incorporados pelas cerâmicas e substituir parcialmente matérias-primas convencionais	50	44	FONTES <i>et al.</i> (2019)

Alguns exemplos interessantes do uso de rejeitos de minério de ferro na construção civil e de materiais são os modelos de casas construídas pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e pelas empresas mineradoras Samarco e Gerdau (Figura 5).



FIGURA 5. Modelos de casas usando rejeitos de minério de ferro em projetos de colaboração entre a UFMG/Samarco/Gerdau (FAPESP, 2019; JN, 2020).

Outra importante iniciativa foi a construção de uma pequena unidade industrial para a produção de diferentes itens para emprego na construção civil, como tijolos e

bloquetes na cidade de Itabirito, Minas Gerais, pela empresa mineradora Vale. O custo para a implementação desta unidade com capacidade de consumo de 30.000 toneladas de rejeitos de minério de ferro por ano foi de aproximadamente cinco milhões de dólares norte-americanos.

A seguir, apresenta-se uma revisão da literatura sobre o uso de rejeitos de minério de ferro para a produção de diferentes materiais na área de construção.

3.2.1 - Rejeitos de minério de ferro em argamassas e concreto

O concreto geralmente é feito usando-se agregados finos e grossos. Os rejeitos de minério de ferro podem ser empregados para substituição parcial ou total dos agregados finos, já que são inertes e o tamanho de suas partículas é significativamente maior que o das partículas de cimento (ZHAO *et al.*, 2014). Os rejeitos de minério de ferro são materiais finos (mais de 50% do material possui tamanho das suas partículas menores que 75 μm). Deve-se mencionar que, no Brasil, consomem-se anualmente 100 milhões de toneladas de argamassa, enquanto são gerados aproximadamente 184 milhões de toneladas de rejeitos de minério de ferro (FONTES *et al.*, 2016).

Rejeitos de minério de ferro arenosos poderiam ser usados para se fazer concreto no lugar da areia mineral; porém essa substituição é limitada em virtude da fina granulometria dos rejeitos. Por exemplo, a força de compressão de blocos inter-travados obtidos com rejeitos de minério de ferro arenosos e cimento atinge no máximo 18 MPa. Deve ser notado que o valor para a resistência mínima estipulada pela Norma NBR 9781, vigente no Brasil para pavimentação para estradas com tráfego leve, é de 35 Mpa (ABNT, 2013).

As propriedades físicas dos rejeitos possuem impacto significativo na trabalhabilidade, densidade, estabilidade dimensional, força e na durabilidade do concreto (GOU *et al.*, 2019). A substituição dos agregados finos pelos rejeitos de minério de ferro é possível, na medida em que essa substituição pode contribuir para melhorar as propriedades mecânicas do produto final (FONTES *et al.*, 2016; CHENG *et al.*, 2016; CARRASCO *et al.*, 2017; ALMEIDA *et al.*, 2020; YELLISHETTY *et al.*, 2008; CHEN *et al.*, 2011; ZHAO *et al.*, 2014; MENDES *et al.*, 2019).

Geralmente, mudanças no fluxo da argamassa são observadas na medida em que se inserem rejeitos de minério de ferro em sua composição. Esse fato está relacionado ao

tamanho das partículas dos rejeitos, as quais geralmente são menores que as partículas de agregados convencionalmente usados, o que leva a um aumento da área de superfície (GOU *et al.*, 2019).

O tempo de endurecimento da argamassa aumenta quando se adicionam rejeitos de minério de ferro em sua composição. Isso está associado à presença de alguns metais pesados. Eles atrasam a hidratação do cimento, formando uma camada de baixa permeabilidade em torno dos grãos não hidratados. Outras propriedades afetadas pela adição de rejeitos de minério de ferro são a densidade e a absorção de água propriedades físicas relacionadas à porosidade, a qual é igualmente afetada (IBRAM, 2019).

O uso de rejeitos de minério de ferro em argamassas e concreto não é possível quando a substituição dos agregados convencionais for superior a 20%. Adicionalmente, essa argamassa irá absorver mais água por capilaridade do que uma argamassa convencional (FONTES *et al.*, 2016). Entretanto, alguns trabalhos apontam que o emprego de rejeitos de minério de ferro causa menor absorção de água, menor porosidade e menor desgaste superficial em comparação com argamassas produzidas utilizando-se somente agregados convencionais. Esses resultados são geralmente relacionados ao enchimento dos poros do material pelos rejeitos de minério de ferro, que, em geral, são muito finos (FILHO *et al.*, 2017).

A força compressiva de argamassas preparadas com rejeitos de minério de ferro é melhor, e isso é usualmente associado ao tamanho das partículas, que melhoram a estrutura porosa. Esse aumento na resistência apresenta um limite na quantidade de rejeitos que pode variar de acordo com as suas características (CHENG *et al.*, 2016; CHENG *et al.*, 2020).

Rejeitos de minério de ferro com elevado teor de SiO₂ podem ser usados no preparo de concreto para substituição de cimento, de acordo com resultados apresentados por CHENG *et al.* (2016; 2020). Os resultados obtidos por esses autores mostram que a quantidade de rejeitos usados pode afetar a durabilidade do concreto, e, na medida em que se eleva o percentual de rejeitos no cimento, a força compressiva do concreto tende a cair.

De modo geral, pode-se resumir que o uso de rejeitos de minério de ferro como agregados finos leva a uma elevação da força compressiva, o que pode ser associado ao tamanho das partículas que preenchem os poros da argamassa. Em comparação, na

mesma condição de trabalhabilidade, a força compressiva cai para rejeitos que precisam de mais água. Assim, considerando a força compressiva e a trabalhabilidade de argamassas e concretos, é recomendável que não se use mais do que 30% de rejeitos na substituição de agregados finos (ZHAO *et al.*, 2014; GOU *et al.*, 2019).

Sobre a durabilidade, o uso de rejeitos de minério de ferro causa um efeito diferente. Alguns trabalhos mostram que a penetração de íons de cloreto aumenta na medida em que o percentual de rejeitos usados aumenta, enquanto outros trabalhos mostram uma redução da permeabilidade desse íon. Resultados similares foram obtidos para íons de sulfato e de carbonato (ALMEIDA *et al.*, 2020).

3.3 - Materiais ativados por álcalis e geopolímeros

Materiais ativados por álcalis e geopolímeros são materiais inorgânicos produzidos pela ativação alcalina de aluminossilicatos. A síntese envolve o uso de uma solução concentrada de hidróxido alcalino e silicatos. O composto resultante apresenta uma estrutura polimérica inorgânica muito estável, amorfa ou semi-cristalina com camadas interconectadas de Si-O-Al-O-Si. Materiais ativados por álcalis possuem propriedades físicas e químicas semelhantes àquelas do cimento Portland com vantagens consideráveis, como durabilidade superior, resistência a sulfatos, ácidos, ao fogo e à penetração de íons de cloreto (DO CARMO *et al.*, 2019). Essas estruturas podem ser feitas com rejeitos de minério de ferro (DUAN *et al.*, 2016; DO CARMO *et al.*, 2019; KURANCHIE *et al.*, 2016). Alguns trabalhos mostram que os materiais ativados com álcalis podem ser preparados com cinza volante e rejeitos de minério de ferro e que a porosidade do material aumenta na medida em que se adicionam rejeitos. Entretanto, a adição deve ser menor que 40% de seu peso em massa. Nesse caso, o material ativado obtido mostrou uma ampla distribuição dos diâmetros dos poros (entre 3 a 40.000nm) concentrados entre 10-110nm.

Para a produção de geopolímeros, a caracterização dos rejeitos de minério de ferro deve ser realizada para se determinar os percentuais de sílica e de alumina de sua composição. Isso se mostra necessário já que a síntese dessas estruturas geralmente requer uma relação entre sílica e alumina entre 3,2 e 4,5 (DAVIDOVITS, 2015).

DO CARMO *et al.* (2019) sintetizaram geopolímeros usando rejeitos de minério de ferro com elevados teores de sílica e baixos teores de alumina. Os rejeitos possuem uma relação entre esses dois elementos de 4,59. O material obtido mostrou elevada

resistência à compressão e flexão, atingindo valores de cerca de 100 Mpa para a resistência à compressão e de 20 Mpa para resistência à flexão. Imagens usando a técnica SEM mostram estruturas com baixa porosidade, e pela técnica XRD mostram a presença da fase de zeólita na estrutura do geopolímero formado. Uma iniciativa muito interessante na área de geopolímeros é a *startup* GEEGO; criada em 2019, desenvolve diferentes produtos geopoliméricos usando rejeitos de minério de ferro em sua composição.

A Figura 6 mostra algumas estruturas geopoliméricas produzidas por essa *startup*.

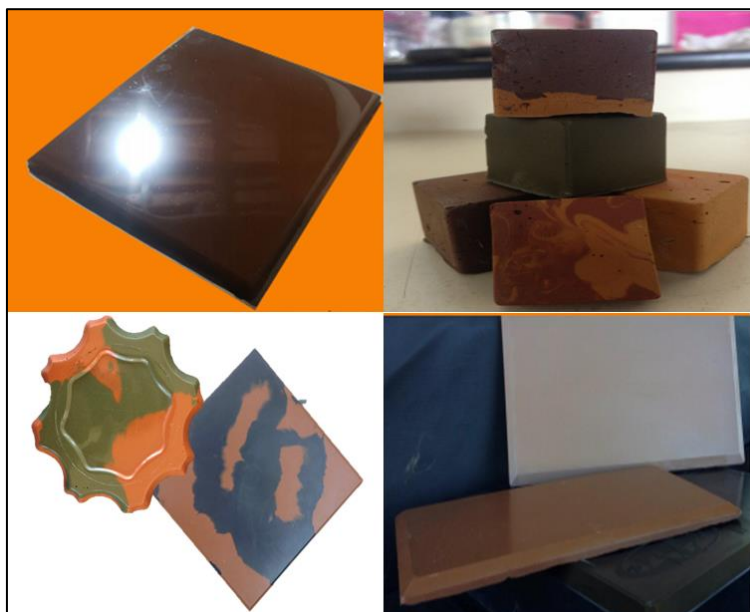


FIGURA 6. Imagens de produtos de geopolímeros

3.3.1 - Cerâmicas

Os rejeitos de minério de ferro possuem partículas cujo tamanho e formato permitem seu uso na indústria cerâmica, dessa forma essa é uma das possíveis aplicações para os rejeitos. As argilas usadas para a produção de cerâmicas normalmente são constituídas por silicatos com elevados teores de sílica e de alumina, além de baixos teores de ferro. Alguns rejeitos de minério de ferro possuem essas características (DA SILVA *et al.*, 2014).

O uso dos rejeitos de minério de ferro com partículas pequenas é uma excelente alternativa para a produção de pisos e azulejos. A adição desses rejeitos à massa usada para a produção de cerâmicas geralmente apresenta uma elevada porosidade (cerca de 42,5%) quando comparada à cerâmica pura (25,6%). A adição desses rejeitos também eleva a força, porém reduz a densidade e a absorção de água, possivelmente pelo comportamento hidrofóbico dos rejeitos (DA SILVA *et al.*, 2014).

O uso de rejeitos de minério de ferro com uma elevada concentração de sílica pode ser vantajoso quando o objetivo é a produção de azulejos cerâmicos. Nesse caso, o maior percentual de rejeitos na composição não pode ser maior que 40% de modo que as propriedades físicas como dureza e resistência a arranhões são semelhantes ou mesmo melhores se comparadas com aquelas produzidas sem rejeitos (DAS *et al.*, 2000).

Para a produção de azulejos de porcelana com rejeitos de minério de ferro, a temperatura de queima e a proporção dos rejeitos influenciam significativamente as propriedades do produto final. O aumento da temperatura eleva o adensamento e outras propriedades físicas. Entretanto, quando a quantidade de rejeitos usados é elevada, a temperatura de sinterização diminui. Considerando a produção industrial, a adição recomendada de rejeitos de minério de ferro é entre 55% e 65% em relação a sua massa, junto a 25% em relação a seu peso de caulim, e cerca de 10% a 20% em relação a seu peso de sílica, e a temperatura adequada de sinterização de 1.200 °C (CHEN *et al.*, 2013).

Tijolos com 20,94% de absorção de água e resistência à compressão equivalente a 4,27 Mpa foram obtidos usando-se rejeitos de minério de ferro com alto teor de sílica na indústria cerâmica. Essas amostras continham 29,1% em massa de rejeitos e atingiram índices de resistência de normas internacionais (MENDES *et al.*, 2019).

3.3.2 - Pigmentos

Pigmentos são definidos como compostos, geralmente calcinados, formados por óxidos metálicos coloridos e que, quando misturados com esmalte ou uma massa, formam uma cerâmica colorida. Sua estabilidade depende de sua estrutura cristalina, ou seja, de sua composição mineral (GALVÃO *et al.*, 2018; PEREIRA e BERNARDIN, 2012).

Diversos fatores devem ser levados em consideração ao se escolher um pigmento para uma aplicação específica. Entre eles, a estabilidade química se destaca. Os pigmentos usados para colorir a pasta cerâmica devem ser estáveis a temperaturas superiores a 1.200° C (GALVÃO *et al.*, 2018; PEREIRA e BERNARDIN, 2012).

A importância de pigmentos de óxidos de ferro também é fundamentada em sua não toxicidade, durabilidade, variedade de cores e particularmente em seu baixo custo em mercados emergentes, além da presença de metais pesados usados na produção de pigmentos (PRIM *et al.*, 2011). O uso de rejeitos de mineração de ferro como pigmento

pode permitir uma redução do custo de produção de cerâmicas coloridas, caso seja comercializado com um baixo valor comercial.

De acordo com Pereira *et al.* (2012), rejeitos de minério de ferro podem ser usados como pigmentos cerâmicos desde que o material seja termicamente estável entre 500 e 1.100°C, ou seja, que não apresente reação que interfira no processo de queima. Além disso, de acordo com os autores, a adição desses rejeitos em cerâmicas vítreas transparentes não causa mudança significativa de cor. Entretanto, em cerâmicas brancas ou foscas, notam-se mudanças maiores na cor e na forma do esmalte na medida em que a temperatura é elevada. Outra observação interessante é que a adição dos rejeitos causou mudanças nas temperaturas de transição, reduzindo as temperaturas de amolecimento e de fundição das cerâmicas foscas e aumentando essas temperaturas para as cerâmicas brancas.

Outras importantes aplicações para rejeitos são apresentadas a seguir.

3.3.3 - Síntese de silicatos porosos

Uma aplicação muito interessante para os rejeitos de minério de ferro arenosos é na síntese de materiais porosos.

Geralmente, rejeitos de minério de ferro com alto percentual de sílica são aqueles mais usados para esse objetivo. Muitos rejeitos têm a sílica com a mesma unidade estrutural básica, com tetraedros de oxigênio e de sílica conectados a outros átomos, como zinco e magnésio (BAI *et al.*, 2020; DONG *et al.*, 2020). A viabilidade para a preparação de silicatos porosos é ainda maior para rejeitos com elevados teores de sílica, acima de 70% (DONG *et al.*, 2020). Além disso, como os tetraedros de sílica são altamente sensíveis à presença de hidróxidos alcalinos, conseqüentemente, os rejeitos também o são. Nesse sentido, é possível explorar os rejeitos de minério de ferro como uma fonte secundária para a construção de materiais porosos com alto valor agregado (BAI *et al.*, 2020).

A sílica recuperada e purificada desses rejeitos é usada para a preparação de sílica micro porosa e mesoporosa e zeólitas, um material interessante para usos relacionados a armazenamento de energia e a proteção ambiental (DONG *et al.*, 2020; LU *et al.*, 2020; IZIDORO *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2020). ZHANG *et al.* (2020) obtiveram estruturas do tipo ZSM-5 de rejeitos de minério de ferro, com microporos bem definidos e estruturas

mesoporosas, com uma elevada área superficial e elevada resistência a ácidos. A área superficial (BET) desses materiais sintetizados varia entre 303 a 344 m²·g⁻¹. O volume mesoporoso e a média de poros da HM-ZSM-5 foram de 0,039 cm³·g⁻¹ e 0,78nm, respectivamente. A acidez total das amostras estudadas por NH₃-TPD indicou que o material tem dois tipos de sítios ácidos: fraco (entre 195 e 191 °C) e forte (entre 394 e 362 °C).

3.3.4 - Síntese de óxido de ferro magnético

Outro tipo de estruturas muito interessantes obtidas de rejeitos de minério de ferro são nanopartículas de óxidos de ferro (como magnetita, Fe₃O₄). As rotas convencionais para a síntese da magnetita incluem moagem em moinho de bolas, decomposição térmica, precipitação química e métodos sonoquímicos nos quais produtos químicos de elevada pureza são usados como fonte de ferro. O uso desses reagentes pode limitar a aplicação dessas partículas nanomagnéticas em muitas áreas potenciais, incluindo tratamento e purificação de água. O uso de rejeitos sólidos/líquidos ainda é desafiador, e inúmeros esforços têm sido dedicados a esse campo (WU *et al.*, 2011; GIRI *et al.*, 2011).

WU *et al.* (2011) desenvolveram um método para a preparação de magnetita a partir de rejeitos de minério de ferro, por co-precipitação química assistida por ultrassom usando ferro de elevada pureza separado de rejeitos de minério de ferro através do método de ataque ácido. As partículas de magnetita com 15 nm de diâmetro mostraram um comportamento supermagnético. Um experimento semelhante foi feito por GIRI *et al.* (2011). As nanopartículas magnéticas obtidas evidenciaram comportamento supermagnético e boa dispersibilidade em sistema aquoso médio, com alta estabilidade. Os micrográficos usando as técnicas SEM e TEM mostraram que as partículas sintetizadas possuem formatos esféricos e cúbicos com tamanho variando entre 8.3 e 23.0 nm.

3.4 - Rejeitos de minério de ferro como catalisadores

3.4.1 - Reações fenton e foto-fenton

Uma aplicação promissora para os rejeitos de minério de ferro é seu uso como catalisador, por exemplo, para o tratamento de efluentes. Isso acontece porque óxidos de ferro são catalisadores eficientes para reações Fenton e foto-Fenton (FALCONI *et al.*, 2020; AUGUSTO *et al.*, 2018; DE FREITAS *et al.*, 2019; DOS SANTOS *et al.*, 2019).

O processo de oxidação avançado, especialmente o processo Fenton e seus derivados, é digno de nota, já que em alguns rejeitos de minério de ferro elevados teores de ferro ele se mostra presente, especialmente na forma mineralógica de goetita e de hematita, o que faz desses rejeitos potenciais insumos. Esse processo representa um conjunto de tecnologias baseadas na geração *in situ* de radicais de hidroxilas (OH), hidroperóxidos (OOH) e espécies de oxigênio ativo (O_2), que são capazes de degradar vários compostos orgânicos (DE FREITAS *et al.*, 2019; DOS SANTOS *et al.*, 2019).

A eficiência desse processo é maior quando o ferro se encontra no estado de oxidação 2+ (Fe^{2+}). Entretanto, o estado de oxidação mais comum em rejeitos de minério de ferro é o 3+ (Fe^{3+}). Sua presença não inibe o uso desses rejeitos com catalisadores, mas modifica o grau de degradação da molécula orgânica (DE FREITAS *et al.*, 2019; DOS SANTOS *et al.*, 2019).

DE FREITAS *et al.* (2019) utilizaram rejeitos de minério de ferro contendo sílica (46,8%), ferro (32,0%) e alumina (3,89%) como elementos principais em dois tipos de reações Fenton para a oxidação de uma molécula azul de metileno; observou-se que os rejeitos calcinaram à temperatura de 550° C no ar, por duas horas, e apresentaram uma atividade catalítica interessante (removeram aproximadamente 75% do corante). Os autores também mostraram que a atividade pode ser melhorada se houver a ativação da superfície catalisadora, promovendo a redução dos tipos de ferro Fe^{3+} para Fe^{2+} .

O uso de rejeitos de minério de ferro naturais ou modificados em uma atmosfera redutora de CH_4 a uma temperatura de 600° C ou impregnados com resíduos de pó de garrafas PET recicladas e tratadas em uma atmosfera inerte de N_2 a temperatura de 600° C, foram usados como catalisadores heterogêneos de uma reação Fenton. Esses rejeitos eram compostos por hematita, goetita e sílica. O catalisador CH_4 modificado mostrou uma redução das fases de ferro (principalmente FeO). Já o material preparado junto com os resíduos PET, por outro lado, consiste de ilhas de carbono dispersas sobre uma matriz de óxido de ferro. Uma redução parcial do ferro (de Fe^{3+} para Fe^{2+}) ocorreu durante a decomposição térmica do material de PET, formando magnetita. Os autores mostraram que a atividade catalítica dos rejeitos é elevada quando sofre tratamento em uma atmosfera redutora com CH_4 em virtude da formação de espécies de ferro reduzidas (Fe^{2+}). Os compostos feitos com materiais PET eram muito ativos para a remoção de contaminantes da água através de mecanismos combinados de adsorção e de oxidação

(AUGUSTO *et al.*, 2018). Nesse trabalho, há potencial desses catalisadores na oxidação da molécula de paracetamol e corante de metileno azul (MB) e corante rodamina B(RhB).

Rejeitos de minério de ferro também foram usados efetivamente para a degradação da molécula de corante azo, Laranja Ácido 7 (ZHENG *et al.*, 2016). Nesse trabalho, foi observado que a degradação do corante pode ser relacionada ao percentual de óxido de ferro e ao óxido cúprico, por exemplo. Os autores concluem que a coexistência de elementos metálicos, particularmente cobre, pode acelerar a reação heterogênea do tipo Fenton.

Outra aplicação interessante para os rejeitos de minério de ferro é no tratamento de efluentes aquosos gerados no processo de beneficiamento do minério. Os compostos de ferro presentes nos rejeitos podem agir como catalisadores nas reações do tipo Fenton e foto-Fenton na degradação e remoção de surfactantes usados nesses processos (FALCONI *et al.*, 2020).

3.4.2 - Reações de oxidação de CO

Rejeitos de minério de ferro foram utilizados na preparação de hidróxidos de óxido de ferro e foram usados como suporte para nanopartículas com ouro para reações de oxidação de CO. O rejeito usado possuía um baixo teor de ferro, de 40%; de sílica, 42%; e de alumina, aproximadamente 1%. Para a preparação do hidróxido, o rejeito passou por uma digestão ácida para a completa lixiviação da hematita. Essa porção ferrosa foi empregada para preparar o suporte de óxido-hidróxido de ferro. Os autores concluem que a atividade catalítica do composto é maior quando usada sem pré-tratamento, tornando-se inativo quando pré-tratado a 300° C (SAKTHIVEL *et al.*, 2009).

3.4.3 - Produção de Biodiesel

Em adição a reações de oxidação, os rejeitos de minério de ferro também foram usados como suportes para grupos de sulfatos ácidos e foram utilizados como catalisadores em reações de esterificação de ácido oleico para a produção de biodiesel (PRATES *et al.*, 2020). Os autores usaram $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ e H_2SO_4 como uma fonte de grupos de sulfatos. As principais fases minerais desse rejeito eram hematita e quartzo. Os autores observaram que a metodologia mais eficiente para a geração de óxidos de sulfato, nesse caso, envolve o uso de ácido sulfúrico a uma concentração específica ($0.1211 \text{ nmol.g}^{-1}$).

Nesse caso, o número de grupos ácidos que são necessários para a reação acontecer foi maior. Conversões próximas a 100% de ácidos oleicos para metiloleatos foram obtidos.

3.4.4 - Catálise para síntese de compostos de nitretos de carbono

Outra aplicação possível para os rejeitos de minério de ferro é na síntese de nanotubos de carbono (SILVA *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2019; GUERREIRO *et al.*, 2020). Nessa síntese, o ferro presente nos rejeitos irá atuar como um catalisador para a síntese através de um processo chamado Deposição Química por Vapor (*Chemical Vapor Deposition* - CVD). Nesse processo, moléculas como acetonitrilos, etileno, metano, dióxido de carbono e etanol são empregados como uma fonte de carbono, e a catálise irá agir na decomposição dessa fonte e na estruturação dos nanotubos de carbono (SILVA *et al.*, 2020).

SILVA *et al.* (2020) usaram rejeitos de minério de ferro para a síntese de nanotubos de carbono. A análise dos rejeitos mostrou a presença de 44% de ferro. Quatro novos materiais foram obtidos, que apresentaram estrutura e morfologia comparáveis a outros nanotubos descritos na literatura. A formação de nanotubos de carbono com múltiplas camadas foi observada para todos os materiais sintetizados.

O potencial de rejeitos de minério de ferro ricos em hematita e goethita foi testado para o desenvolvimento de compostos baseados em nitretados de carbono grafíticos. Compostos, com características promissoras, como grande área superficial e comportamento magnético em virtude da formação de maghmita foram usados como catalisadores/adsorventes para os contaminantes acetaminophen, comumente conhecidos como paracetamol. O rejeito usado nesse trabalho possuía partículas de 7.4 micrometros, assim sendo considerado um pó ultrafino e com elevado teor de óxidos de ferro, aproximadamente 75% em relação a sua massa (BICALHO *et al.*, 2020).

3.5 - Rejeitos de minério de ferro com um adsorvente

3.5.1 - Purificação de biogás e adsorção de H₂S

Em tecnologias envolvendo adsorção, rejeitos de minério de ferro foram usados, por exemplo, na purificação do biogás, para adsorver H₂S. Essa aplicação é interessante dos pontos de vista científicos e tecnológicos, já que óxidos de ferro obtidos de drenagem ácida de minas são potenciais adsorventes para dessulfurização, em virtude de seu baixo

custo e da sua performance de adsorção. Os autores concluíram que uma análise das características físicas, químicas e morfológicas dos rejeitos e do adsorvente obtido a partir desse material é crucial para a interpretação dos dados experimentais (CRISTIANO *et al.*, 2020).

3.5.2 - Adsorção de metais pesados

Mais uma aplicação interessante para os rejeitos de minério de ferro está relacionada ao processo envolvendo a adsorção de metais pesados como arsênio e chumbo. O problema envolvendo a adsorção de arsênio é que os compostos de ferro presentes nos rejeitos apresentam elevada capacidade de adsorção em baixo pH. Um caminho interessante para a ativação de superfícies de óxidos de ferro para melhorar sua capacidade de adsorção é sua ativação com NaOH na fase líquida. Esse método ativa compostos de óxidos e hidróxidos de ferro e gera novos grupos de hidróxidos com reatividade funcional em sua superfície, o que provê um aumento no processo de troca de íons (IAKOVLEVA *et al.*, 2016). YUAN *et al.* (2017) também concluíram que a remoção de chumbo (Pb^{2+}) é fortemente influenciada pelo pH neutro. Entretanto, para a remoção desse metal, um pH perto de 6 poderia ser mais indicado para a adsorção.

3.5.3 - Adsorção de fosfatos

Fosfato é um nutriente importante para as plantas, aplicado na produção de fertilizantes. Dessa forma, sua recuperação é importante, já que a demanda por rochas fosfatadas está aumentando e alguns estudos preveem a exaustão dessas rochas para os próximos 50-100 anos. Óxido de ferro, derivado de rejeitos de minério de ferro, pode facilmente e eficientemente adsorver esse ânion. Alguns trabalhos (MORAIS, 2018; SIMA *et al.*, 2018) evidenciam que a fase férrica presente no material e os percentuais de grupos de hidroxilas são fatores importantes e que devem ser levados em consideração no processo de adsorção. A hematita não é um bom adsorvente de fosfato, provavelmente porque não possui grupos de hidroxilas, importantes para o processo de adsorção. Entretanto, quando os rejeitos são tratados com ácido hidrocloreídrico, os óxidos de ferro são solubilizados. Com reprecipitação, os grupos de hidroxilas se tornam disponíveis, o que leva à melhoria da adsorção.

Um trabalho envolvendo rejeitos de minério de ferro foi conduzido por SUH *et al.* (2015). Os pesquisadores produziram um nano-adsorvente capaz de remover fósforo

e nitrogênio de água de esgoto. O trabalho mostrou que o material obtido da adsorção pode ser usado como um fertilizante de liberação controlada, já que o fósforo e o nitrogênio adsorvidos podem ser liberados lentamente no solo. Esse tipo de material poderia ser um fertilizante com boa relação custo-benefício.

3.5.4 - Catodos de baterias

Um trabalho envolvendo rejeitos de minério de ferro e a síntese de catodos para baterias foi conduzido por WANG *et al.* (2020). Nesse estudo, FePO_4 , usado como um precursor para LiFePO_4/C foi preparado ao se lixiviar os rejeitos com ácido sulfúrico concentrado, ácido fosfórico e peróxido de hidrogênio. Os efeitos dos compostos obtidos em diferentes condições de pH e em sua estrutura final foram avaliados de acordo com sua performance eletroquímica e morfológica.

Alguns estudos mencionam o uso de rejeitos de minério de ferro como um catalisador anódico para a geração de energia em células de carga microbianas. O uso dos rejeitos pode gerar catalisadores baratos e eficientes para aplicações na bioeletroquímica. Para essa aplicação, rejeitos com maior percentual de compostos ferrosos produzem reações catalíticas importantes nas células, já que a presença desses compostos pode elevar a transferência de elétrons através da rota redox (JADHAV *et al.*, 2015).

Nanopartículas formadas por hematita com cascas de carbono foram produzidas usando-se rejeitos de minério de ferro. O material obtido pode ser empregado na produção de baterias de lítio (STEVIC' *et al.*, 2016). Essa tecnologia é interessante porque o ferro obtido a partir dos rejeitos faz o processo ser mais econômico já que soluções ferrosas são obtidas pelo processo simples de digestão dos rejeitos.

3.6 - Madeira plástica

A madeira plástica, em inglês *wood plastic composite* (WPC), é um composto formado por partículas finas inicialmente de rejeitos gerados durante o processo de beneficiamento da madeira, em forma de pó, com a adição de polímeros, e alguns aditivos, por exemplo corante. Atualmente, esse modelo foi ampliado, e, em alguns casos, pode-se eliminar o uso do rejeito de madeira, sendo empregadas outras cargas, entre elas os rejeitos arenosos de minério de ferro. DE SOUZA (2013) estudou compósitos obtidos a partir de polipropileno, polietileno de alta e de baixa densidade e rejeito arenoso proveniente da flotação de itabirito da região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais.

Esse material pode ser classificado como não perigoso e inerte (classe IIB), com pH igual a 8,13, o que o classifica como não corrosivo e não reativo. Foram desenvolvidos os produtos mourões para cerca e paletes para armazenagem e transporte de materiais, que comportaram até 25% de seu peso em massa de rejeito arenoso, com propriedades físicas adequadas e boa resistência à radiação solar, e que poderiam ser expostas a ambientes externos por mais de 80 anos sem perdas de propriedades.

3.6.1 - Painéis cimento-madeira

Os painéis cimento-madeira são caracterizados por ser uma mistura de cimento Portland, água, aditivos químicos e partículas de madeira; têm origem na Europa, no final dos anos de 1970, sendo bem aceitos no mercado por apresentar propriedades como baixo peso e por permitir um ganho de tempo na velocidade de sua instalação. NARCISO(2018) investigou painéis cimento-madeira com resíduos de minério de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, que apresentavam teores de óxido de ferro de 13,63% e óxido de silício de 79,60%. Sua utilização não promoveu alterações das propriedades de ligação interna, dureza e condutividade térmica; as propriedades de flexão apresentaram redução significativa com a substituição do cimento Portland pelos rejeitos de minério de ferro, possivelmente pela movimentação dimensional das partículas e a interação partícula-matriz; apesar disso, os compostos avaliados atenderam aos parâmetros estabelecidos pelas normas vigentes. A autora conclui pela viabilidade de emprego de até 40% dos resíduos de minério de ferro na produção de painéis cimento-madeira.

3.7 - Obtenção de sílica de alta pureza

O quartzo é um dos minerais mais puros da natureza, dada a sua estrutura cristalina. No caso da extração do óxido de ferro do itabirito por meio da flotação, o rejeito arenoso gerado é constituído por partículas de quartzo muito finas. MARTINS (2016) obteve sílica com pureza de 98% de SiO_2 usando rejeitos arenosos de minério de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais por meio de deslamagem e separação magnética. Ao adicionar fusão alcalina com NaOH, lixiviação do produto da fusão com H_2O , precipitação do silício mediante acidificação do licor com HCl e lixiviação do precipitado de SiO_2 com o mesmo ácido, obteve-se um produto final com 99,9% de SiO_2 , que pode ser utilizado na indústria de vidros, tintas, cerâmicas, na indústria eletrônica,

como semicondutor, transistores, chips, em dispositivos fotoelétricos e em outros componentes.

3.8 - Pavimentação

A área de pavimentação é interessante para o aproveitamento de rejeitos de minério de ferro porque requer o uso de grandes quantidades de materiais, consumindo, portanto, grandes volumes. APAZA *et al.* (2018) estudaram o uso desses resíduos da região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais como agregados alternativos em misturas de microrrevestimento asfáltico a frio (MRAF); os ensaios de perda por abrasão os resíduos forneceram resistência abrasiva ao desgaste em condições saturadas e atendeu ao limite especificado em norma. Quanto à influência do resíduo no excesso de asfalto pela adesão de areia, todos os resultados obtidos atenderam ao parâmetro requerido. Os autores recomendam um valor limite de 20% em relação à sua massa de rejeitos a serem adicionados à mistura.

Sant’Ana Filho (2013) estudou rejeitos de minério de ferro também da região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, concluindo pela viabilidade técnica do aproveitamento do material em subleitos de pavimentação, como sub-base ou como camada complementar à base.

3.9 - Melhorias no processo de beneficiamento do minério de ferro – reprocessamento

A busca de melhorias no processo de beneficiamento do minério de ferro é feita de forma contínua tanto pelas empresas mineradoras quanto pelas empresas fornecedoras de equipamentos e de serviços. Trabalhos acadêmicos também se dedicam a este objetivo: GOMES (2017) estudou rejeitos de minério de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais e concluiu que o processo de concentração de minério de ferro pode ser aperfeiçoado por separação magnética, atendendo às especificações do produto fino para pelotização, o que poderia significar um aproveitamento de 50% do rejeito estocado, com uma recuperação de 80% do ferro, o que geraria receitas e reduziria os danos ambientais da disposição de rejeitos.

3.10 - Análise de patentes relacionadas aos rejeitos de minério de ferro

Existem diversos pedidos de patentes relacionadas ao aproveitamento de rejeitos de minério de ferro. Com o objetivo de identificar essas patentes, foi realizado um mapeamento através de busca por palavras-chave em websites. As patentes aqui relacionadas foram identificadas nos websites do Instituto Nacional de Propriedade Industrial do Brasil (INPI), *Worldwide-Spacenet*, *United States Patent and Trading Office* (USTPO), *Canadian Intellectual Property Office* (CIPO) e *Australia Patent Office* (APO). Para a pesquisa, foram usadas as seguintes palavras-chave: rejeitos de minério de ferro, rejeitos de mineração, rejeitos ferrosos, lama ferrosa.

A pesquisa identificou 95 pedidos de patentes, que foram agrupadas de acordo com as aplicações para os rejeitos e com os agentes depositantes. O Gráfico 4 apresenta as aplicações identificadas.

Para o agrupamento, foi criado um grupo chamado aplicações tecnológicas, que reúne aplicações como uso como catalisadores, nanofibras, aglomerantes, polímeros, produção de carvão de silício, silicato de sódio e obtenção de cloreto férrico.

O Gráfico 5 mostra que a maioria dos pedidos de patentes relacionadas aos rejeitos de minério de ferro estão ligadas ao reprocessamento do material, com o objetivo de recuperar o óxido de ferro ainda presente nos rejeitos. Essa aplicação responde por 61% das patentes encontradas neste trabalho.

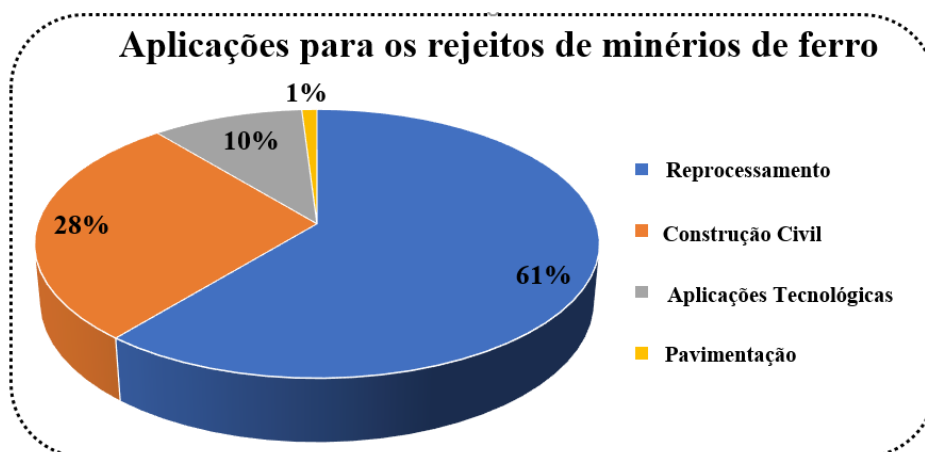


GRÁFICO 5. Aplicações identificadas relacionadas a rejeitos de minério de ferro
(Fonte: websites do INPI, Worldwide Spacenet, USTPO, CIPO, APO).

As demais aplicações relacionadas aos rejeitos estão relacionadas à construção civil, para uso como agregados artificiais, areia, argamassa, tijolos e blocos, respondendo por 28% das patentes encontradas.

As aplicações tecnológicas respondem por 10% dos depósitos de patentes encontrados, e 1% está relacionado à pavimentação de estradas.

É interessante observar que as empresas não mineradoras são as principais agentes depositantes de patentes relacionadas ao aproveitamento de rejeitos de minério de ferro, acompanhadas, na sequência, por inventores, empresas mineradoras, universidades, universidades e empresas, universidades e centros de pesquisa, e pelo governo. O Gráfico 6 apresenta a distribuição em percentuais dos agentes depositantes de patentes relacionadas aos rejeitos.

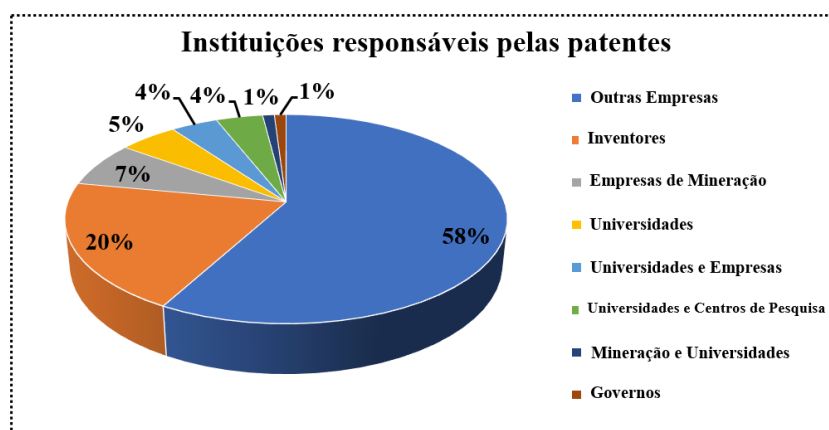


GRÁFICO 6. Instituições responsáveis por depósitos de patentes relacionadas ao uso de rejeitos de minério de ferro (Fonte: websites do INPI, Worldwide Spacenet, USTPO, CIPO, APO).

3.11 - Fatores limitantes para o uso de rejeitos de minério de ferro

Embora os rejeitos de minério de ferro representem uma séria preocupação em virtude de seu custo de armazenagem e vários outros problemas, poucas iniciativas vêm sendo efetivamente implementadas para se obter produtos partindo-se desses materiais. Por outro lado, existe na literatura e no banco de patentes um grande número de possibilidades para o uso dos rejeitos. Nesse contexto, é de grande importância compreender quais são os gargalos para o uso em escala dessas tecnologias. Uma análise preliminar é apresentada, para se entender os principais fatores que inibem o uso industrial e comercial dos rejeitos de minério de ferro. Essas barreiras podem ser classificadas como tecnológicas ou barreiras de mercado e são apresentadas no Quadro

8. As barreiras tecnológicas começam no desenvolvimento de pesquisas para o aproveitamento dos rejeitos de minério de ferro. Apesar de haver um grande número de artigos publicados, a maioria desses trabalhos ainda estão em uma fase preliminar em escala de laboratório, sem considerar sua viabilidade econômica.

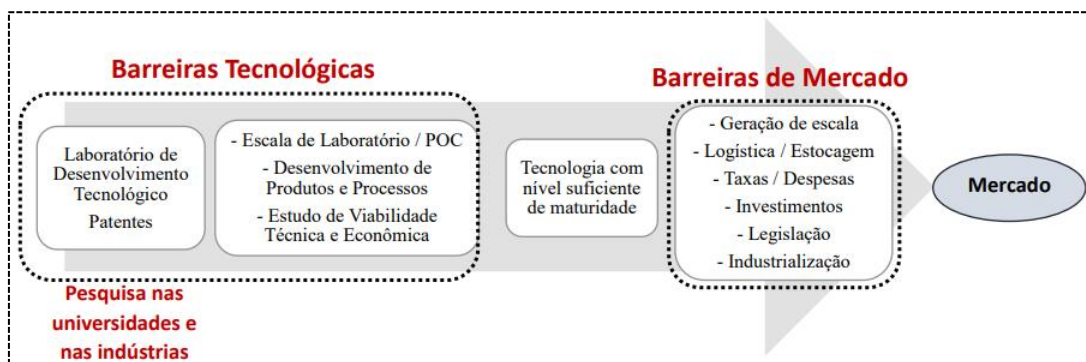


FIGURA 7. Diagrama de barreiras tecnológicas e de mercado para tecnologias para o aproveitamento de rejeitos de minério de ferro (Elaborado a partir de GAMA, 2019).

Após essa pesquisa básica, um trabalho detalhado se faz necessário para avaliar se a tecnologia proposta aborda as seguintes questões: o produto desenvolvido foi testado em um cliente externo e teve boa performance? Esse produto tem um mercado bem definido e diferenciais competitivos se comparados aos produtos a serem substituídos? Podem ser produzidos industrialmente? Existe alguma preocupação relacionada a logística ou questões de licenciamento ambientais? A maioria dessas perguntas pode ser respondida através do escalonamento da tecnologia, por exemplo ao se construir uma planta-piloto para produzir entre centenas e milhões de quilos, de modo a validar o produto com clientes reais (POC, prova ou conceito). Da planta-piloto, além do desenvolvimento do produto, também é desenvolvido o processo industrial e obtidas todas as variáveis importantes para se determinar a viabilidade técnica e econômica do processo.

Após responder a maioria dessas perguntas, a tecnologia atinge um nível de maturidade que permite sua ida ao mercado. Nesse ponto, começam as barreiras de mercado, algumas delas serão discutidas a seguir.

A escala de geração dos rejeitos de minério de ferro é possivelmente a principal preocupação. Nenhuma aplicação seria suficiente para dar destinação ao grande volume de rejeitos gerados anualmente pelas empresas mineradoras. Dessa forma, é mandatório que seja desenvolvido um grande número de aplicações. Outro aspecto é que, em países

mineradores, outras cadeias produtivas, como a da construção civil, já estão estruturadas e possuem empresas fornecedoras de insumos. A introdução de rejeitos de minério de ferro em larga escala poderia causar um colapso na cadeia de suprimentos existente, gerando outros problemas econômicos e impactos sociais, que devem ser levados em consideração por sua grande relevância.

Problemas de logística são uma limitação expressiva. A distância entre os rejeitos de minério de ferro e os mercados consumidores também deve ser levada em consideração, já que uma das características da atividade extrativa mineral é sua rigidez locacional, geralmente distante de centros de produção tradicionais. Nesse sentido, é de grande relevância um sistema para transporte dos rejeitos desde as minas onde são gerados até o mercado consumidor. Em virtude dos grandes volumes de rejeitos gerados, o transporte desse material irá impactar as estradas e rodovias, causando repercussões ambientais como a emissão de gases poluentes e a geração de barulho e poeiras. Além disso, o custo do transporte terá um impacto importante, podendo, inclusive, ser maior que o valor comercial dos rejeitos.

Uma vez transportados, os rejeitos devem ser manuseados e estocados pela cadeia produtora que os usará com matéria-prima; para isso, serão necessários espaço físico, equipamentos e mão de obra. Na medida em que as cadeias produtivas já estão arranjadas, o mercado consumidor desejará receber somente a quantidade necessária para seu emprego direto, dentro de suas especificações técnicas. Isso significa que os rejeitos de minério de ferro deverão ser tratados dentro das minas, e somente a seguir deverão ser enviados para os mercados consumidores. E como os empreendimentos minerários não foram projetados para tratar rejeitos, não há espaço para que isso aconteça.

Os mercados consumidores possuem regulações técnicas, ou normas que determinem os padrões das características necessárias para os insumos que serão usados nas cadeias produtivas. Dessa forma, será necessário criar normas que regulem o uso dos rejeitos de minério de ferro, para que possam seguir especificações técnicas universais.

Ademais, as taxas e os impostos que serão aplicados aos rejeitos de minério de ferro terão grande impacto na sua precificação, para uso como matéria-prima de segunda geração. Caso haja algum tipo de incentivos fiscal que torne vantajoso o uso dos rejeitos, estes podem tomar mercados atualmente servidos por empresas produtoras de insumos

naturais, de primeira geração, como pedreiras e empresas produtoras de areia, o que poderia caracterizar competição desleal.

3.12 – Resumo do Capítulo

A atividade extrativa mineral de minério de ferro possui extrema importância na economia em diversos países. Por outro lado, o vultoso volume de rejeitos gerados durante o processo é um grande problema para as empresas mineradoras, governos e para a população estabelecida ao redor das minas, em virtude do risco de acidentes. Apesar de ter ocorrência mundial, considerando todos os países mineradores, há geração de rejeitos durante o processo de beneficiamento de minério de ferro; por questões mineralógicas, no estado de Minas Gerais há uma geração maior de rejeitos. O desenvolvimento de processos que convertam os rejeitos da mineração de ferro em produtos com valor agregado é de grande relevância. Os rejeitos de minério de ferro são materiais gerados na etapa de beneficiamento, compostos por partículas de sílica (quartzo), argila (alumina) e óxido de ferro (hematita, goetita, magnetita). Possuem dimensões físicas medidas em micrometros, com áreas superficiais baixas, podendo ser classificados em resíduos finos e resíduos grossos, com teor de água-umidade média de 20%. São termicamente estáveis e classificados como não perigosos, inertes, não corrosivos e não reativos, usando a Norma brasileira NBR 10004. A literatura científica e o banco de patentes depositadas indicam que muitas aplicações potenciais foram desenvolvidas, por exemplo aquelas relacionadas à construção civil (agregados para concreto, argamassa, aditivos para cimento Portland), indústria cerâmica, materiais ativados por álcalis e geopolímeros, síntese de novos materiais como zeólitas, sílica mesoporosa, nanotubos de carbono, adsorção, catálise, baterias e madeira plástica. Por outro lado, essas aplicações enfrentam barreiras tecnológicas e de mercado, que limitam suas aplicações em uma escala industrial e comercial, como o grande volume de rejeitos, questões relacionadas a logística, manuseio e armazenagem, questões relacionadas a regulação dos parâmetros de suas especificações técnicas, conhecimento tecnológico e a implementação de políticas públicas que incentivem o seu uso como matérias-primas de segunda geração. Entretanto, sua inserção no mercado deve ser feita de forma que não cause um desarranjo nas cadeias produtivas atuais, com a dos produtores de britas e de areia, por exemplo, que já estão estruturadas e que atendem às demandas existentes atualmente.

4. INOVAÇÃO EM REDES COLABORATIVAS: O CASO DA PLATAFORMA R3 CRIADA PARA PROMOVER O DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA A DESTINAÇÃO DE REJEITOS

4.1 – Introdução

A cadeia produtiva da mineração é um dos setores produtivos estratégicos do estado de Minas Gerais e junto à atividade metalúrgica formam parte importante da base do seu parque industrial. Em 2019, 60% da produção nacional de minério de ferro foi realizada em Minas Gerais, totalizando 311 milhões de toneladas (ANM, 2020).

Em relação à compensação financeira pela exploração mineral, a contraprestação paga à União pelo aproveitamento dos recursos minerais, em 2017, gerou uma arrecadação de cerca de R\$ 1.4 bilhões, que corresponde a 43,2% de toda a arrecadação desse tributo no Brasil. Dos quinze municípios nacionais que mais arrecadam essa compensação, 11 são de Minas Gerais (FIEMG, 2019).

O Quadrilátero Ferrífero é uma área de aproximadamente 7.000 km², localizada na porção centro-sul do estado de Minas Gerais (QFMG), possuidora de grande riqueza mineral, destacando-se minério de ferro, manganês, ouro, esteatito, topázio e esmeraldas. O QFMG integra total ou parcialmente 35 municípios, com população estimada em 4.135.951 habitantes (NUNES *et al.*, 2012). Nessa região estão concentradas algumas das principais companhias mineradoras do Brasil.

Na atividade de mineração de ferro, grandes volumes e massas de materiais são extraídos e movimentados, produzindo dois tipos de resíduos sólidos: os estéreis e os rejeitos. Os estéreis são os materiais escavados, gerados pelas atividades de extração no decapeamento da mina, que não possuem valor econômico e geralmente ficam dispostos em pilhas. Já os rejeitos são resultantes dos processos de beneficiamento e concentração do minério e ficam, no Brasil, armazenados em barragens. Durante o período de 2010 a 2030, projeta-se um volume de 11 bilhões de toneladas de rejeitos gerados pela atividade de mineração, sendo o minério de ferro responsável por quase 5 bilhões de toneladas (IPEA, 2012). Em dez anos, a geração de rejeitos aumentou 1,4 vezes, passando de 202 milhões de toneladas em 1996 para 290 milhões de toneladas em 2005, com previsão de dobrar este volume até 2030. O minério de ferro representa 35% desse montante, e estima-

se que, até 2030, varie em patamares de 37 a 45% (DOS SANTOS e VIEIRA, 2012). Outro fator que concorre para esse aumento é o empobrecimento das minas, isto é, os teores de ferro das jazidas têm se tornado cada vez mais baixos (DA GAMA, 2019).

Tal cenário mostra que a geração de rejeitos terá um crescimento constante, já os minérios de ferro continuarão a ser extraídos para satisfazer as demandas de um mercado em crescimento.

Como consequência do crescimento na produção de rejeitos, em 05 de novembro de 2015, houve o rompimento da barragem de Fundão, pertencente ao complexo minerário de Germano, no município de Mariana, Minas Gerais. Esse fato trouxe consequências ambientais e sociais graves e onerosas, em escala regional (IBAMA, 2015). Chamada de Tragédia de Mariana, é considerada por alguns autores como o maior desastre ambiental da história do Brasil (LOPES, 2016). Podem ser citados como impactos econômicos diretos a redução de atividades econômicas de mineração, comércio, prestação de serviços, agricultura, pecuária, pesca e turismo nas regiões afetadas, que causaram o aumento do desemprego e a redução da base tributária (SIMONATO, 2017).

No dia 25 de janeiro de 2019, houve o rompimento de barragem na Mina Córrego do Feijão, na cidade de Brumadinho, Minas Gerais. Apesar de o impacto ambiental tender a ser menor se comparado ao acidente de Mariana, seu impacto social e econômico será superior, pela maior perda de vidas humanas e pelos impactos causados por mudanças regulatórias para o setor de mineração, com a adoção de tecnologias de processamento a seco, que não dependam de barragem de rejeitos (BV, 2019).

No dia 25 de fevereiro de 2019, um mês após o rompimento da barragem em Brumadinho, foi sancionada a Lei Estadual nº. 23.291/2019, que instituiu uma nova política de segurança de barragens em Minas Gerais. Entre as várias modificações na legislação anterior, essa lei determina a proibição da concessão de licenças para barragens que utilizem o método de alteamento a montante e estabelece um prazo de três anos para descaracterização das barragens alteadas por esse método com a mudança para tecnologias alternativas de disposição de rejeitos e resíduos. Seguindo tal linha, a Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais aponta, como um dos objetivos para a chamada “Nova Mineração”, o reaproveitamento dos rejeitos dispostos em barragens como matéria-prima para a fabricação de novos produtos (FIEMG, 2019). Existe uma

previsão impactante de que muitos municípios de MG e do Brasil fortemente dependentes da mineração terão suas economias afetadas quando as mineradoras encerrarem suas atividades (CARVALHO *et al.*, 2012). Uma alternativa importante deve ser o “segundo ciclo da mineração” em que o rejeito deixado pelas mineradoras será utilizado como matéria-prima para a geração de emprego, renda e desenvolvimento local.

Nesse contexto, a busca por inovações para a utilização de rejeitos da mineração assume um papel de grande relevância no estado de Minas Gerais. Por outro lado, essa utilização para destinações técnicas e economicamente viáveis é uma atividade altamente complexa que demanda a participação de diferentes atores do ecossistema. Incluem-se, por exemplo, as mineradoras apoiando todas as iniciativas, universidades e centros de pesquisa desenvolvendo novas tecnologias, governos das diferentes esferas trabalhando questões legais, fiscais, órgãos de representação com questões de normatização e empresas de diferentes cadeias produtivas nas quais os produtos feitos de rejeito vão se inserir. Assim, o trabalho em redes colaborativas com esses diferentes atores é fundamental.

A Plataforma R3 Mineral nasceu por iniciativa da FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais) por ocasião do rompimento da barragem de Fundão em Mariana com o objetivo de gerar aplicações para os grandes volumes de rejeitos da mineração em Minas Gerais (R3 MINERAL, 2016).

Trata-se da primeira plataforma colaborativa formada com o objetivo de discutir o aproveitamento dos rejeitos da atividade de mineração no país, integrada por empresas mineradoras, associações de empresas e de profissionais liberais, organizações governamentais, universidades e centros de pesquisa, empresas de consultoria e possíveis consumidores para os rejeitos.

O objetivo desse trabalho é apresentar e descrever a Plataforma R3 Mineral, compará-la com outras plataformas colaborativas do setor extrativista mineral no mundo e levantar aspectos críticos para seu funcionamento de acordo com a literatura sobre inovação em rede e entrevistas com participantes-chave.

4.2 - Redes e o Processo de Inovação Tecnológica

No processo de inovação tecnológica, não basta simplesmente desenvolver novas tecnologias, sendo fundamental identificar as necessidades do mercado, da sociedade e

todos os atores relevantes para implementar efetivamente a inovação, com sucesso econômico, social e ambiental (KIRSCHBAUM, 2005).

A partir de vocações locais, ocorre a aproximação entre as organizações produtivas com atividades de pesquisa e desenvolvimento. Redes de trabalho e de conexões internas e externas às organizações são formadas, fomentando o surgimento, aperfeiçoamento e a difusão de ganhos de produtividade e de competitividade. Políticas de governos orientam e direcionam o sistema de inovação (FREEMAN, 1995). A cooperação deve acontecer em diferentes etapas do processo de inovação, quando os agentes estabelecem uma relação de aprendizado mútuo que será fundamental para viabilizar a inovação (LUNDVALL, 2016).

Uma rede organizada é uma associação de membros que alinha a colaboração multilateral entre um número finito de organizações independentes, com um resultado econômico compartilhado (GLUCKER, 2013).

O DNA das redes de inovação colaborativa é formado pela criatividade, colaboração e a comunicação. A inovação acontece através da criatividade colaborativa; a colaboração é feita seguindo um código de ética, e a comunicação é realizada através de contatos diretos entre todos os participantes da rede (GLOOR, 2006). A colaboração também envolve interações entre atores internos e externos, para identificar problemas e desenvolver ou aperfeiçoar soluções, e devido à distribuição do processo de co-inovação, a boa comunicação entre os atores torna-se um aspecto fundamental, inerente a todos os processos e atividades de inovação (ABHARI *et al.*, 2017). Outro aspecto fundamental para um bom funcionamento de uma rede de inovação é o modelo de governança que leva à geração e ao uso de conhecimento tecnológico (ANTONELLI & QUÉRÉ, 2002).

Plataformas colaborativas são formadas para permitir a interação entre empresas e entidades externas. Permitem também a criação de uma rede de contatos e podem facilitar a realização de transações entre produtores e consumidores (ALTMAN & TUSHMAN, 2017). Uma forma de pesquisa colaborativa é a pesquisa pré-competitiva. Essa pesquisa é baseada em consórcios, que não tem como objetivo a geração de produtos, mas sim a solução de problemas comuns ou o desenvolvimento de plataformas tecnológicas para a geração de produtos e de serviços futuros (UPSTILL e HALL, 2006).

4.3 - Inovação no Setor da Mineração

Os processos de inovação no setor de mineração apresentam várias peculiaridades devido a aspectos de monopólio, à estruturação da cadeia produtiva e tradição de um setor centenário. Esse setor trabalha, em geral, com uma visão de médio prazo, pouca disposição ao risco e caráter conservador em vários aspectos quanto à inovação (PAMPLONA e PENHA, 2020).

A indústria extrativa mineral pode ser considerada um sistema complexo, por ser constituída por vários agentes que participam das várias etapas das atividades de exploração mineral. Existe uma diversidade de agentes, constituídos por empresas de mineração, fornecedores de equipamentos e de serviços como empresas de projetos e de execução destes, entre esses agentes, também existe uma grande pluralidade. Por exemplo, empresas mineradoras possuem diferentes tipos de minérios, com características geológicas específicas, e localizações geográficas diferentes (FUJIONO, 2017).

O principal foco da inovação no setor mineral é a busca de ganhos em seus processos atuais através do aumento da produtividade e da redução de custos. Grande parte dos gestores das empresas de mineração demonstram aversão a riscos, e muitas operações são baseadas no planejamento e nas práticas de gestão já há muito estabelecidos. Tal situação cria um ambiente focado em ações corretivas de curto prazo, em vez de permitir um contexto inovador e criativo nas empresas de mineração (DE TOMI *et al.*, 2010). Dessa forma, melhorias no processo de produção e de manutenção de equipamentos têm sido priorizadas pelas empresas mineradoras, considerando que, em setores de produção intensiva, o papel desempenhado pela manutenção no aumento da eficiência e confiabilidade dos ativos é fundamental para o sucesso competitivo (PIMENTA, 2011).

Trabalho recente sugere que empresas mineradoras adotam duas estratégias para a inovação: a primeira através de desenvolvimentos internos e a segunda através de sua cadeia de fornecedores, com incentivos à inovação e com acordos de suporte e compartilhamento de riscos (STEEN *et al.*, 2018).

Enquanto no passado as empresas de mineração tendiam a desenvolver soluções tecnológicas internamente, nas últimas décadas do século XX essa tendência mudou. As empresas mineradoras mudaram seu foco para sua atividade-fim, passando a contar com

sua cadeia de fornecedores para o desenvolvimento de soluções tecnológicas, evitando, assim, os riscos associados aos investimentos envolvidos no processo de inovação. Ao mesmo tempo, em muitos casos, os fornecedores das mineradoras podem ser empresas subcontratadas, cuidando de atividades de apoio como aberturas de estradas ou até mesmo atuando em processos produtivos como britagem e moagem de minerais. Isso inclui o desenvolvimento de técnicas, métodos e tecnologias para realizar essas tarefas e, portanto, libertar as empresas mineradoras das preocupações tecnológicas. Essa tendência de terceirização tem promovido a criação de iniciativas de colaboração entre grandes mineradoras e fornecedores locais para o desenvolvimento de soluções tecnológicas (SÁNCHEZ e HARTLIEB, 2020). Assim, o grupo de fornecedores de equipamentos e serviços estrangeiros desempenha um papel decisivo, como o agente identificador de demandas das empresas mineradoras e desenvolvedor de soluções, tendo sido responsáveis por mais de 90% das patentes depositadas no Brasil nos últimos quinze anos (WIPO, 2019).

As políticas públicas de inovação para a mineração no Brasil são percebidas como efêmeras, reativas e pouco estruturadas. A baixa aceitação social do setor extrativista mineral e a falta de continuidade das políticas públicas de inovação no longo prazo constituem desafios importantes a serem superados (PAMPLONA e PENHA, 2020).

4.4 - A Plataforma R3 Mineral

A Plataforma R3 Mineral surgiu em 2016 como uma iniciativa da FAPEMIG, motivada pelo rompimento da barragem de fundão em Mariana, com a ideia inicial de ser um fórum de articulação entre diversas organizações científicas, tecnológicas e industriais, para discutir e atuar na gestão de resíduos e rejeitos da mineração em Minas Gerais e na geração de aplicações em larga escala. Sua missão é promover negócios por meio da integração do setor mineral na cadeia de valor de outros segmentos, pelo engajamento do Governo na formatação de novas políticas públicas, pela indução de linhas de pesquisa nas instituições de ciência e tecnologia, tendo como objetivo o fortalecimento da economia regional nas áreas de influência da mineração, além da redução dos impactos ambientais (R3 MINERAL, 2016).

A Plataforma R3 é constituída de 29 instituições, sendo empresas mineradoras, empresas produtoras de materiais de pavimentação e empresas prestadoras de serviços, além de instituições de pesquisa, associações de empresas e órgãos públicos, que

decidiram voluntariamente participar dessa rede, por adesão. A Figura 7 mostra a composição da Plataforma R3.



FIGURA 8. Composição da Plataforma R3 Mineral

As 29 instituições participantes da Plataforma R3 Mineral são listadas no Quadro 9.

QUADRO 8: Instituições participantes da Plataforma R3 Mineral

PLATAFORMA R3 MINERAL	
Empresas Mineradoras	ANGLOGOLD ASHANTI FERRO + GERDAU VOTORANTIM METAIS VALE SAMARCO VALLOUREC NEW STEEL PEDRAS CONGONHAS
Empresas Potencialmente Consumidoras de Rejeitos e de Consultoria	VIA 040 UNI STEIN LADRIMINAS Departamento de Estradas e Rodagem (DER-MG) BRANDT MEIO AMBIENTE SOLOCAP
Associações de Empresas	Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Minas Gerais (CREA-MG)

	Sindicato Nacional das Empresas de Arquitetura e Engenharia Consultiva (SINAENCO) Sistema Nacional de Aprendizagem Industrial – Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (SENAI-FIEMG) Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado de Minas Gerais (SIDUSCON)
Universidades e Centros de Pesquisa	Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN) Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) Instituto Tecnológico Vale (ITV)
Agências Governamentais	Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) Agência de Promoção de Investimento e Comércio Exterior de Minas Gerais (INDI)

De acordo com entrevistas realizadas após a criação da Plataforma R3, algumas das expectativas dos participantes eram: (i) conectar atores da cadeia da mineração e ser um fórum de discussão para o aproveitamento de rejeitos da mineração de minério de ferro; (ii) gerar articulação e colaboração entre os atores participantes da plataforma; (iii) gerar projetos em escala piloto para o aproveitamento dos rejeitos; (iv) gerar aplicações em larga escala para os rejeitos; e (v) desenvolver ações de normatização e de criação de legislação para o aproveitamento dos rejeitos.

A Plataforma não possui espaço físico próprio, e os encontros entre os membros são realizados nas dependências das instituições participantes. Do ponto de vista financeiro, a Plataforma não possui um sistema de arrecadação formal e periódico para sua manutenção. As instituições membro são responsáveis pelos custos relacionados à participação de seus colaboradores nos Grupos Focais e pela manutenção das atividades desenvolvidas.

Durante suas atividades, a Plataforma R3 possui um coordenador técnico-científico, que conduz os trabalhos, agendando e organizando os encontros (R3 MINERAL, 2016).

A Plataforma iniciou seus trabalhos operando através de Grupos Focais que têm a função de validar hipóteses, por exemplo a produção de madeira plástica e a produção de blocos e ladrilhos usados na construção civil usando rejeitos como matérias-primas. O Quadro 10 apresenta os Grupos Focais, seu foco, alguns projetos e as instituições participantes.

QUADRO 9: Grupos da Plataforma R3 Mineral

	FOCO	PROJETOS	PARTICIPANTES
Governança	- Criar o estatuto da rede	- Identificar outras redes semelhantes	- FAPEMIG - CDTN
Construção civil	- Buscar aplicações em escala	- Ladrilhos, geopolímeros.	- UNI STEIM, LADRIMINAS, CEFET, SINAENCO, SINDUSCON VALLOREC
Reprocessamento	- Melhorar o processo produtivo reduzindo a geração de rejeitos	- Melhoria de recuperação de minério concentrado	- SAMARCO, UFMG, UFOP, NEW STEEL.
Produtos tecnológicos	- Buscar aplicações com valor agregado	- Catalisadores, madeira plástica.	- UFMG, UFOP, CDTN, PEDRAS CONGONHAS, VALE.
Agricultura	- Aproveitamento dos rejeitos na agricultura	- Remediação de áreas degradadas pela mineração	- EMBRAPA, SAMARCO.
Pavimentação	- Uso dos rejeitos em estradas	- Adequação granulométrica dos rejeitos para uso em base e sub-base	- VALE, PEDRAS CONGONHAS, GERDAU.

(Elaborado a partir de R3 MINERAL, 2016).

4.5 - Redes colaborativas no setor extrativista mineral mundial

4.5.1 – AMIRA

A *Australian Mineral Industries Research Association* (AMIRA) é uma organização formada para o desenvolvimento de pesquisas e novas tecnologias

específicas para a mineração. Tem como principal objetivo o aumento da competitividade global do setor de mineração australiano. Possui cerca de 75 instituições participantes, divididas entre empresas membros, instituições públicas de fomento e centros de pesquisa, e foi fundada em 1959. As empresas membros são agrupadas em categorias, sendo a primeira de empresas mineradoras, empresas fornecedoras de equipamentos e serviços para as empresas mineradoras, e empresas juniores de pesquisa e exploração mineral (AMIRA, 2018).

A Figura 8 apresenta a composição da rede colaborativa AMIRA.



FIGURA 9: Composição da Plataforma AMIRA (Adaptada de AMIRA, 2018).

Alguns membros da AMIRA são: Abiti Geophysics, Agincourt Resources, Anglo-American, Anglogold Ashanti, Australian Gold Reagents PTY LTD, Barrick, BASF, BGRIMM, BHP, Boatr Longear, Boliden, Canary Systems, CGG, CMOC, Clean Tech, Codelco, Consilium Technology, De Nora, First Quantum Minerals LTD, FLSmidth, FMG Fortescue, Freeport-Mcmoran, Gekko, Glencore, GoldFields, IAMGOLD, IGO, Institute of Mine Seismology, Interlate, Ivanhoe Mines, JX Nippon Mining & Metals, Kemix, KPMG, Lhoist, Loupe, Maggoteaux, Merdeka Copper Gold, MMG, New Solution Geophysics, Newcrest Mining Limited, Newmont, Nexa, Northern Star, Oceana

Gold, Orica, Outotec, OZ Minerals, Perseus Mining Limited, PGN Geoscience, Reunion Gold, Rio Tinto, Roy Hill, Russel Mineral Equipment, Saracen, Sensore, Sentient, SGS, Solvay, South 32, St Barbara, Tata Steel, Teck, Teranga Gold Corporation, Umicore, Vale, Weir Minerals, 3VGeomatics (Fonte: <https://amira.global.au/become-a-member/>).

Já foram executados cerca de 700 projetos com quase 600 milhões de dólares gastos pelas próprias empresas participantes, sem incluir aporte de recursos públicos.

A AMIRA possui três formas de desenvolver projetos para seus membros:

- Formação de consórcios para a resolução de problemas específicos dos membros através do engajamento de profissionais ou organizações específicas;
- Identificação de tecnologias e soluções já existentes para as empresas membros da Plataforma;
- Identificação e engajamento de pesquisadores que sejam referências nas áreas com maior contingência de problemas identificados pelas empresas, considerando que a plataforma pode mediar o gerenciamento dos projetos com parceiros externos à rede.

4.5.2 - CEMI

No Canadá está situado o CEMI, *Centre of Excellence in Mining Innovation*. É uma organização sem fins lucrativos, com o objetivo de desenvolver alternativas inovadoras para o mercado da mineração, proporcionando um aumento na segurança, produtividade e performance ambiental da atividade mineradora canadense (CEMI, 2018).

Criada em 2007, a rede visa desenvolver inovações para:

- melhorar a relação custo-benefício da mineração;
- aumentar a taxa de descobrimento de minérios e minas;
- potencializar os impactos positivos e sustentáveis da atividade mineradora.

A plataforma tem grande foco na viabilização das tecnologias desenvolvidas. A inovação tecnológica é garantida através da aplicação de quatro elementos em todo o processo da CEMI:

- Pesquisa e desenvolvimento, com grande envolvimento de profissionais da academia para a identificação de novas ideias;

- Provas de conceito e testes da tecnologia em problemas reais;
- Implementação e viabilidade operacional da tecnologia;
- Estratégias de comercialização das soluções desenvolvidas.

Assim como a AMIRA, a CEMI é constituída pelos principais atores da cadeia produtiva da mineração. Entre eles estão empresas mineradoras, empresas fornecedoras de equipamentos e de serviços para a cadeia extrativa mineral, agências e departamentos governamentais, instituições de pesquisa e universidades, cerca de 37, nas quais a CEMI foi responsável por investir cerca de 10 milhões de dólares, em projetos para o avanço da tecnologia na mineração, além de associações de indústrias. A governança da CEMI possui pessoas de diferentes instituições, desde empresas de mineração até pesquisadores de universidades e centros de pesquisa, órgãos públicos (Ministério de Minas) e especialistas em mineração. A Figura 9 apresenta a distribuição das instituições membros da CEMI.



FIGURA 10: Composição da Plataforma CEMI (Fonte: CEMI, 2018).

De acordo com o site da Plataforma alguns membros da CEMI são associações industriais, como *Mining Association of Canada*, *Ontario Mining Association*, *Chamber*

of Commerce; e universidades e centros de pesquisa, como *Acadia University, Cambrian College, Carleton University, Collège Boréal, Curtin University, Dalhousie University, Dalian University of Technology, Delft University of Technology, Institute of Mining Seismology, The University of Arizona, Université de Montréal, University of Toronto e University of Waterloo*. O Quadro 11 abaixo apresenta uma comparação entre as três plataformas colaborativas existentes para a atividade extrativista mineral, a AMIRA, a CEMI e a Plataforma R3 Mineral, a partir de informações obtidas nos websites.

QUADRO 10: Comparação entre as plataformas colaborativas identificadas

	AMIRA	CEMI	Plataforma R3
Fundação	1959	2007	2016
Membros	Há cerca de 75, entre empresas da cadeia produtiva da mineração, instituições governamentais, de P&D e de fomento.	Há mais de 100, entre empresas da cadeia produtiva da mineração, instituições governamentais, de P&D e de fomento.	Há 29, entre empresas mineradoras, possíveis consumidoras de rejeitos, instituições governamentais, de P&D e de fomento.
Governança	Sistema bem definido	Sistema bem definido	Sem forma clara de governança
Espaço físico	Possui.	Possui.	Não possui.
Foco	Inovações tecnológicas	Inovações tecnológicas	Aproveitamento em escala de rejeitos
Fomento	Fontes internas e externas	Fontes internas e externas	Não definido
Modo de operação	É variado, tratando de demandas individuais ou coletivas, buscando soluções internas e externas à rede.	É variado, tratando de demandas individuais ou coletivas, buscando soluções internas e externas à rede.	Ocorre através de grupos de trabalho compostos por membros da rede.

4.6 – Discussão

A Plataforma R3 Mineral foi a primeira rede formada no Brasil para a discussão sobre a destinação de rejeitos da mineração de ferro, isto é, desenvolver e implementar processos que utilizem rejeito da mineração de ferro como matéria-prima. Essa Plataforma tem servido como um fórum de conexão entre os atores das diferentes esferas, como universidades, governos e setor privado, para a discussão desse complexo tema de aproveitamento de rejeitos.

Algumas das ações da Plataforma R3 consideradas relevantes pelos participantes-chave são:

- Desenvolver novas tecnologias desde a escala laboratório até a escala industrial para o aproveitamento de rejeitos, envolvendo universidades e centros de pesquisa em conjunto com as indústrias;
- Formar nesse processo RH de alto nível, especialistas na área de utilização de rejeito;
- Conectar essas iniciativas com mercado para sua efetiva utilização, criação de novas empresas, geração de emprego, renda e desenvolvimento local;
- Envolver fortemente o Estado, em suas esferas municipais, estaduais e da união federativa, para a criação de normatizações ambientais, técnicas e tributárias, de forma a se criar uma política pública que permita e estimule a utilização de rejeitos.

Alguns aspectos considerados críticos para o sucesso da rede por alguns de seus participantes, e que seriam os principais desafios para a Plataforma R3 Mineral, são:

- Formalizar a Plataforma com a criação de um estatuto e um modelo de governança, que deixe todas as regras claras e dê segurança jurídica para todos os participantes, permitindo que a Plataforma R3 mantenha suas atividades e atinja os resultados desejados;
- Garantir a sustentabilidade financeira da Plataforma;
- Garantir a existência de um sistema eficiente de comunicação interna e externa;
- Trazer empresas fornecedoras de equipamentos e serviços para as empresas mineradoras que são os principais agentes de inovação relacionados à atividade de mineração;

- Aumentar o número de organizações participantes, assim como a interação com atores de outras cadeias produtivas, como futuros consumidores desses materiais, o que constitui, ações relevantes para o sucesso da Plataforma.

Ressaltam-se, especialmente, atores como a Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração que possui longa tradição em unir empresas e pesquisadores buscando o desenvolvimento de inovações e melhorias de processos, além de promover eventos, cursos e publicações técnicas (ABM, 2020). O IBRAM possui mais de 130 associados, entre empresas mineradoras, fornecedoras e organizações diversas, que representam 85% da produção mineral no Brasil. Entre seus objetivos está o de conectar o setor mineral, incentivar a inovação, difundir conhecimentos, fomentar e disseminar boas práticas (IBRAM, 2020). A união dessas duas associações traria uma boa contribuição para a Plataforma R3.

Localizadas em países com forte tradição mineral, as plataformas AMIRA e CEMI, respectivamente na Austrália e, no Canadá, podem servir como modelo para o aperfeiçoamento da Plataforma R3 Mineral.

Políticas de estado que incentivem a colaboração através da participação de redes colaborativas podem despertar o interesse de outras organizações para participar da Plataforma, como instituições de fomento de crédito privado e empresas fornecedoras de equipamentos e serviços da cadeia extrativa mineral.

O desenvolvimento de inovações na AMIRA tem se mostrado uma necessidade de melhoria de recursos na gestão da inovação a fim de aprimorar os processos existentes, explorar o potencial das novas tecnologias para aumentar sua eficiência ao longo de toda a cadeia de valor da mineração bem como, desenvolver ligações entre as empresas e interpessoais, para aproveitar o conhecimento externo em benefício das inovações (UPSTILL e HALL, 2006). Ou seja, a participação em plataformas pode estimular o desenvolvimento de inovações sociais e gerenciais, que podem trazer vantagens não apenas para as plataformas colaborativas, mas também para as empresas e instituições participantes.

4.7 - Conclusão

A Plataforma R3 Mineral possui grande relevância, por ser a primeira rede criada para o desenvolvimento de aplicações industriais para os rejeitos gerados pela indústria

extrativa de minério de ferro. Apesar de ter sido criada por iniciativa do estado de Minas Gerais, a rede foi bem recebida pelo setor extrativista mineral de minério de ferro, que participou da plataforma através de algumas das principais empresas mineradoras instaladas naquele estado. A participação de empresas fornecedoras de equipamentos e de serviços é de grande importância para que a Plataforma R3 atinja seus objetivos, em virtude de seu papel chave no desenvolvimento de inovações para o setor mineral. A adoção de um modelo de governança consistente, aliado a um sistema de fomento financeiro para seus projetos, mostra-se imprescindível para que a rede obtenha bons resultados. O desenvolvimento de um plano de objetivos e de metas também pode ser de grande valia para que os projetos desenvolvidos pela rede sejam efetivamente concluídos. Por fim, a comunicação é uma necessidade e um fator relevante em todos os níveis da Plataforma R3. Uma forma de aproximar a Plataforma R3 do sistema regional de inovação em outras cadeias seria sua instalação física no BHTEC.

O aperfeiçoamento da R3, usando como referência as plataformas internacionais AMIRA e CEMI, é factível, e a adoção de políticas públicas que incentivem a participação de organizações em redes colaborativas poderá fazer com que a plataforma atinja os resultados desejados. Um exemplo de política pública que incentive a participação de organizações na plataforma R3 Mineral é a criação de linhas de crédito exclusivas para participantes da rede, com condições financeiras diferenciadas.

A bibliografia confirma a importância do processo de inovação em redes colaborativas e reitera o interesse das empresas mineradoras em utilizar essa forma de desenvolver inovações.

5. CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

A atividade de mineração possui raízes históricas, tendo sido fundamental para a formação do estado de Minas Gerais; desde o ciclo do ouro, passando pelo ciclo dos diamantes até o de minério de ferro. Deve-se registrar, ainda, a presença de diversos bens minerais, que compreendem, entre outros, agregados para a construção civil – britas, areia e argila; minérios empregados no agronegócio – calcário, fosfato, serpentinito; gemas e pedras preciosas – topázio, esmeralda; bem como, suas respectivas cadeias de empresas consumidoras e fornecedoras.

Falando especificamente da mineração de minério de ferro, ressalta-se que Minas Gerais é um dos estados de maior produção, com a presença de empresas mineradoras com atuação global e com alto desenvolvimento tecnológico, voltado para o seu produto final, que é o minério de ferro em suas diferentes formas. Por questões mineralógicas, o minério de ferro lavrado nesse estado necessita de uma etapa de concentração durante seu beneficiamento, que gera rejeitos, produtos que não possuem valor econômico e que são depositados em barragens e em pilhas. Recentemente ocorreram acidentes nessas barragens, com amplo dano social e ambiental, que levaram a alterações na legislação proibindo o uso de barragens pelos métodos até então usados. Além disso, ganhou força a discussão sobre o aproveitamento dos rejeitos de minério de ferro como matérias-primas de segunda geração, em outras cadeias produtivas.

Conforme informações apresentadas no Capítulo 2, observa-se um conjunto de conhecimentos locais que se desenvolveu em um sistema regional de inovação, com características de infra e mesmo de superestrutura. Merecem destaque a identificação dos principais atores no desenvolvimento de aplicações para a atividade extrativa mineral, que são os fornecedores de equipamentos e de serviços. Como demonstrado, existe na mineração uma concentração de empresas mineradoras, em que somente uma empresa representa três quartos da produção nacional de minério de ferro e, também, ainda que em escala menor, há uma concentração de fornecedores, que atuam em escala global.

O aproveitamento dos rejeitos de minério de ferro possui maior relevância local, mas não necessariamente em outros países; dessa forma, os fornecedores globais ainda não têm como principal alvo tecnológico os rejeitos, que têm sido objeto de estudo pelas universidades e centros de pesquisa. O mapeamento de patentes apresentado e discutido no Capítulo 3 mostra que as empresas mineradoras adquirem tecnologias de seus fornecedores, através de licenciamentos de tecnologias; portanto, o sistema de inovação

atual falha em completar o ciclo das tecnologias desenvolvidas para o aproveitamento dos rejeitos de minério de ferro. Em um movimento até então inédito, foi criada uma rede colaborativa no estado, chamada Plataforma R3 Mineral, apresentada e discutida no Capítulo 4. Este ente que congrega diferentes atores no sistema de inovação pode ter um importante papel para a geração e implementação de inovações para a destinação de rejeitos da mineração de ferro.

Os rejeitos de minério de ferro possuem características que permitem seu aproveitamento como matéria-prima para uso em outras cadeias produtivas, como as da construção civil e pavimentação. Cita-se o uso desses materiais na pavimentação de estradas, frente à conhecida deficiência do sistema viário local, com estradas de ligação a outros estados defasadas e incapazes de oferecer escoamento da produção dos diversos produtos regionais em condições atrativas em relação ao custo logístico; igualmente, tem-se um sistema ferroviário limitado, de acesso restrito e com custos expressivos. Nesse sentido, usar os rejeitos de minério de ferro na duplicação de estradas e ferrovias pode ser uma alternativa interessante. Outro exemplo é o uso dos rejeitos de minério de ferro na produção de madeira plástica, tecnologia estudada com bom grau de detalhamento, o que permitiria a obtenção de produtos como mourões para cercas, dormentes para ferrovias, paletes para embalagens e mesmo engradados para armazenamento de bebidas. São produtos com certo valor agregado, com vida útil elevada e com demanda de mercado local. Além de aproveitar os rejeitos, essa aplicação permitiria um aproveitamento mais nobre das madeiras, mostrando-se ambientalmente adequadas.

Existem, portanto, conhecimento e tecnologias disponíveis e desenvolvidas por universidade e centros de pesquisa. No entanto, com uma cultura de aproveitamento dos rejeitos de mineração ainda em um estágio inicial, o conhecimento desenvolvido em Minas Gerais foi concentrado no processo produtivo extrativista mineral, conforme discutido no mapeamento de patentes e nas nuvens de palavras apresentados no Capítulo 2. Como consequência, não se deu atenção aos rejeitos gerados pela mineração de minério de ferro, tidos como materiais estéreis, sem aproveitamento econômico, sendo, portanto, descartados.

Algumas propostas surgem após a discussão apresentada neste trabalho, as quais são apresentadas a seguir.

Inicialmente, o envolvimento dos fornecedores de equipamentos e de serviços das empresas mineradoras se mostra relevante no que diz respeito ao aperfeiçoamento e à implementação das tecnologias até então estudadas para o aproveitamento dos rejeitos de

minério de ferro. E como o estado de Minas Gerais não conseguiu atrair os principais fornecedores mundiais para nele se instalar fisicamente, uma alternativa seria uma ação dirigida para que esse grupo participe de um parque tecnológico que tenha como objetivo a atividade extrativista mineral.

A participação de todos os atores do sistema de inovação regional em um parque tecnológico e em iniciativas como a Plataforma R3 Mineral deve ser estimulada por políticas públicas, como a criação de incentivos fiscais e de linhas de fomento específicas para o aproveitamento dos rejeitos de minério de ferro. Apesar de ser talvez sua grande vocação natural, a mineração não é objetivo de nenhum parque tecnológico efetivamente instalado e operante em Minas Gerais. Uma iniciativa interessante seria fazer com que os parques tecnológicos atuais percebam a mineração como um grupo estratégico e vital para o desenvolvimento de tecnologias. E redes colaborativas como a Plataforma R3 devem ser estimuladas como ferramentas de interação do sistema regional de inovação; sua instalação dentro de um parque tecnológico seria, por conseguinte, um caminho natural.

Para estudos futuros, recomenda-se investigar como a inovação tecnológica acontece em um sistema caracterizado por uma concentração de mercado relevante como na atividade extrativa mineral e quais caminhos podem ser seguidos para que haja uma evolução desse sistema de inovação.

Uma boa linha de pesquisa seria a relevância das inovações ambientais e sociais em detrimento das inovações econômicas, em um ambiente de mercado extremamente competitivo e voltado para a redução de custos e ganhos de produtividade, como foi discutido sobre o aproveitamento dos rejeitos de minério de ferro.

Fundamentalmente, é necessária a evolução de políticas públicas, desenvolvidas em conjunto com o sistema produtivo, para que o estado identifique oportunidades ou nichos de mercado e que direcione o sistema de inovação regional para esses objetivos, de forma planejada, orientada e responsável, com o cuidado de preservar as cadeias produtivas existentes — atraindo-as para o uso de rejeitos de minério de ferro como matérias-primas e abandonando a percepção de que tais rejeitos constituem uma ameaça a seu negócio.

Referências Bibliográficas

ABHARI, K.; DAVIDSON, E. J.; XIAO, B. – **Co-innovation platform attendances: Developing a conceptual model and measurement instrument** - *Industrial Management & Data Systems*, vol. 117, n. 5, p. 873–895, **2017**.

ABM – **Associação Brasileira de Metalurgia, Minerais e Mineração - 2020** - Disponível em: <https://www.abmbrasil.com.br/>. Acesso em: 01/12/2020.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - **N. 9781, Peças de Concreto para Pavimentação – Especificação e Métodos de Ensaio**. Rio de Janeiro. **2013**.

ALMEIDA, J.; RIBEIRO, A. B. B.; SILVA, A. S.; FARIA, P. - **Overview of mining residues incorporation in construction materials and barriers for full-scale application** - *Journal of Building Engineering*, v. 29, n. October 2019, p. 101215, maio **2020**.

ALTMAN, E. J.; TUSHMAN, M. L. - **Platforms, Open/User Innovation, and Ecosystems: A Strategic Leadership Perspective**. Working Paper17-076, *Advances in Strategic Management*, v.37. April **2017**.

ALVES, W.; FERREIRA, P.; ARAÚJO, M. - - **Challenges and pathways for Brazilian mining sustainability** - *Resour. Policy* **2020**, 101648.

AMIRA – **Australian Mineral Industry Research Association - 2018** - Disponível em: <https://amira.global/become-a-member/>. Acesso em: 30/11/2020.

ANGLO-AMERICAN – **2020** - Disponível em: <https://brasil.angloamerican.com/pt-pt>. Acesso em 19/04/2020.

ANM - Agência Nacional de Mineração - **Anuário Mineral Brasileiro – Principais substâncias metálicas, 2018** – Brasília, **2019**.

ANM - Agência Nacional de Mineração - **Anuário Mineral Brasileiro – Principais substâncias metálicas, 2019** – Brasília, **2020**.

ANTONELLI, C.; QUÉRÉ, M. **The Governance of Interactive Learning within Innovation Systems**. *Urban Studies*, v. 39, n. 5–6, p.1051–1063, **2002**.

APAZA, F. R.; GUIMARÃES, A. C. R.; SILVA SOUZA, M. A.; CASTRO, C. D. - **Estudo sobre a utilização de resíduo de minério de ferro em microrrevestimento asfáltico** - *Revista Transportes*, v. 26, n. 6, p.118–138, **2018**.

APERAN - **Acesita 60 anos - 2015** - Disponível em: https://brasil.aperam.com/wp-content/uploads/2015/11/relatorio_anual_2004.pdf. Acesso em: 19 abril 2020.

ARAÚJO, A. C.; AMARANTE, S. C.; SOUZA, C. C.; SILVA, R. R. R. - **Ore mineralogy and its relevance for selection of concentration methods in processing of Brazilian iron ores** - *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, v. 112, n. 1, p. 54–64, 18 abr. **2003**.

ASHEIM, B.; SMITH, H. L. - **Regional Innovation Systems: theory, empirics and policy**. *Regional Studies*, v. 45.7, p. 875–891, July 2011.

AUGUSTO, T. D. M.; CHAGAS, P.; SANGIORGE, D. L.; MAC LEOD, T. C. D. O.; OLIVEIRA, L. C. A.; CASTRO, C. S. - **Iron ore tailings as catalysts for oxidation of the drug paracetamol and dyes by heterogeneous Fenton** - *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 6, n. 5, p. 6545–6553, 2018.

BAI, S.; TIAN, G.; GONG, L.; TANG, Q.; MENG, J.; DUAN, X.; LIANG, J. - **Mesoporous manganese silicate composite adsorbents synthesized from high-silicon iron ore tailing** - *Chemical Engineering Research and Design*, v. 159, p. 543–554, 2020.

BANERJEE, R.; GOSWAMI, P.; MUKHERJEE, A. - **Stabilization of Iron Ores Spoil Dump Sites With Vetiver System** - In *Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation* – Elsevier. 2018; p 393–413.

BHTEC, 2020 – <<https://www.bhtec.org.br>> Acesso em: 26/01/2020.

BICALHO, H. A.; RIOS, R. D. F.; BINATTI, I.; ARDISSON, J. D.; HOWARTH, A. J.; LAGO, R. M.; TEXEIRA, A. P. C. - **Efficient activation of peroxymonosulfate by composites containing iron mining waste and graphitic carbon nitride for the degradation of acetaminophen** - *Journal of Hazardous Materials*, v. 400, p. 123310, dez. 2020.

BRIZ, J. - *Minerios&Minerales* - 18 de dezembro de 2018 - **Mina Casa de Pedra está há 105 anos em operação**. Disponível em: <https://revistaminerios.com.br/mina-casa-de-pedra/>. Acesso em: 19 abr. 2020.

BV – BLOG DE VALOR - **Dossiê VALE: entenda a tragédia em Brumadinho(MG) e suas consequências** - 2019 - Disponível em: <https://andrebona.com.br/dossie-vale-entenda-a-tragedia-em-brumadinho-mg-e-suas-consequencias/>. Acesso em: 22/04/2019.

CARRASCO, E. V. M.; MAGALHÃES, M. D. C.; SANTOS, W. J. D.; ALVES, R. C.; MANTILLA, J. N. R. - **Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests** - *Construction and Building Materials*, v. 131, p. 31–38, 2017.

CARVALHO, C. G.; DA SILVA, J. M.; CURI, A.; FLORES, J. C. C. - **A dependência da arrecadação do Município de Ouro Preto do setor mineral** - *Revista da Escola de Minas – REM* - v. 65, n. 3, Ouro Preto, 2012.

CARVALHO, J. M. – **A Escola de Minas de Ouro Preto: o peso da glória**. Centro Edstein de Pesquisas Sociais, Rio de Janeiro, 2010.

CHEN, Y.; ZHANG, Y.; CHEN, T.; ZHAO, Y.; BAO, S. - **Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailings** - *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 4, p. 2107–2111, 2011.

CHEN, Y.; ZHANG, Y.; CHEN, T.; LIU, T.; HUANG, J. - **Preparation and characterization of red porcelain tiles with hematite tailings** - *Construction and Building Materials*, v. 38, p. 1083–1088, 2013.

CHENG, Y.; HUANG, F.; LI, W.; LIU, R.; LI, G.; WEI, J. - *Test research on the effects of mechanochemically activated iron tailings on the compressive strength of concrete - Construction and Building Materials*, v. 118, p. 164–170, **2016**.

CHENG, Y.; HUANG, F.; QI, S.; LI, W.; LIU, R.; LI, G. - **Durability of concrete incorporated with siliceous iron tailings - Construction and Building Materials**, v. 242, p. 118147, **2020**.

CEMI – **Centre for Excellence in Mining Innovation - 2018** - Disponível em: <https://www.cemi.ca/>. Acesso em: 20/12/2018.

CHAMINADE, C. LUNDEVALL, B. HANEEF, S. – **Advanced Introduction to National Innovation Systems** – Elgar Advanced Introductions, Edward Elgar, Londres, **2018**.

COOKE, P. - **Regional Innovation Systems, Clusters and the Knowledge Economy** - Industrial and Corporate Change, v. 10, n. 4, p. 44–45, **2001**.

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. - **The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses** - John Wiley & Sons, Ed.; 2nd ed.; **2006**.

COSTA, A. RODRIGUES, D.S.S. – **Cartilha Cadeias Produtivas do Estado de Minas Gerais** – Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Minas Gerais – CREA-MG, **2017**.

CRISTIANO, D. M.; de A. MOHEDANO, R.; NADALETI, W. C.; DE CASTILHOS JUNIOR, A. B.; LOURENÇO, V. A.; GONÇALVES, D. F. H.; FILHO, P. B. - **H2S adsorption on nanostructured iron oxide at room temperature for biogas purification: Application of renewable energy - Renewable Energy**, v. 154, p. 151–160, **2020**.

DA SILVA, F. L.; ARAUJO, F. G. S.; TEIXEIRA, M. P.; GOMES, R. C.; VON KRUGER, F. L. - **Study of the recovery and recycling of tailings from the concentration of iron ore for the production of ceramic - Ceramics International**, v. 40, n. PB, p. 16085–16089, **2014**.

D'AZEVEDO ORLANDO, M. T.; GALVÃO, E. S.; SANT'ANA CAVICHINI, A.; GABRIG TURBAY RANGEL, C. V.; PINHEIRO ORLANDO, C. G.; GRILO, C. F.; SOARES, J.; SANTOS OLIVEIRA, K. S.; SÁ, F.; JUNIOR, A. C.; BASTOS, A. C.; DA SILVA QUARESMA, V. - **Tracing iron ore tailings in the marine environment: An investigation of the Fundão dam failure - Chemosphere**, v. 257, **2020**.

DA GAMA E. M. **Os coprodutos da mineração de ferro para uma economia sustentável**. Novas Edições Acadêmicas, Primeira edição, 2019.

DAS, S. K.; KUMAR, S.; RAMACHANDRARAO, P. - **Exploitation of iron ore tailing for the development of ceramic tiles - Waste Management**, v. 20, n. 8, p. 725–729, **2000**.

DAVIDOVITS, J. - **Geopolymer Chemistry and Applications** - 5. ed. France: [s.n.] - Geopolymer Institute, France, p. 644. **2015**.

DE FREITAS, V. A. A.; BREDER, S. M.; SILVAS, F. P. C.; RADINO ROUSE, P.; DE OLIVEIRA, L. C. A. - **Use of iron ore tailing from tailing dam as catalyst in a fenton-**

like process for methylene blue oxidation in continuous flow mode - *Chemosphere*, v. 219, p. 328–334, 2019.

DE SOUZA, R. E. - **Utilização de resíduo de mineração para obtenção de madeira plástica** – Dissertação - Rede Temática em Engenharia de Materiais - REDEMAT, Belo Horizonte, fevereiro de 2013.

DE TOMI, G. PASSOS, A. O. MARÍN, T. CARANASSIOS, A. **Innovation challenges and opportunities within the Brazilian Mining Industry**. *Triple Helix* 8, 2010. Disponível em: <https://www.leydesdorff.net/th8/TRIPLE%20HELIX%20CONFERENCE%20VIII%20PROCEEDINGS/0025_De_Tomi_Giorgio_O-086/TripleHelix8_Paper_Mining_Inovation_in_Brazil.pdf> Acesso em: 19/05/2020.

DEVI, B. G. N. M.; KUMAR, P.; SOGI, A. - **An Experimental Study on Utilization of Iron Ore Tailings (IOT) and Waste Glass Powder in Concrete** - *Civil and Environmental Research*, v. 7, n. 9, p. 18–21, 2015.

DINIZ, C.C. – *Estado e capital estrangeiro na industrialização brasileira*. - UFMG-PROED, 1981.

DO CARMO E SILVA Defáveri, K.; DOS SANTOS, L. F.; FRANCO DE CARVALHO, J. M.; PEIXOTO, R. A. F.; BRIGOLINI, G. J. - **Iron ore tailing-based geopolymer containing glass wool residue: A study of mechanical and microstructural properties** - *Construction and Building Materials*, v. 220, p. 375–385, 2019.

DOS SANTOS, O.; VIEIRA, E. T. – **O impacto da extração de minério na economia e na sustentabilidade: uma análise dos rejeitos do minério de ferro** – XVI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, 2012.

DOS SANTOS, A. J.; DA COSTA CUNHA, G.; CRUZ, D. R. S.; ROMÃO, L. P. C.; MARTINEZ-HUITLE, C. A. - **Iron mining wastes collected from Mariana disaster: Reuse and application as catalyst in a heterogeneous electro-Fenton process** - *Journal of Electroanalytical Chemistry*, v. 848, p. 113330, 2019.

DOS SANTOS, U. MENDES, P. – **A localização dos atores do sistema de inovação brasileiro e seus impactos regionais na década de 2000** – *Eure*, v. 44, n. 132, p. 153–181, 2018.

DONG, G.; TIAN, G.; GONG, L.; TANG, Q.; LI, M.; MENG, J.; LIANG, J. - **Mesoporous zinc silicate composites derived from iron ore tailings for highly efficient dye removal: Structure and morphology evolution** - *Microporous and Mesoporous Materials*, v. 305, n. June, p. 110352, 2020.

DUAN, P.; YAN, C.; ZHOU, W.; REN, D. - **Development of fly ash and iron ore tailing based porous geopolymer for removal of Cu(II) from wastewater** - *Ceramics International*, v. 42, n. 12, p. 13507–13518, 2016.

DUNCAN, G. MEIRA MATTOS, J.C. PORTILHO, R. PAULINO, F.- **Mineração no Brasil: história e seus grandes vultos. Augusto Antunes, o homem que realizava**. Leo Christiano Editorial, 2006.

EDQUIST, C. – **Systems of innovation: perspectives and challenges** – In FARCEBERG, J. MOWERY, D. NELSON, R. – **The Oxford Handbook of Innovation** – Oxford, Oxford University Press, p. 181–208, **2005**.

FALCONI, I. B. A.; BALTAZAR, M. dos P. G.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. - **Degradation of surfactant used in iron mining by oxidation technique: Fenton, photo-Fenton** - *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 98, n. 5, p. 1069–1083, 3 maio **2020**.

FAPESP - Fundação de amparo a pesquisa do estado de São Paulo - **Rejeitos da Mineração - 2019** – Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/rejeitos-da-mineracao/>.

FERRAND, P. – **O ouro em Minas Gerais**. - Fundação João Pinheiro, Centro de Estudos Históricos e culturais, Belo Horizonte, 1998.

FERREIRA, H.; LEITE, M.G.P. - **A Life Cycle Assessment Study of Iron Ore Mining** – *Journal of Cleaner Production*, v. 108, p. 1081–1091. **2015**.

FIEMG – Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais - **A mineração em Minas-2019** - Disponível em: <https://www.emfrenteminas.com.br/>. Acesso em 02/05/2019.

FIGUEIREDO, M. D.; LAMEIRAS, F. S.; ARDISSON, J. D.; ARAUJO, M. H.; TEIXEIRA, A. P. de C. - **Tailings from Fundão Tragedy: Physical–Chemical Properties of the Material That Remains by Candonga Dam** - *Integrated Environmental Assessment and Management*, v. 00, n. 00, p. 1–7, **2019**.

FILHO, J. N. S. ana; DA SILVA, S. N.; SILVA, G. C.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. - **Technical and environmental feasibility of interlocking concrete pavers with iron ore tailings from tailings dams** - *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 29, n. 9, p. 1–6, **2017**.

FREDSTRÖM, A. WINCENT, J. SJÖDIN, D. OGHAZI, P. PARIDA, V. – **Tracking Innovation diffusion : AI Analysis of large-scale patent data towards an agenda for further research** – *Technological Forecasting & Social Change*, v. 165, **2021**.

FREEMAN, C. – **Technology policy and economic performance** – Londres, Pinter Publishers, 1987.

FREEMAN, C. – **The economics of hope** – Printer Publisher, Londres, **1992**.

FREEMAN, C. - **The national system of innovation in a historical perspective** - *Cambridge Journal of Economics*, v. 19, p.5–24, **1995**.

FREEMAN, C.; SOETE, L. - **A economia da inovação industrial** - Editora da Unicamp, Campinas, São Paulo, **2008**.

FREITAS, J.; CALBINO, D.; SANTOS, A.; PEREIRA, R. D. - **Em defesa do uso da pesquisa-ação na pesquisa em administração no Brasil** - *Administração: ensino e pesquisa*, v. 11, n. 3, p. 425–445, **2010**.

FONTES, W. C.; MENDES, J. C.; DA SILVA, S. N.; PEIXOTO, R. A. F. - **Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams** - *Construction and Building Materials*, v. 112, p. 988–995, **2016**.

FONTES, W. C.; FRANCO DE CARVALHO, J. M.; ANDRADE, L. C. R.; SEGADÃES, A. M.; PEIXOTO, R. A. F. - **Assessment of the use potential of iron ore tailings in the manufacture of ceramic tiles: From tailings-dams to “brown porcelain”** - *Construction and Building Materials*, v. 206, p. 111–121, maio **2019**.

GALVÃO, J. L. B.; ANDRADE, H. D.; BRIGOLINI, G. J.; PEIXOTO, R. A. F.; MENDES, J. C. - **Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints** - *Journal of Cleaner Production*, v. 200, p. 412–422, **2018**.

GAMA, E. M. - **Os coprodutos da mineração de ferro para uma economia sustentável** - Novas Edições Acadêmicas, 252 p. **2019**.

GENG, H.; WANG, F.; YAN, C.; TIAN, Z.; CHEN, H.; ZHOU, B.; YUAN, R.; YAO, J. - **Leaching behavior of metals from iron tailings under varying pH and low-molecular-weight organic acids** - *Journal of Hazardous Materials*, v. 383, n. June 2019, p. 121136, **2020**.

GIRI, S. K.; DAS, N. N.; PRADHAN, G. C. - **Magnetite powder and kaolinite derived from waste iron ore tailings for environmental applications** - *Powder Technol.* **2011a**, 214, 513.

GIRI, S. K.; DAS, N. N.; PRADHAN, G. C. - **Synthesis and characterization of magnetite nanoparticles using waste iron ore tailings for adsorptive removal of dyes from aqueous solution** - *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 389, n. 1–3, p. 43–49, **2011b**.

GLOOR, P.A. - **Swarm Creativity: Competitive Advantage Through Collaborative Innovation Networks** - Oxford University Press, **2006**.

GLUCKER, J. - **Knowledge, Networks and Space: Connectivity and the Problem of Non-Interactivity Learning**. *Regional Studies*, 47:6, 880,894, **2013**.

GOMES, F.M. – **A história da siderurgia no Brasil**. – Editora Itatiaia, São Paulo, **1983**.

GOMES, R. B.; TOMI, G. D.; ASSIS, P. S. – **Impact of quality of iron ore lumps on sustainability of mining operations in the Quadrilátero Ferrífero Area**. *Minerals Engineering*, v. 70, p. 201–206, **2015**.

GOMES, A. C. F. - **Estudo de aproveitamento de rejeito de mineração** – Dissertação - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, **2017**.

GONÇALVES, L.V. S. - **A família e o portador de transtorno mental** - UFMG, **2010**. Disponível em: <https://www.nescon.medicina.ufmg.br/bibliOTeca/imagem/2405.pdf>. Acesso em: 14/05/2019.

GOU, M.; ZHOU, L.; THEN, N. W. Y.; XU, -D.M.; ZHAN, C.-L.; LIU, H.-X.; LIN, H.-Z.; ZUCCHERATTE, A. C. V.; FREIRE, C. B.; LAMEIRAS, F. S.; QI, C.; FOURIE, A.; GAYANA, B. C.; CHANDAR, K. R.; DA SILVA, F. L.; ARAUJO, F. G. S.; TEIXEIRA, M. P.; GOMES, R. C.; VON KRUGER, F. L.; QI, C.; FOURIE, A. - **A critical review**

on environmental implications, recycling strategies, and ecological remediation for mine tailings - *Science and Engineering of Composite Materials*, v. 26, n. 1, p. 35657–35669, 28 dez. **2019a**.

GOU, M.; ZHOU, L.; THEN, N. W. Y. - **Utilization of tailings in cement and concrete: A review** - *Science and Engineering of Composite Materials*, v. 26, n. 1, p. 449–464, 28 jan. **2019b**.

GUEDES, G. e SCHNEIDER, C. – **A buscas das melhores opções tecnológicas para evitar acidentes**. – *Brasil Mineral*, n. 372, junho de **2017**.

GUERREIRO, G. G.; VIEIRA DE ANDRADE, F.; ROBERTO DE FREITAS, M. - **Carbon nanostructures based-adsorbent obtained from iron ore tailings-** *Ceramics International*, n. July, p. 0–1, **2020**.

HATJE, V.; PEDREIRA, R. M. A.; DE REZENDE, C. E.; SCHETTINI, C. A. F.; DE SOUZA, G. C.; MARIN, D. C.; HACKSPACHER, P. C. - **The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide**. *Scientific Reports*, v. 7, n. 1, p. 10706, 6 dez. 2017.

IAKOVLEVA, E.; MAYDANNIK, P.; IVANOVA, T. V.; SILLANPAA, M.; TANG, W. Z.; MAKILA, E.; SALONEN, J.; GUBAL, A.; GANEEV, A. A.; KAMWILAISAK, K.; WANG, S. - **Modified and unmodified low-cost iron-containing solid wastes as adsorbents for efficient removal of As(III) and As(V) from mine water** - *Journal of Cleaner Production*, v. 133, p. 1095–1104, **2016**.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS- Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. Laudo técnico. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_Ibama.pdf. Acesso 22/04/2019 , 2015.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração – **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira** – Brasília, **2012**. IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração – **Catálogo Centros de Tecnologia Mineral no Brasil**, **2018**. Disponível em: <http://portaldaminerao.com.br/wp-content/uploads/2018/12/catalogo-centros-de-tecnologia-mineral-v10web.pdf>. Acesso em: 22/05/2019.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração - **Relatório Anual de Atividades** – Brasília, **2019**. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/>. Acesso em: 30/11/2020.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração - **Relatório Anual de Atividades – 2020** - Disponível em: <http://www.ibram.org.br/>. Acesso em: 30/11/2020.

INPI – Instituto Brasileiro da Propriedade Industrial. <https://www.gov.br/inpi/pt-br>, 2019. Acesso em: 20/04/2019.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - **2012 – Diagnóstico dos resíduos sólidos das atividades de mineração de substâncias não energéticas. Relatório de pesquisa**. DA SILVA, A. P. M. VIANA, J. P. CAVALCANTE, A. L. B. 2012. Disponível

em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7702/1/RP_Diagn%C3%B#stico_2012.pdf. Acesso em: 01/04/2020.

IZIDORO, J. C.; KIM, M. C.; BELLELLI, V. F.; PANE, M. C.; BOTELHO JUNIOR, A. B.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. - **Synthesis of zeolite A using the waste of iron mine tailings dam and its application for industrial effluent treatment** - *Journal of Sustainable Mining*, v. 18, n. 4, p. 277–286, 2019.

JADHAV, D. A.; GHADGE, A. N.; GHANGREKAR, M. M. - **Enhancing the power generation in microbial fuel cells with effective utilization of goethite recovered from mining mud as anodic catalyst** - *Bioresource Technology*, v. 191, p. 110–116, set. 2015.

JN - **Jornal Nacional - Pesquisa da UFMG aproveita rejeitos de mineração na construção civil - 2020** – Disponível em: <https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2020/01/01/-pesquisa-da-ufmg-aproveita-rejeitos-de-mineracao-na-construcao-civil.ghtml>. Acesso em: 19/12/2020.

JOHNSON, B. – **Institutional learning** – In B. A. LUNDVALL (Ed.) – **National Systems of Innovation: towards a theory of innovation and interaction learning** – Londres, Pinter Publishers, p. 23–44, 1995.

KIRSCHHBAUM, R. - **Open innovation in practice** - *Research Technology Management*, 0895–6308, 2005.

KOMNIMOS, N. – **Regional Intelligence: distributed localized information systems for innovation and development** – *International Journal of Technology Management*, vol. 28, n. 3/4/5/6, p.483–506, 2004.

KURANCHIE, F. A.; SHUKLA, S. K.; HABIBI, D. - **Utilisation of iron ore mine tailings for the production of geopolymer bricks** - *International Journal of Mining - Reclam. Environ.* v. 30, n. 2, p. 92–114, 3 mar. 2016.

LIMA, R. M. F.; ABREU, F. DE P. V. F. - **Characterization and concentration by selective flocculation/magnetic separation of iron ore slimes from a dam of Quadrilátero Ferrífero – Brazil** - *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 2, p. 2021–2027, mar. 2020.

LIU, Y.; DU, F.; YUAN, L.; ZENG, H.; KONG, S. - **Production of lightweight ceramisite from iron ore tailings and its performance investigation in a biological aerated filter (BAF) reactor** - *Journal of Hazardous Materials* – v. 178, n. 1–3, p. 999–1006, jun. 2010.

LIU, P.; GU, X.; ZHANG, Z.; SHI, J.; RAO, J.; BIAN, L. - **Fabrication and thermal properties of capric acid/calcinated iron tailings/carbon nanotubes composite as form-stable phase change materials for thermal energy storage** - *Minerals*, v. 9, n. 11, 2019.

LOPES, L.M.N. - **O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais** - *Sinapse Múltipla*, v.5, n.1, 1–14, 2016.

LU, C.; YANG, H.; WANG, J.; TAN, Q.; FU, L. - **Utilization of iron tailings to prepare high-surface area mesoporous silica materials** - *Science of the Total Environment*, v. 736, p. 139483, 2020.

LUNDEVALL, B. – **National Systems of Innovation: Toward a Theory of Innovation and interactive learning**- London, Pinter Publishers, 1992.

LUNDEVALL, B. - **National systems of innovation: towards a theory of innovation and interactive learning** - 2 ed., Pinter Publishers, London, p.1–19, 1995.

LUNDEVALL, B. - **The learning economy and the economics of hope** - Anthem Press, part II, 2016.

MA, B. GUO; CAI, L. XIONG; LI, X. GUO; JIAN, S. WEI. - **Utilization of iron tailings as substitute in autoclaved aerated concrete: physico-mechanical and microstructure of hydration products** – *Journal of Cleaner Production*, v. 127, p. 162–171, 2016.

MALERBA, F. - **Sectoral systems of innovation and production** - *Research Policy*, v. 31, p.247–264, 2002.

MARTINS, P. F. F. - **Obtenção de sílica de elevada pureza a partir do rejeito de flotação de um minério itabirítico** – Tese - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN, Belo Horizonte, 2016.

MATIOLO, E.; COUTO, H. J. B.; LIMA, N.; SILVA, K.; DE FREITAS, A. S. - **Improving recovery of iron using column flotation of iron ore slimes** - *Minerals Engineering*, v. 158, p. 106608, nov. 2020.

MAZZUCATO, M. - **O Estado Empreendedor. Desmascarando o mito do setor público vs. setor privado** - Portfolio Penguin, 2013.

MAZZUCATO, M. PENNA, C. – **The Brazilian Innovation System: A Mission-Oriented Policy Proposal** – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Brasília, 2016.

MELO, V. A. R. de; LAMEIRAS, F. S.; TOLENTINO, E. - **Conversion of sandy tailing from banded iron formation exploitation into glass-ceramic materials** - *Materials Research*, v. 15, n. 1, p. 15–20, 13 dez. 2011.

MENDES, B. C.; PEDROTI, L. G.; FONTES, M. P. F.; RIBEIRO, J. C. L.; VIEIRA, C. M. F.; PACHECO, A. A.; AZEVEDO, A. R. G. d. - **Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks. Construction and Building Materials** - *Construction and Building Materials*, v. 227, p. 116669, 2019.

MORAIS, M. B. - **Modificações do rejeito da Samarco rico em ferro para uso como adsorventes** - Mestrado Multicêntrico em Química de Minas Gerais - Universidade Federal de Viçosa, 85 p., 2018.

NAKHAEI, F.; IRANNAJAD, M. - **Reagents types in flotation of iron oxide minerals: A review** - *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, v. 39, n. 2, p. 89–124, 4 mar. 2018.

NARCISO, C. R. P. - **Influência do resíduo de minério de ferro na produção de painéis cimento – madeira** – Dissertação - Universidade Federal de Lavras, Lavras, **2018**.

NELSON, R. - **National innovation systems: a comparative analysis** - Oxford University Press, Cap. 1, **1993**.

Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM - **Normas Brasileiras de Mineração**, **2018**.

NUNES, M.; COSTA, S.; Da SILVA, R. - **O Quadrilátero ferrífero e o norte de Minas Gerais: análise da história e importância econômica** - Universidade Estadual de Montes Claros, **2012**.

PAMPLONA, J. B.; PENHA, A. C. - **Innovation policy for the mining sector in Brazil: a comparative analysis with Sweden centered on the interactions of involved agents** - Cad. EBAPE.BR, v. 17, n. 4. Rio de Janeiro, **2020**.

PEREIRA, O. C.; BERNARDIN, A. M. - **Ceramic colorant from untreated iron ore residue. Journal of Hazardous Materials - Journal of Hazardous Materials**, v. 233–234, p. 103–111, **2012**.

PINHO, F. A. e NEIVA, I. K. A. – **200 anos Fábrica Patriótica: A primeira indústria de ferro do Brasil**. – VALE, Belo Horizonte, Minas Gerais, **2012**.

PIMENTA, A. S. A - **Dinâmica da Inovação: como a manutenção industrial cria conhecimento e contribui para a inovação em uma empresa de mineração** - Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Administração da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, **2011**.

PRATES, C. D.; BALLOTIN, F. C.; LIMBORÇO, H.; ARDISSON, J. D.; LAGO, R. M.; TEIXEIRA, A. P. de C. - **Heterogeneous acid catalyst based on sulfated iron ore tailings for oleic acid esterification** - *Applied Catalysis A: General*, v. 600, n. May, p. 117624, **2020**.

PRIM, S. R.; FOLGUERAS, M. V.; DE LIMA, M. A.; HOTZA, D. - **Synthesis and characterization of hematite pigment obtained from a steel waste industry** - *Journal of Hazardous Materials*, v. 192, n. 3, p. 1307–1313, set. **2011**.

R3 MINERAL – **Plataforma R3 Mineral – 2016** – Disponível em: <https://pt.slideshare.net/R3Mineral/plataforma-r-mineral-gesto-e-aplicao-de-rejeitos-em-larga-escala-fernando-lameiras>. Acesso em: 21/05/2020.

ROY, S. K.; NAYAK, D.; RATH, S. S. - **A review on the enrichment of iron values of low-grade Iron ore resources using reduction roasting-magnetic separation** - *Powder Technology*, v. 367, p. 796–808, maio **2020**.

SÁNCHEZ, F.; HARTLIEB, P. - **Innovation in the Mining Industry: Technological Trends and a Case Study of the Challenges of Disruptive Innovation** - *Mining, Metallurgy and Exploration*, Vol. 37, 1385–1389, **2020**. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42461-020-00262-1>. Acesso em: 23/11/2020.

SANT'ANA FILHO, J. N. - **Estudos de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para uso na pavimentação de rodovias e fabricação de blocos intertravados** – Dissertação - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Belo Horizonte, 2013.

SANTOS, U. P. e DINIZ, C. C. – O sistema regional de inovação minero-metalúrgico de Minas Gerais e seus efeitos sobre a siderurgia local. In: Seminário sobre a economia mineira, 14, Anais, CEDEPLAR-UFMG, Diamantina, 2013.

SAKTHIVEL, R.; DAS, B.; SATPATI, B.; MISHRA, B. K. - **Gold supported iron oxide-hydroxide derived from iron ore tailings for CO oxidation** – *Applied Surface Science*, v. 255, n. 13–14, p. 6577–6581, **2009**.

SILVA, R. C. F.; ARDISSON, J. D.; COTTA, A. A. C.; ARAUJO, M. H.; TEIXEIRA, A. P. de C. - **Use of iron mining tailings from dams for carbon nanotubes synthesis in fluidized bed for 17 α -ethinylestradiol removal** - *Environmental Pollution*, v. 260, p. 114099, maio **2020**.

SIMA, T. V.; LETSHWENYO, M. W.; LEOGANG, L. - **Efficiency of waste clinker ash and iron oxide tailings for phosphorus removal from tertiary wastewater: Batch studies** - *Environmental Technology and Innovation*, v. 11, p. 49–63, **2018**.

SIMONATO, T. C. - **Projeção dos impactos econômicos regionais no desastre de Mariana, Minas Gerais** - CEDEPLAR-UFMG, Belo Horizonte, **2017**.

SRIVASTAVA, M. ; PAN, S.; PRASAD, N.; MISHRA, B. - **Characterization and processing of iron ore fines of Kiriburu deposit of India** - *International Journal of Mineral Processing*, v. 61, n. 2, p. 93–107, fev. **2001**.

STEEN, J.; MACAULAY, S.; KUNZ, N.; JACKSON, J. - **Understanding the innovation ecosystem in mining and what the digital revolution means for it** - June **2018**. Doi 10.13140/RG.2.2.23122.66248.

STEVIC', D.; MIHAJLOVIC, D.; KUKOBAT, R.; HATTORI, Y.; SAGISAKA, K.; KANEKO, K.; ATLAGIC, S. G. - **Hematite Core Nanoparticles with Carbon Shell: Potential for Environmentally Friendly Production from Iron Mining Sludge** - *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 25, n. 8, p. 3121–3127, **2016**.

SUH, Y. J.; KIL, D. S.; JANG, H. D.; CHO, K. - **Use of low-grade iron ore for producing a nano-adsorbent and a complex fertilizer** - *Geosystem Engineering*, v. 18, n. 4, p. 205–212, **2015**.

SUOMINEN, A. TOIVANEN, H. SEPPÄNEN, M. – **Firm's knowledge profiles: Mapping patent data with unsupervised learning** – *Technological Forecasting & Social Change*, v. 115, p.131–142, **2017**.

TAVEIRA, A. N. S. – **Análise qualitativa da distribuição de custos ambientais. Estudo de caso da Samarco Mineração S.A.** – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociencias, Dissertação de Mestrado, Campinas, SP, **1997**.

THOMPSON, F.; DE OLIVEIRA, B. C.; CORDEIRO, M. C.; MASI, B. P.; RANGEL, T. P.; PAZ, P.; FREITAS, T.; LOPES, G.; SILVA, B. S.; CABRAL, A.; SOARES, M.;

LACERDA, D.; DOS SANTOS VERGILIO, C.; LOPES-FERREIRA, M.; LIMA, C.; THOMPSON, C.; DE REZENDE, C. E. - **Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River** - *Science of the Total Environment*, v. 705, p. 1–6, **2020**.

UPSTILL, G. HALL. P. – **Innovations in the mineral industry: Australia in a global context** – *Resources Policy*, v. 31, p.137–145, **2006**.

USMAN, U. A.; YUSOFF, I.; RAOOV, M.; HODGKINSON, J. – **The economic potential of the African iron-ore tailings: synthesis of magnetite for the removal of trace metals in groundwater—a review** – *Environmental Earth Sciences*, v. 78, n. 21, p. 1–22, **2019**.

USGS - U.S. Geological Survey- **Mineral Commodity Summaries** - *Mineral Commodity Summaries*; Washington, USA, **2019**.

VALE - **2020** - **Vale inaugura fábrica que transforma rejeitos da mineração em produtos para a construção civil**. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/vale-inaugura-fabrica-que-transforma-rejeitos-da-mineracao-em-produtos-para-a-construcao-civil.aspx>. Acesso em: 15/12/2020.

XU, D. M.; ZHAN, C. L.; LIU, H. X.; LIN, H. Z. - **A critical review on environmental implications, recycling strategies, and ecological remediation for mine tailings** – *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, n. 35, p. 35657–35669, **2019**.

YANG, C.; CUI, C.; QIN, J.; CUI, X. – **Characteristics of the fired bricks with low-silicon iron tailings** - *Construction and Building Materials*, v. 70, p. 36–42, nov. **2014**.

YANG, C.; CUI, C.; QIN, J. - **Recycling of low-silicon iron tailings in the production of lightweight aggregates** - *Ceramics International*, v. 41, n. 1, p. 1213–1221, **2015**.

YELLISHRTTY, M.; KARPE, V.; REDDY, E. H.; SUBHASH, K. N.; RANJITH, P. G. - **Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study** - *Resources, Conservation and Recycling*, v. 52, n. 11, p. 1283–1289, **2008**.

YUAN, X.; XIA, W.; AN, J.; ZHOU, X.; XIANG, X.; YIN, J.; YANG, W. - **Adsorption characteristics of Pb(II) ions onto wasted iron ore tailing with phosphorus used as natural adsorbent from aqueous solution** - *Desalination and Water Treatment*, v. 98, p. 222–232, **2017**.

ZHAO, S.; FAN, J.; SUN, W. - **Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultrahigh performance concrete** - *Construction and Building Materials*, v. 50, p. 540–548, **2014**.

ZHANG, S.; XUE, X.; LIU, X.; DUAN, P.; YANG, H.; JIANG, T.; WANG, D.; LIU, R. - **Current situation and comprehensive utilization of iron ore tailing resources** - *Journal of Mining Science*, v. 42, n. 4, p. 403–408, jul. **2006**.

ZHANG, P.; LI, S.; GUO, P.; ZHAO, X. - **Synthesis of ZSM-5 Microspheres Made of Nanocrystals from Iron Ore Tailings by the Solid-Phase Conversion Method** - *Langmuir*, v. 36, n. 22, p. 6160–6168, 9 jun. **2020**.

ZHENG, J.; GAO, Z.; HE, H.; YANG, S.; SUN, C. - **Efficient degradation of Acid Orange 7 in aqueous solution by iron ore tailing Fenton-like process** - *Chemosphere*, v. 150, p. 40–48, **2016**.

ZUCCHERANTTE, A. C. V.; FREIRE, C. B.; LAMEIRAS, F. S. - **Synthetic gravel for concrete obtained from sandy iron ore tailing and recycled polyethylthephtalate** - *Construction and Building Materials*, v. 151, p. 859–865, out. **2017**.

WANG, Y.; WANG, Y.; LUO, S.; JIANG, M.; LIU, C.; TENG, F.; CHEN, H.; SHEN, H.; GAO, D. - **Preparation of high performance LiFePO₄/C by extracting iron element from iron tailings by concentrated sulfuric acid hot dip method** - *Ionics (Kiel)*, v. 26, n. 4, p. 1645–1655, **2020**.

WEISHI, L.; GUOYUAN, L.; YA, X.; QIFEI, H. - **The properties and formation mechanisms of eco-friendly brick building materials fabricated from low-silicon iron ore tailings** - *Journal of Cleaner Production*, v. 204, p. 685–692, **2018**.

WIPO – WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION – **Technology appropriation and technology transfer in the Brazilian mining sector** – BLUNDI, D.; LOUREIRO, A. C. N. S.; JORGE, N. F.; LOPES, S. V.; DA SILVA, G. P.; ORIND, V. - *Economic Research, Working Paper*, n. 53, **2019a**.

WIPO – WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION - **Mining Patent Data: Measuring Innovation in the Mining Industry** -. BLUNDI, D.; LOUREIRO, A. C. N.; JORGE, M. F.; ORIND, V. - *Economic Research Working Paper*, n. 56, **2019b**.

WU, S.; SUN, A.; ZHAI, F.; WANG, J.; XU, W.; ZHANG, Q.; VOLINSKY, A. A. - **Fe₃O₄ magnetic nanoparticles synthesis from tailings by ultrasonic chemical co-precipitation** - *Materials Letters*, v. 65, n. 12, p. 1882–1884, **2011**.

